



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE LAS  
EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**

**Cristhian Emmanuel Valle Interiano**

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE LAS  
EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CRISTHIAN EMMANUEL VALLE INTERIANO**

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paíz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Martínez
EXAMINADOR	Ing. Nicolás De Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE LAS EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha de marzo de 2013.



**Cristhian Emmanuel Valle Interiano**



**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Guatemala, 18 de agosto de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

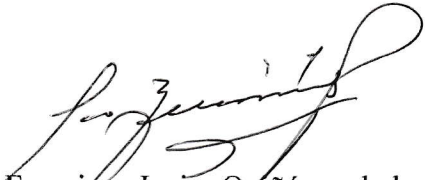
Estimado Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Metodología para la inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala”**, desarrollado por el estudiante universitario **Cristhian Emmanuel Valle Interiano**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Valle Interiano** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

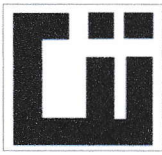
ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Francisco Javier Quiñónez de la Cruz  
Coordinador Unidad de Investigación







Guatemala, 18 de agosto de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

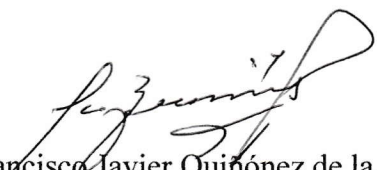
Estimado Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Metodología para la inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala”**, desarrollado por el estudiante universitario **Cristhian Emmanuel Valle Interiano**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Valle Interiano** satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Francisco Javier Quinón de la Cruz  
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941  
Jefe Sección Ecomateriales  
Centro de Investigaciones de Ingeniería  
Asesor



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>


**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



Guatemala, 25 de noviembre de 2020  
 DEIC-TG-EIC-019-2020/paap

El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil, Ingeniero Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Crithian Emmanuel Valle Interiano, **METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE LAS EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
**Director Escuela Ingeniería Civil**



Interesado  
 Asesor  
 Coordinador de la Unidad de Investigación

*Más de 140 años de Trabajo y Mejora Continua*





DTG. 433.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **METODOLOGÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE LAS EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Cristhian Emmanuel Valle Interiano**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su gracia, por brindarme la fortaleza y convicción de luchar por lo que deseo, y sentir su presencia en mi vida.
- Mis padres** Carlos Manuel Valle Vela y Enma Francisca Interiano de Paz por ser mi guía, mi ejemplo a seguir y la inspiración para mis estudios.
- Mi hermana** Jacqueline Valle, por ser un apoyo fundamental en todo este proceso, por sus ánimos y su incondicionalidad.
- Mi familia** Tíos, primos y abuelos, por confiar en mí, mostrarme su afecto durante toda mi vida y darme una motivación especial para poder alcanzar uno de mis sueños.
- Mis amigos** Por prestarme su tiempo y su atención, por creer en mí, por llenar mi vida de entusiasmo, alegría y por estar conmigo en el momento indicado.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por brindarme la vida.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, y brindarme el espacio para el aprendizaje.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por apoyar a los estudiantes y a mí a convertirnos en profesionales.
<b>Mi familia</b>	Mis padres, hermana, tíos, primos y abuelos, por darme su ejemplo y su apoyo.
<b>A las familias</b>	Rivera Ticas, Nieto Piñeros, Mendoza Meza, Pérez Álvarez, Mérida Meléndez, López Hernández por su apoyo, consejos, sugerencias y seguimiento durante este proceso.
<b>Amigos</b>	De la infancia, del colegio y de la universidad por los momentos, la compañía, la incondicionalidad y por ser una importante influencia e inspiración en mi carrera.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Francisco Javier Quiñónez de La Cruz por su asesoría y motivación para culminar este trabajo de graduación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XXI
OBJETIVOS .....	XXIII
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA EN LA ÉPOCA COLONIAL .....	1
1.1. Reseña histórica .....	1
1.2. Materiales de construcción utilizados en la época colonial.....	5
1.2.1. Rocas .....	6
1.2.2. Tierra .....	8
1.2.3. Morteros .....	9
1.2.4. Madera .....	11
1.2.5. Ladrillo .....	13
1.3. Metodología constructiva de la época colonial .....	15
1.3.1. Aspectos generales .....	15
1.3.2. Técnicas de construcción con tierra .....	17
1.3.2.1. Adobe .....	17
1.3.2.2. Tapial .....	19
1.3.2.3. Bahareque .....	21
1.3.3. Elementos constructivos de la época colonial .....	22
1.3.3.1. Cimentaciones .....	23
1.3.3.2. Muros y contrafuertes .....	25



1.3.3.3.	Columnas .....	30
1.3.3.4.	Arcos .....	32
1.3.3.5.	Cubiertas .....	36
1.3.3.6.	Bóvedas .....	37
1.3.3.7.	Cúpula .....	40
1.3.3.8.	Vanos .....	44
2.	FILOSOFÍA DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA ÉPOCA COLONIAL.....	47
2.1.	Principios generales del diseño estructural de la época.....	47
2.2.	La geometría y mecánica aplicada en el diseño estructural .....	49
2.3.	Consideraciones respecto al diseño sismo-resistente de las edificaciones .....	53
2.3.1.	Orientación geográfica .....	57
2.3.2.	Proporción .....	57
2.3.3.	La forma .....	59
2.3.4.	Influencia de la configuración y escala .....	62
2.3.5.	Influencia de la altura y proporción.....	64
2.3.6.	Simetría .....	66
2.3.7.	El material .....	68
2.3.8.	El lugar .....	68
2.4.	Consideraciones respecto la falla de una edificación colonial.....	70
2.5.	Limitaciones de la filosofía del diseño estructural de la época colonial.....	77
2.5.1.	Tecnología.....	77
2.5.2.	Arreglos y tipos de materiales de construcción .....	79
2.5.3.	Diseño estructural .....	79

3.	METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA ...	81
3.1.	Criterios generales utilizados por profesionales para realizar una inspección y análisis visual de edificaciones coloniales ...	81
3.2.	Aspectos de la metodología de inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala.....	88
3.2.1.	Investigación histórica y análisis arquitectónico.....	88
3.2.2.	Alcance de la inspección .....	90
3.2.3.	Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación .....	90
3.2.4.	Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial.....	92
3.2.5.	Anotación de datos, comentarios y hallazgos de la inspección visual.....	94
3.2.6.	Análisis de resultados.....	96
4.	GUÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA.....	97
4.1.	Aspectos generales .....	97
4.2.	Guía preliminar de análisis e inspección visual ingenieril de edificaciones coloniales .....	98
4.2.1.	Delimitación e información del alcance de la inspección de la edificación colonial .....	98
4.2.2.	Investigación histórica y estructural .....	99
4.2.3.	Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación .....	100
4.2.4.	Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial.....	100

4.2.4.1.	Primera fase: Inspección global de la edificación .....	100
4.2.4.2.	Segunda fase: examen del terreno ....	101
4.2.4.3.	Tercera fase: inspección de los datos estructurales.....	101
4.2.4.4.	Cuarta fase: inspección de los daños y fallas estructurales.....	101
4.2.5.	Completar la lista de revisión y generar la documentación de la inspección visual ingenieril ..	102
4.2.6.	Análisis de los hallazgos .....	102
4.3.	Aplicación del análisis e inspección visual en 4 edificaciones coloniales de la Antigua Guatemala .....	103
4.3.1.	Convento Santa Clara .....	103
4.3.2.	Convento Santa Teresa .....	112
4.3.3.	Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz .....	122
4.3.4.	Muro divisorio Finca Retana – Calle a San Bartolomé Becerra .....	127
4.4.	Análisis de las 4 edificaciones.....	133
4.4.1.	Templo de Santa Clara .....	133
4.4.2.	Convento de Santa Teresa de Jesús .....	144
4.4.3.	Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz .....	154
4.4.4.	Muro perimetral Finca Retana – Carretera a San Bartolomé Becerra .....	160
4.5.	Modificaciones a la guía preliminar .....	165
4.5.1.	Delimitación e información del alcance de la inspección de la edificación colonial.....	165
4.5.2.	Investigación histórica y estructural.....	166
4.5.3.	Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación.....	167

4.5.4.	Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial.....	168
4.5.5.	Completar la lista de revisión y generar la documentación de la inspección visual ingenieril .	170
4.5.6.	Análisis ingenieril de la edificación colonial .....	170
CONCLUSIONES.....		173
RECOMENDACIONES .....		175
BIBLIOGRAFÍA .....		177
APÉNDICES.....		181



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Calicanto entre hiladas de ladrillo.....	7
2.	Paredes construidas con adobe en una casa colonial en La Antigua Guatemala.....	9
3.	Mortero de cal y arena utilizado para la unir ladrillos, Ermita de San Jerónimo, La Antigua Guatemala .....	10
4.	Diferentes usos de la madera, La Antigua Guatemala .....	12
5.	Diferentes elementos estructurales construidos con ladrillo, San José Catedral, La Antigua Guatemala, 2018. ....	14
6.	Pared construida con adobe, La Antigua Guatemala .....	19
7.	Muro construido con tapial, Carretera a San Bartolomé Becerra, La Antigua Guatemala.....	20
8.	Forma de encofrado del tapial.....	21
9.	Casa construida con técnica de bahareque, municipio de Olopa, Chiquimula, Guatemala.....	22
10.	Sección transversal de cimientos históricos .....	24
11.	Falla cortante y desprendimiento del recubrimiento de un muro, Convento de Santa Teresa, La Antigua Guatemala .....	27
12.	Mampostería ciclópea en un muro del Convento Santa Clara, La Antigua Guatemala.....	28
13.	Rafas (hileras de ladrillo) en un muro, San José Catedral, La Antigua Guatemala.....	30
14.	Materiales de construcción para columnas, San José Catedral, La Antigua Guatemala.....	31

15.	Ejemplo de arco en la Catedral de La Antigua Guatemala .....	33
16.	Diferentes tipos de arreglos de roca labrada para dinteles .....	34
17.	Geometría básica de los arcos .....	35
18.	Línea de presiones en un arco de medio punto .....	36
19.	a) Vista desde debajo y b) Vista superior de las bóvedas centrales del Templo de San Francisco El Grande .....	38
20.	Bóvedas cuatripartidas y sextipartidas.....	39
21.	Tipos de bóveda .....	39
22.	Cúpula del Templo de La Merced, La Antigua Guatemala.....	40
23.	Diagramas de pechinas .....	41
24.	Vista de las pechinas de una cúpula, Templo de San Francisco El Grande .....	42
25.	Diagramas de transmisión de cargas en cúpulas respecto a sus puntos de apoyo .....	43
26.	Esquema de la cúpula esférica .....	44
27.	Vanos de puertas y ventanas contruidos con roca labrada.....	45
28.	Diseño geométrico de espesor de muros para carga de bóvedas .....	59
29.	Templo y Convento de San Francisco El Grande, Planta Alta.....	61
30.	Plano compuesto, hecho por Luis Diez Navarro (1755-1769).....	63
31.	Monasterio y Templo La Merced en La Antigua Guatemala .....	67
32.	Simetría en estructura de techo, Casa del Sacristán Mayor, Catedral, La Antigua Guatemala .....	67
33.	Mapa de la Ciudad de Santiago de los Caballeros 1543-1773 .....	69
34.	Gráficas de fallas comunes en elementos estructurales .....	74
35.	Colapso de muro en Antigua Guatemala, lado oriente del Palacio de los Capitanes Generales .....	78
36.	Borde de bóveda, área de Templo de Santa Clara.....	106
37.	Muro poniente, Templo Santa Clara 2012 y 2019.....	106
38.	Desprendimiento de material, Santa Clara .....	107

39.	Arcos, piso e interior del templo Santa Clara .....	107
40.	Coro alto y reparaciones del CNPAG .....	108
41.	Agrietamiento y desprendimiento de material .....	108
42.	Agrietamiento en vano superior poniente.....	109
43.	Ubicación del templo en la planta del Convento Santa Clara.....	109
44.	Ubicación del Convento Santa Clara.....	110
45.	Vista de muro poniente del Convento Santa Clara, sobre la 2ª. Avenida Sur, La Antigua Guatemala .....	111
46.	Vista de muro norte sobre la 6ª. Calle Oriente, La Antigua Guatemala	111
47.	Ubicación del Convento de Santa Teresa de Jesús.....	117
48.	Planta baja y alta, Convento Santa Teresa de Jesús.....	118
49.	Fallas en muros en el convento.....	119
50.	Fallas y arreglos en columnas dentro del convento .....	119
51.	Panorámica del patio y alrededores del convento.....	119
52.	Trabajos de remodelación por parte del CNPAG .....	120
53.	Trabajos en techos y entrepisos por parte del CNPAG .....	120
54.	Panorámica de esquina del Convento Santa Teresa de Jesús .....	120
55.	Falla por flexión fuera del plano de muro portante .....	121
56.	Perspectivas de la cara norte, sobre la 1ª. Calle Oriente, Convento de Santa Teresa de Jesús.....	121
57.	Materiales diversos en vano y muro sobre la 1ª. Calle Oriente .....	122
58.	Ubicación de la edificación .....	124
59.	Deterioro en paredes dentro de la casa .....	125
60.	Detalle de piso.....	125
61.	Panorámica de la esquina entre 6ª. Calle y 4ª. Avenida Sur.....	125
62.	Perspectiva de la terraza española .....	126
63.	Dintel de roca en puerta principal.....	126
64.	Perspectiva junto a la Casa Chamorro, 4ª. Avenida Sur .....	127
65.	Deterioro en muros perimetrales .....	130



66.	Muro antiguo y material contemporáneo.....	130
67.	Panorámica del ingreso a la Finca Retana y el muro.....	130
68.	Vegetación encima del muro.....	131
69.	Deterioro en varias secciones del muro perimetral.....	131
70.	Grietas transversales en muro.....	132
71.	Ubicación del muro perimetral.....	132
72.	Ubicación del muro dentro del área de La Antigua Guatemala.....	133
73.	Planta y divisiones del complejo de Santa Clara.....	134
74.	Colapso de la sección de una ventana, Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala, 1976.....	137
75.	Intervención la parte superior de una ventana en el Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala.....	138
76.	Contrafuerte sobre la 2ª. Avenida Sur, La Antigua Guatemala.....	139
77.	Vista aérea del conjunto y de las bóvedas del Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala, 2019.....	141
78.	Ubicación del contrafuerte en el Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala.....	142
79.	Arcos y bóvedas faltantes en Templo Santa Clara, La Antigua Guatemala, 2012.....	143
80.	Bóvedas en coro alto, Templo de Santa Clara.....	144
81.	Plano del conjunto de Santa Teresa de Jesús.....	146
82.	Diferentes fallas en muros de mampuestos.....	147
83.	Falla por flexión en un muro.....	148
84.	Línea de agrietamiento que evidencia falla por flexión en uno de los muros del segundo nivel.....	148
85.	Evidencia de fallo por cortante y flexión.....	149
86.	Agrietamiento por concentración de esfuerzos en vanos.....	150
87.	Proceso de restauración de columnas en el convento.....	151
88.	Falla por apertura de apoyos y coceo en arco.....	152

89.	Falla por movimiento lateral de muros en bóveda.....	153
90.	Planta conjunto, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz.....	155
91.	Deterioro en paredes de la Casa Fray Rodrigo de la Cruz.....	156
92.	Deterioro en cúpulas y linternillas.....	157
93.	Vista del artesonado de terraza española, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz.....	158
94.	Cúpula y linternilla, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz .....	159
95.	Daño por humedad en muro divisorio .....	162
96.	Materiales contemporáneos agregados al muro de tapial.....	163
97.	Mezcla de materiales de diferentes épocas .....	164
98.	Ruptura transversal por flexión.....	165

## TABLAS

I.	Resistencia mínima a compresión de ciertas rocas .....	6
II.	Esfuerzos básicos para maderas guatemaltecas .....	12
III.	Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería .....	26
IV.	Tipologías comunes de daños y fallas en elementos estructurales.....	72



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>°C</b>	Celsius, unidad de temperatura
<b>cm</b>	Centímetro, unidad de longitud
<b>cm<sup>2</sup></b>	Centímetro cuadrado, unidad de área
<b>Δ</b>	Deformación, cambio de longitud por fuerza externa
<b>ε</b>	Deformación unitaria
<b>σ</b>	Esfuerzo
<b>g</b>	Gramo, unidad de peso
<b>I<sub>o</sub></b>	Índice de sismicidad
<b>kg</b>	Kilogramos, unidad de peso
<b>MPa</b>	Mega pascales, unidad de esfuerzo
<b>m</b>	Metros, unidad de longitud
<b>mm</b>	Milímetro
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
<b>No.</b>	Número
<b>%</b>	Porcentaje
<b>in</b>	Pulgadas, unidad de longitud
<b>S<sub>cr</sub></b>	Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés.
<b>S<sub>1r</sub></b>	Ordenada espectral de periodo 1 seg. del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés.



## GLOSARIO

<b>Altar</b>	Mesa ritual en la que se desarrollan la acción eucarística y otros actos litúrgicos de la iglesia.
<b>Anastilosis</b>	Es la intervención que tiene por objeto reintegrar elementos desplazados de su posición original dentro de la edificación.
<b>Arco rebajado</b>	Aquel cuya línea de arranque se halla por encima del centro geométrico.
<b>Artesonado</b>	Cubierta de madera de un edificio en forma de artesa. Empleado por los árabes, pasó a España donde tuvo vigencia. De ahí paso a América. Se usó hasta el siglo XIX.
<b>Azotea</b>	Espacio útil que se aprovecha sobre una bóveda o una cubierta adintelada. El revestimiento podría ser de ladrillo, argamasa o similar. Solía tener pretilas en los bordes que daban al vacío.
<b>Bautisterio</b>	Espacio generalmente colocado a los pies de la nave. Contiene la pila bautismal donde se administra el sacramento del bautismo, se comunica con la nave mediante reja o cancela. Suele tener decoración de pintura mural, cuadros o esculturas del bautismo de Cristo.

<b>Bóveda</b>	Cubierta de un edificio en forma curva constituida por elementos pequeños, geoméricamente se engendra por la sucesión de arcos.
<b>Calle</b>	Cada una de las partes verticales en que se divide el retablo o portada; son en número impar denominándose, de acuerdo a su lugar, calle central o laterales.
<b>Campanario</b>	Edificación destinada a colocar las campanas con que se anuncia a los fieles las funciones eclesiásticas. El cuerpo de campanas suele estar sobre una torre, construcción en forma prismática adosada o exenta del cuerpo del templo.
<b>Capitel</b>	Elemento que se dispone en el extremo superior de la columna que sirve para soportar cargas horizontales.
<b>Conservación</b>	Es toda acción que tiene por objeto prevenir las alteraciones y detener el deterioro de su inicio y consiste en la aplicación de los procedimientos técnicos cuya finalidad es la de detener los mecanismos de alteración o impedir que surjan nuevos deterioros en un edificio histórico. Su objetivo es garantizar la permanencia de dicho patrimonio arquitectónico.

<b>Consolidación</b>	Proceso que contribuye a la conservación del elemento y tiene por objeto detener las alteraciones sufridas; como el término mismo lo indica, da solidez a un elemento que la ha perdido o la está perdiendo. En el lenguaje tradicional se utiliza sin referirse en ningún caso a las condiciones de estabilidad de una estructura.
<b>Dintel</b>	Elemento horizontal que salva un espacio libre entre dos apoyos, límite superior de puertas y ventanas.
<b>Esbeltez</b>	Es la relación que existe entre la sección del elemento y su longitud.
<b>Estuco</b>	Pasta formada principalmente de cal, reacciona con el agua endureciéndose hasta lograr la unión de los elementos estructurales.
<b>Inercia</b>	Es la resistencia que un cuerpo en rotación opone al cambio de su velocidad de giro.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>Integración</b>	Aportación de elementos claramente nuevos y estructuralmente necesarios para asegurar la conservación del edificio, siendo perfectamente reconocidos.
<b>Mampostería</b>	Aparejo de roca desigual dispuesta en forma irregular.



<b>Mantenimiento</b>	Es la acción que tiene por objeto evitar el deterioro, sosteniendo las condiciones de habitabilidad sin alteraciones. Toda obra monumental o no, supone a su terminación un mantenimiento permanente.
<b>Medio punto</b>	Es el arco directriz semicircular.
<b>Mortero</b>	Es una mezcla de conglomerantes orgánicos, áridos y agua.
<b>Nave</b>	Espacio de un templo limitado por los muros y la cubierta. Salvo excepciones raras, las iglesias tienen un número impar de naves.
<b>Pilastra</b>	Pie derecho. Parte de un orden de forma rectangular que sobresale de la pared. Lleva los pedestales, bases y capiteles correspondientes.
<b>Pretil</b>	Parte terminal de una portada o fachada que puede adquirir forma de esfera, pirámide, agujas, entre otros.
<b>Puzolana</b>	Materiales con alto contenido de silicio y aluminio, con poca o ninguna propiedad cementante sino hasta pasar por algún proceso físico o químico combinadas con cal y agua.

<b>Reconstrucción</b>	Es todo proceso constructivo necesario para lograr la conservación de un edificio histórico, en el ámbito de la arquitectura existe un temor por el uso de este término.
<b>Reintegración</b>	Es el proceso que tiene por objeto devolver unidad a elementos deteriorados o desubicados, restituyéndolos a su sitio original.
<b>Restauración</b>	Tiene como fin conservar y revelar los valores estéticos e históricos de un monumento, y se fundamenta en el respeto hacia los elementos antiguos y las partes auténticas. Se detiene en el momento en que comienza la hipótesis; más allá, todo complemento reconocido como indispensable se destacará de la composición arquitectónica y llevará el sello de nuestros tiempos.
<b>Retablo</b>	Decoración colocada en torno y sobre el altar, en el muro frontal de una capilla. Se utiliza para colocar imágenes o pinturas alusivas a la vida de Cristo, la Virgen y los Santos. Puede tener uno o varios cuerpos. Puede ser de madera, estuco, rocas, mármol, entre otros.
<b>Torre</b>	Conjunto estructural colocado junto a un templo o exento del cuerpo del mismo y que está conformado por un cubo, que sirve de base a un cuerpo de campanas con abertura generalmente de arcos.

**Vano**

Límite de una abertura en un muro generalmente utilizado para puertas y ventanas.

## RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología y una guía para la inspección visual, desde el punto de vista ingenieril, de las edificaciones coloniales en Guatemala. Este estudio representa un punto de partida clave para determinar el estado actual y las características de los elementos de importancia para la estabilidad estructural, y ya que los sismos son de gran influencia para el colapso de las edificaciones históricas, es necesario contemplar la restauración o intervención de las mismas.

El trabajo comienza con una recopilación bibliográfica de los datos relacionados con los sistemas constructivos de la época colonial con el fin de exponer las características de los materiales y elementos estructurales propios de la época, Gran parte de esta información se recoge del libro Ingeniería estructural de los edificios históricos de Roberto Meli, cuyo estudio abarca conceptos estructurales necesarios para la comprensión de esta investigación. Continúa con la recopilación de información acerca de los conceptos filosóficos del diseño estructural de las edificaciones coloniales en Guatemala.

Se realizó una recopilación de información a través de entrevistas a profesionales que hayan tenido experiencias de análisis e inspección de edificaciones coloniales a fin de aportar en la discusión y definición de los aspectos que se relacionarán con la metodología de inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales. El trabajo procede con la discusión sobre las limitaciones de la filosofía estructural de la época, integrando las consideraciones respecto a la falla de los elementos estructurales, tipologías de falla y la forma de identificarlas en las estructuras.

Se hace una definición de los aspectos que se relacionan con la metodología de inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales que se establecen para crear una guía preliminar para realizar una adecuada inspección y análisis visual de los monumentos coloniales.

La guía preliminar es el punto de partida para practicar el análisis y la inspección visual a cuatro edificaciones coloniales en La Antigua Guatemala, lo cual constituye el aporte fundamental de este trabajo.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Desarrollar una metodología para el análisis e inspección visual ingenieril de las edificaciones coloniales de Guatemala a partir de experiencias en La Antigua Guatemala.

### **Específicos**

1. Identificar las características de los sistemas constructivos de edificaciones coloniales de La Antigua Guatemala.
2. Identificar los conceptos filosóficos del diseño estructural de las edificaciones coloniales de La Antigua Guatemala.
3. Desarrollar una metodología que permita realizar una inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala.
4. Desarrollar una guía para la inspección y análisis visual ingenieril de los edificios coloniales en Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La ingeniería estructural de los edificios históricos no se limita sólo a un cálculo y análisis de esfuerzos para la revisión de la seguridad y el análisis del refuerzo, también se incluyen procedimientos de inspección, diagnóstico, monitoreo del comportamiento y la evaluación de las técnicas que puede utilizarse para corregir deficiencias y restablecer un comportamiento adecuado en la edificación.

La consolidación sismo-resistente de las edificaciones históricas es de importancia en la conservación de los monumentos, tomando en cuenta que existen edificaciones históricas que requieren de intervenciones para su preservación.

Se puede decir que la inspección y análisis visual es el punto de partida clave para determinar el estado actual y las características de los elementos de importancia para la estabilidad estructural.

En este trabajo las edificaciones coloniales ubicadas en La Antigua Guatemala serán la base para redactar una metodología para realizar una inspección y análisis visual, desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, de las edificaciones coloniales en Guatemala.

Este trabajo forma parte de la información previa a la formulación de un proyecto de investigación en el tema, por la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil.





# 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA EN LA ÉPOCA COLONIAL

## 1.1. Reseña histórica

El período colonial en Guatemala duró casi 300 años y el inicio del mismo se sitúa en 1527. El primer asentamiento español en Guatemala (fundado por Pedro de Alvarado el 25 de julio de 1524), tuvo como función principal, un cuartel general para próximas conquistas. El lugar elegido para su localización fue “Iximché” (árbol de maíz), fundado en 1470 en el altiplano central de Guatemala, fue la capital del reino maya kaqchiquel.

Sin embargo, se dieron muchos enfrentamientos entre la población autóctona y los españoles por la apropiación de las tierras y no fue hasta 1527 en que se realizó el trazado de una nueva ciudad en el valle de Almolonga, al pie del volcán Hunapú, así denominado por los cakchiqueles (ahora conocido como Volcán de Agua), que es en donde las características estructurales y arquitectónicas de la época colonial empiezan a observarse.

Los desastres provocados por eventos naturales iban a determinar el destino urbanístico de Guatemala, y así, catorce años después de la fundación de dicha ciudad esta fue destruida por un flujo de lodo proveniente de las faldas del volcán, lo que forzó su traslado al vecino Valle de Panchoy. El 10 de marzo de 1543 se llevó a cabo la fundación de Santiago de los Caballeros, que se formó como capital y centro político y administrativo del *Reyno de Goathemala*.

El crecimiento de la ciudad continuó a lo largo de los siglos XVII y XVIII, período en que se edificaron y establecieron distintas sedes de órdenes religiosas; se realizaron también las principales obras públicas e infraestructuras y se fundó la Universidad de San Carlos en 1676. Con el terremoto de 1773 se finalizó el destino de la ciudad de Santiago de los Caballeros o Santiago de Guatemala como capital colonial. Después de una constante lucha entre personas que apoyaban el traslado de la ciudad y los que no, se emitió en 1775 una “Real Cédula” a favor de la fundación de una nueva capital en el Valle de las Vacas (también conocido como Valle de la Ermita o de la Virgen), a 28 kilómetros al noreste de Santiago siendo el argumento principal para el traslado, la protección contra catástrofes producidas por fenómenos naturales, pero al mismo tiempo siempre hubo intereses económicos, políticos y sociales.

A partir del último cuarto del siglo XVIII, el mayor empuje constructivo en el Reino de Guatemala se dio en la actual ciudad capital, era el año de 1776 cuando se inicia una nueva época urbanística, luego del “traslado”, se dispuso en repetir en lo posible los elementos urbanos de la antigua Santiago, es decir que en el nuevo asentamiento deberían estar los mismos edificios públicos, eclesiásticos y casas de habitación que en la capital anterior. La estructura urbana que ya existía permitió una ocupación temporal en el actual Barrio La Parroquia, mientras se trazaban y construían las primeras instalaciones y edificaciones, lo que tomó alrededor de 20 años. La metrópoli ocupaba el actual Centro Histórico: de la 1ª. a la 18 calle y de la 1ª. a la 12 avenida de la zona 1.

Las edificaciones coloniales tuvieron auge en la región central, en múltiples regiones de Guatemala también se establecieron distintos grupos eclesiásticos y administrativos, dando paso a la construcción de varios tipos de edificaciones a lo largo de la república.

Para ese entonces el diseño de una edificación colonial no se basaba directamente en el cálculo estructural y el análisis sismorresistente como se hace actualmente; se hacía con algo que podría llamarse intuición educada. La intuición educada consideraba los aspectos geométricos para las formas y tamaños y tomando en cuenta la experiencia que los constructores traían de otros lugares, otros países.

“Con frecuencia se les denominaba a los diseñadores y constructores de la época colonial como ingenieros de fortificaciones o arquitecto. Los españoles eran inherentemente constructores y sumamente buenos. Para el año 1550 los colonizadores habían adoptado para los muros de edificios eclesiásticos una forma de construcción que se conservó”.<sup>1</sup>

Las primeras construcciones que se realizaron eran de carácter temporal debido a que las viviendas y gran parte de las construcciones religiosas estaban formadas por ranchos y chozas, la construcción entonces se realizaba de manera práctica por algunos españoles (sin experiencia en construcciones) y la mano de obra de indígenas y esclavos africanos.

Cuando el proceso de la conquista cesó y se dio paso al adoctrinamiento espiritual, también los frailes se convirtieron en constructores empíricos, aunque entre ellos, al parecer, existieron quienes conocían mejor los métodos constructivos y que, incluso, eran arquitectos. Sin embargo, se establece que hasta a mediados del siglo XVI llegaron arquitectos profesionales nombrados por la corona española a Guatemala.

---

<sup>1</sup> VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de La Antigua Guatemala 1543 – 1773*. p. 22.

En esa época, los arquitectos como tales tomaban labores de cálculo y diseño puesto que no existía una especialización concreta en obra civil. Se construía con materiales y mano de obra de la localidad. Muchas construcciones fueron hechas de tierra apisonada, adobes, cañas y techo de paja. Luego se empleó el ladrillo de arcilla cocida, teja y roca. Los movimientos sísmicos que suscitaron a lo largo de la historia de Guatemala fueron determinantes en el proceso constructivo, puesto que obligaron a que las obras posteriores fueran de carácter más durable.

“En el siglo XVII se desarrolló en Guatemala un movimiento de construcción en gran escala; se comenzó a construir gran cantidad de templos, conventos y edificios públicos, ya que se entraba de lleno a un período de mayor estabilización de todas las instituciones coloniales”.<sup>2</sup>

Los arquitectos más importantes del siglo XVII en Guatemala fueron: el mestizo Juan Pascual y su discípulo Joseph de Porres. Pascual trabajó en la segunda catedral y en la iglesia de San Pedro, en La Antigua Guatemala. Porres terminó el templo de San Pedro y construyó numerosos templos como Santa Teresa, Belén, Compañía de Jesús, La Recolectión, San Francisco y concluyó los trabajos de la catedral; todos aún en La Antigua Guatemala. En ellos se puede notar la experiencia de Porres y se puede suponer que conoció varios libros de tratadistas de arquitectura.

En el siglo XVIII se notaron cambios importantes en la ingeniería del diseño y la concepción arquitectónica. Uno de estos cambios fue la abundancia de pilastras en las construcciones. En el transcurso de ese siglo, como consecuencia de terremotos, especialmente el de 1717 y el de San Casimiro de 1751, la actividad constructiva fue muy grande. Los principales arquitectos de la época fueron: Diego de Porres, José Manuel Ramírez, José Bernardo Ramírez y Luis Díez Navarro.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> MUÑOZ LUJÁN, Luis. *Breve panorama de la arquitectura religiosa guatemalteca durante el período colonial*. p. 78.

<sup>3</sup> MARKMAN, Sidney David. *Colonial architecture of Antigua Guatemala*. p. 53.

La época llamada “barroca” floreció durante los siglos XVII y XVIII y en este período el diseño de las edificaciones continuaba su tendencia masiva, con muros gruesos y torres bajas.

Luego de los eventos sísmicos, los constructores buscaron emplear cubos para las torres-campanarios, los cuales tenían la función de rigidizar la fachada.

Otra característica de este período fue la continuidad de los artesonados para los techos. El período colonial se culminó en La Antigua Guatemala, por la catástrofe de 1773, cuando un terremoto devastó gran parte de lo que hoy es un patrimonio cultural; la capital se trasladó al Valle de La Ermita de la Asunción y las construcciones son como se muestran aún en la ciudad capital de Guatemala.

Después de la Independencia (1821, año en el cual para varios historiadores la época colonial finalizó), la ciudad ya presentó métodos de construcción definidos y característicos, sobre todo durante los siglos XIX y principios del siglo XX. Actualmente se conservan muchos monumentos de la época colonial que han sido puestos a prueba con los intermitentes terremotos. Estas estructuras forman parte de un patrimonio cultural que merece ser cuidado, analizado y restaurado.

## **1.2. Materiales de construcción utilizados en la época colonial**

Para la construcción de las edificaciones coloniales se utilizaron materiales de la época y propios del lugar, se hacían distintos arreglos de material para dar forma a los elementos estructurales de los edificios y se trató de implementar técnicas que mejoraban la estabilidad estructural. A continuación, se describen los materiales de construcción utilizados.

### 1.2.1. Rocas

La roca natural es el componente más común para la mampostería de los edificios históricos, y constituye además un material estructural por sí solo para la construcción de elementos monolíticos, o formados por bloques o sillares sobrepuestos. El tipo de roca que se escogió para los edificios se basó en dos propiedades diferentes: durabilidad y facilidad de ser trabajada para darle la forma deseada. Las estructuras hechas de este material poseen paredes, fachadas, contrafuertes, pilastras o una combinación de ellas.

La durabilidad ha sido más importante que la resistencia; aunque las dos propiedades van de la mano y están relacionadas con la densidad del material, la resistencia no fue generalmente un factor crítico a considerar. La resistencia a compresión de las rocas en la construcción varía entre 100 y 1 000 kg/cm<sup>2</sup>. Sólo las tobas, derivadas de depósitos de material volcánico, llegan a tener resistencias inferiores. Algunos valores de resistencias de rocas se encuentran en la tabla I, estos corresponden a propiedades obtenidas en probetas cúbicas o cilíndricas, con relación de altura a base de entre uno y dos.

Tabla I. Resistencia mínima a compresión de ciertas rocas

Tabla 2.1. Resistencia mínima a compresión de ciertas rocas (según Norma DIN 1053)		
Grupo	Tipo de rocas	Resist. mín. a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
A	Caliza, travertino, tobas volcánicas	200
B	Areniscas blandas y calizas arcillosas	300
C	Calizas compactas, dolomitas, mármol, basalto	500
D	Areniscas cuarzosas (con cemento silíceo)	800
E	Granito, sienita, diorita, pórfido, diabasa, basalto (rocas ígneas en general)	1200

Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 22.

Cuando se somete una probeta de roca a una carga creciente de compresión en una máquina de ensayo, se registra un acortamiento progresivo. Junto con el acortamiento longitudinal, va una expansión transversal por el efecto de Poisson. Por la baja resistencia a la tensión de estos materiales, desde niveles relativamente bajos de esfuerzo de compresión, se comienza a presentar un micro agrietamiento transversal que se propaga a medida que aumentan los esfuerzos, hasta producir la separación de una serie de pequeñas columnas individuales, cuya capacidad de carga está limitada por su pandeo.

Una de las técnicas constructivas más utilizadas con la roca es el calicanto. Con esta técnica se construyen elementos estructurales con rocas de cantera y se pegan con cal, limos, arcillas o combinación de algunos. Las rocas son de forma irregular y no tienen ningún tipo de procesamiento previo, aunque siempre se trata de buscar un aspecto estético en la colocación de las mismas. Este tipo de construcciones son comunes en toda Guatemala. Se puede apreciar un ejemplo de una pared construida con técnica de calicanto en la figura 1.

Figura 1. **Calicanto entre hiladas de ladrillo**



Fuente: elaboración propia.



Para hacer más estable el apilamiento de las rocas se quebraban y retiraban trozos pequeños de las mismas para adaptarlos y acuñarlos entre los espacios grandes, a estos trozos se les denominaban "ripios", y a la operación se le denominaba "enripiado". Para ayudar a nivelar y confinar la construcción de calicanto se colocaban "rafas" o hiladas horizontales de ladrillo, generalmente a cada metro o metro y medio.

### **1.2.2. Tierra**

La tierra es el término más general para definir a las distintas configuraciones y arreglos de la misma, fue un material fácilmente accesible, moldeable y utilizado para algunas edificaciones grandes, pero se observa mayoritariamente en las casas y conventos de la época. La tierra generalmente se selecciona de manera que predomine la arcilla, cuidando que no tenga materia orgánica, rocas ni demasiada cantidad de arena a fin de que no sea disgregable.

Las principales técnicas conocidas para la utilización de la tierra, específicamente en la época colonial, son el adobe, el bahareque y la tapia pisada (tapial), y se definen más adelante.

Las propiedades mecánicas de la tierra, apisonada o en adobe, tienen grandes variaciones según las características del suelo con que se elaboran y el cuidado en su elaboración. La adición de paja, estiércol y algún otro material orgánico aglutinante tiene el propósito de disminuir la contracción del material y aumentar su resistencia al intemperismo. La resistencia a compresión puede variar aproximadamente entre 5 y 20 kg/cm<sup>2</sup>, y la resistencia a tensión entre 0,25 y 1 kg/cm<sup>2</sup>.

Estas resistencias notablemente bajas, no suelen ser críticas para la capacidad estructural de las construcciones, tanto como lo son el problema de la degradación del material y la dificultad de conectar las paredes de estos materiales entre sí y con los techos. En la figura 2 se muestra un ejemplo del uso de la tierra con técnica de adobe utilizada para construir un muro en una casa de la época colonial.

Figura 2. **Paredes construidas con adobe en una casa colonial en La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

### 1.2.3. Morteros

En la construcción con adobes o rocas, surgió la necesidad de un material de consistencia plástica que se utilizó para rellenar los huecos que quedaban, de ese modo pudo proporcionarse adherencia y continuidad entre ellas, y así se dio paso al uso de los morteros. El mortero más elemental utilizado fue una mezcla de tierra y agua, no necesariamente arcilla (conocido por los constructores como barro), cuya principal debilidad reside en la baja resistencia a la intemperie.

El mortero de cal y arena permitió la construcción de elementos más resistentes y durables, por su mayor capacidad cementante y su durabilidad; la mampostería de las edificaciones coloniales está generalmente unida con morteros de cal y arena, y eso les confiere propiedades particulares. Los morteros de cal y arena alcanzan típicamente resistencias en compresión de entre 5 y 20 kg/cm<sup>2</sup>, un ejemplo de este mortero se puede apreciar en la figura 3.

Figura 3. **Mortero de cal y arena utilizado para la unir ladrillos, Ermita de San Jerónimo, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

La historia describe cómo los romanos, en el primer siglo, concretaron un avance significativo al agregar puzolana al mortero de cal, de este modo se producía una carbonatación sin necesidad de exposición al aire; implica un endurecimiento más rápido que la cal y un aumento de la resistencia ante la intemperie y mejora la impermeabilidad, por consiguiente, es más durable.

Estos avances facilitaron el desarrollo del primer *concreto*, con el que se construyeron grandes obras. La introducción del cemento Portland data de fines del siglo XIX y de ahí que su presencia en los edificios antiguos es común al momento de realizar reparaciones o modificaciones recientes. Es posible que algunas edificaciones coloniales en Guatemala incluyeran materiales puzolánicos, sin saber en esa época de que se trataba.

#### **1.2.4. Madera**

Es de los materiales más empleados en la época colonial, no sólo como componente estructural, sino también como decorativo; se ha empleado como columnas, como sostén principal en terrazas y también como elemento rigidizante de paredes.

Su inconveniente principal es la poca durabilidad; los incendios, el intemperismo y el ataque biológico (polilla, termitas, hongos) han causado deterioro y destrucción de los elementos de madera, por lo que pocas construcciones coloniales, que utilizaron este material, mantienen completamente su integridad.

Las propiedades que definen la calidad estructural de la madera aumentan con el peso específico de ésta, el cual varía entre 600 y 1 000 kg/m<sup>3</sup>, y es típicamente de alrededor de 800 kg/m<sup>3</sup> para las maderas pináceas.

La resistencia a tensión para la dirección de las fibras es típicamente de 100 a 120 kg/cm<sup>2</sup> mientras que la resistencia en compresión en la dirección de las fibras es menor y se encuentra en un rango de entre 80 a 100 kg/cm<sup>2</sup>. Algunas propiedades de maderas utilizadas en Guatemala se observan en la tabla II:

Tabla II. **Esfuerzos básicos para maderas guatemaltecas**

**ESFUERZOS BASICOS PARA MADERAS GUATEMALTECAS  
APLICABLES A MADERA VERDE O POCO SAZONADA Y MADERA SECA AL AIRE (a) (b) (c)\***

Especie	Peso seco aparente	Flexión Estática	Módulo de Elasticidad	Compresión paralela	Compresión perpendicular	Tensión paralela	Tensión perpendicular	Corte paralelo	Clivaje	Dureza	Extracción de clavos
	gr./cm.3	Kg./cm.²	Kg./cm.²x10⁻⁵	Kg./cm.²	Kg./cm.²	Kg./cm.²	Kg./cm.²	Kg./cm.²	Kg./cm.²	Kg.	Kg.
Ciprés	0.51	160	0.75	70	23	160	7	7	8	225	19
Pino coloreado (occarpa)	0.57	200	1.19	90	23			20		85	
Pino Petén (caribee)	0.67	215	1.20	90	21			22		100	10
Otros pinos	0.37	115	0.66	55	13			16		40	
Caoba	0.48	160	0.76	70	45	125	7	10	16	265	30
Canoj	0.65	130	1.00	70	20	100	10	10	19	200	
Cedro	0.43	95	0.46	40	35	80	10	7	16	180	19
Cenicero	0.61	130	0.72	65	45	100	10	10	11	350	30
Conacaste	0.42	95	0.56	35	20	90	10	7	9	195	9
Chichique	0.72	245	1.38	120	60	235	7	9	12	450	
Chichipate	0.72	210	1.20	105	55	160	10	15	25	730	53
Marillo	0.62	100	0.85	60	45	145	16	12	20	360	40
Volador	0.65	165	1.05	75	35	155	10	11	24	430	50

Fuente: GODINEZ MANSILLA, William. *Ingeniería de la madera en Guatemala*. p. 122.

En la figura 4 se puede apreciar el uso de la madera en techos, puerta y muros en un edificio de la época colonial.

Figura 4. **Diferentes usos de la madera, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

### **1.2.5. Ladrillo**

El uso de materiales cerámicos en la construcción es en América una tradición que se asentó con la llegada de los europeos a finales del siglo XV. En el caso de Guatemala, fue a partir de la llegada de los españoles, en la primera mitad del siglo XVI, cuando se inició el uso de materiales cerámicos en la construcción de edificios, además, con tipologías novedosas, ejemplos de ellas son las cubiertas formadas por tejas curvas.

Es necesario pensar que la producción de la cerámica estructural no tiene vínculo directo con la producción de cerámica para vasijas y similares, aunque el material sea el mismo, ni la forma de producirlo, ni los medios necesarios para ello, ni el final son idénticos. Esto quiere decir que, a la hora de buscar las fuentes históricas, la presencia de alfareros no implica la presencia de ladrilleros y tejeros.

El ladrillo es un material de construcción en forma de paralelepípedo, de planta rectangular que sirve para la construcción de muros, soportes verticales, dinteles, arcos y demás estructuras similares. Su componente principal son las arcillas. Los minerales arcillosos que tienen importancia en la elaboración de materiales para la construcción son tres: caolinita, montmorillonita e illita, todos con estructura hojosa; no se encuentran puros, sino mezclados, aunque predomine un material determinado.

Según el proceso de cocción y el tipo de componentes, los materiales de arcillas se clasifican en: ladrillos, refractarios, gres porcelanas y azulejos, así que para el caso de los ladrillos son materiales de arcilla cocida, empleados en la construcción y para revestimientos decorativos.

“Los ladrillos tienen un costo bastante bajo, resisten la humedad y el calor. Su color varía dependiendo de las arcillas empleadas en la mezcla y por el contenido de ciertos minerales compuestos de hierro o formas, depende el uso al que será destinado”.<sup>4</sup>

El ladrillo resulta de una cocción a una temperatura cercana a los 1 000 °C, con lo cual se logra una mejor estabilidad dimensional y, sobre todo, mayor resistencia al intemperismo. Los ladrillos propiciaron la construcción no sólo de paredes, sino también de arcos y bóvedas; nuevamente, las propiedades del ladrillo cocido varían fuertemente según el tipo de suelo que se emplea, el procedimiento de elaboración y la temperatura de cocción. En las piezas de producción artesanal empleadas en los edificios históricos, pueden encontrarse resistencias a la compresión desde 20 hasta 150 kg/cm<sup>2</sup>. En la figura 5 se aprecian distintos elementos estructurales construidos con ladrillo.

Figura 5. **Diferentes elementos estructurales construidos con ladrillo, San José Catedral, La Antigua Guatemala, 2018**



Fuente: elaboración propia.

---

<sup>4</sup> MENDOZA, Nestor. *Elaboración de ladrillos de barro cocido estabilizados con arena cuarzo-feldespática*. p.31.

### **1.3. Metodología constructiva de la época colonial**

Por metodología constructiva entendemos el conjunto de técnicas de construcción y elementos estructurales que permiten la planificación y ejecución de infraestructura, en este caso, de las edificaciones coloniales.

#### **1.3.1. Aspectos generales**

Las edificaciones coloniales envuelven una metodología constructiva caracterizada por la implementación de cimentaciones, columnas, muros y otros elementos estructurales atendiendo al tipo de edificación (vivienda, templo, monasterio, claustro, obra hidráulica, edificios administrativos y más).

Los materiales utilizados en la construcción de las edificaciones coloniales fueron meramente locales, y la mano de obra mayoritariamente local, así los constructores de la época debieron instruir a la mano de obra para realizar los trabajos de construcción de la época.

El diseño de los elementos no era un área muy explorada por los constructores, aunque se sabe que los españoles eran inherentemente constructores y sumamente buenos, sobre todo cuando se trataba de edificios monumentales. Para 1550 los colonizadores habían adoptado para los muros de edificios eclesiásticos una forma de construcción que se ha conservado durante los siguientes cuatro siglos. Los primeros constructores de La Antigua Guatemala tomaban muy en cuenta la amenaza de los terremotos para las edificaciones, hubo al menos cinco entre 1565 y uno de gran magnitud en 1586; tomar en cuenta la amenaza significaba analizar la estructuración de la edificación, los elementos estructurales y el método constructivo, con el objeto de tener cada vez una menor vulnerabilidad.



Es importante hacer una descripción general de los elementos estructurales y de la metodología constructiva: la cimentación de las edificaciones coloniales tenía la finalidad de distribuir cargas hacia el suelo. Los cimientos se elaboraban usualmente de mampostería de rocas tomando en cuenta sus bondades en cuando a su resistencia mecánica y física, para las viviendas también se empleaba mampostería de rocas, aunque, dependiendo de las condiciones de sitio y uso de la vivienda, también se empleó el ladrillo. Los muros, hechos de diferentes combinaciones de mampostería, se comportaban como muros de carga.

Debido a su volumen, los muros eran buenos para resistir esfuerzos de compresión, pero no eran capaces de resistir del todo los esfuerzos de flexión y tensión, puesto que no tenían refuerzo a flexión longitudinal y esto se evidencia en la forma de la falla de algunos de ellos.

Elementos como las columnas se diseñaban de tal forma que pudieran soportar las cargas de entepiso y proveer grandes luces, esto se evidencia en las edificaciones coloniales existentes en las cuales la separación entre columnas es grande.

En los dinteles de los vanos para puertas y ventanas se generan concentraciones de esfuerzos debido a la discontinuidad del muro de carga, para sufragar el impacto de esos esfuerzos en algunos casos se utilizaron vigas de madera, éstas, por sus propiedades mecánicas, resistían de manera satisfactoria la concentración de esfuerzos. En las casas de la época colonial se utilizaron otros materiales, en las construcciones hechas con adobe o mampostería similar se utilizaron vigas de madera incrustadas en el muro para cubrir los dinteles de puertas y ventanas, pero también se puede apreciar en otras viviendas el uso de arcos de roca o ladrillo.

En las demás edificaciones también se utilizó mampostería, y como no tenía refuerzo a flexión, la mampostería se colocó de tal forma que tuviera esa resistencia, entonces se extendió el uso del arco, como elemento estructural. En relación a las cubiertas o sistemas de piso y techo, se construían utilizando principios muchas veces geométricos, tomando en cuenta siempre la resistencia del material o la disposición de los mismos.

En un principio, las cubiertas fueron construidas usando armaduras simples de madera y teja de arcilla cocida, estas armaduras resistían esfuerzos de compresión, tensión y flexión; la madera cumplía de manera satisfactoria las solicitaciones, el problema de la madera era su durabilidad, así que luego pasaron a construir cubiertas más elaboradas, combinando, por ejemplo, arcos, bóvedas, o cúpulas.

### **1.3.2. Técnicas de construcción con tierra**

La construcción de tierra en Guatemala, y en general, en América Latina, data de épocas muy lejanas, incluso prehispánicas, existiendo hasta ahora vestigios arqueológicos muy importantes. Con la conquista del territorio por parte de los españoles, se incorpora a la técnica constructiva del viejo mundo, el uso del adobe y tierra sin cocer en edificios con las características propias de la cultura occidental.

#### **1.3.2.1. Adobe**

El adobe es la mezcla de tierra (arcilla y arena) y paja moldeada en cajones de madera, los cuales eran secados al sol después de haberles retirado del molde. Es probable que este sea el sistema más popular en Guatemala y en especial en La Antigua Guatemala y sus alrededores.

La elaboración más conocida de estos ladrillos de tierra cruda consiste en rellenar un molde de madera con arcilla, luego se desmolda y se deja secar durante cierto tiempo que varía de cuatro semanas a dos meses, según las condiciones atmosféricas.

“En cuanto a las dimensiones utilizadas, se han encontrado en La Antigua Guatemala piezas de 0,10 x 0,30 x 0,6 metros y de 0,10 x 0,20 x 0,40 metros. Su uso más frecuente es del levantado de paredes de 2,5 a 3 metros de altura y se han dado casos de construcciones de dos niveles”.<sup>5</sup>

“Generalmente se puede afirmar que los adobes deben tener suficiente arena gruesa y alta resistencia a la compresión junto con un mínimo de retracción. Pero a la vez deben contener suficiente arcilla para tener una buena cohesión que permita la manipulación de los adobes”.<sup>6</sup>

Al momento de construir con adobes, la separación de los mismos era a través de una sisa o juntas que estaban formadas por una mezcla de tierra y paja (mortero).

Se debe tener en cuenta que las características fundamentales del comportamiento inelástico del adobe son totalmente diferentes de las de los materiales dúctiles de construcción, ya que el adobe es un material frágil. La figura 6 muestra una pared construida con la técnica de construcción de adobe.

---

<sup>5</sup> CEBALLOS, Mario. *La restauración de adobe en los edificios coloniales de Antigua Guatemala*. p. 24.

<sup>6</sup> MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. p. 76.

Figura 6. **Pared construida con adobe, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

#### **1.3.2.2. Tapial**

El tapial es una mezcla de arcilla y arena, su construcción era por bloques grandes a través de encofrados y capas del material, es decir, el tapial se mezclaba y aplicaba en el sitio de la obra, los moldes o encofrados eran de madera y se colocaban en cada sección de muro construido.

El tapial fue utilizado principalmente para muros exteriores de separación entre linderos, incluso actualmente sigue siendo utilizado para construir paredes de colindancia. En algunos lugares también se utilizó el tapial como relleno constructivo en muros de roca combinada con ladrillos, donde algunas veces la estructura principal es una arquería y los muros de los rellenos son los tapiales. En la figura 7 se muestra un muro construido con técnica de tapial.

La mezcla se compone de una arcilla húmeda la cual es mezclada con paja y crines de caballo (pelo que nace sobre la cabeza y cuello del animal), con la finalidad de reducir la fisuración en la estructura. Para compactar dicha mezcla se utilizaba algo denominado “pisón” (una especie de los apisonadores artesanales hechos de madera que se encuentran en la actualidad).

Figura 7. **Muro construido con tapial, Carretera a San Bartolomé  
Becerra, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

En los alrededores de La Antigua Guatemala casi todas las fincas y propiedades principales estuvieron cercadas por muros de tapial que algunas veces tienen 0,8 metros de ancho por 2 metros de alto y con una cubierta triangular en la parte superior para protegerse del agua y que se le da el nombre de “albardón”.<sup>7</sup>

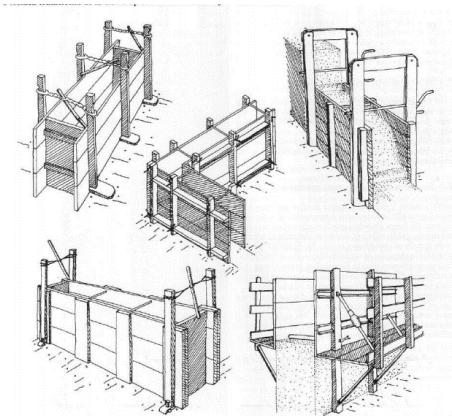
La mezcla se compone de una arcilla húmeda la cual es mezclada con paja y crines de caballo (pelo que nace sobre la cabeza y cuello del animal), con la finalidad de reducir la fisuración en la estructura. Para compactar dicha mezcla se utilizaba algo denominado “pisón” (una especie de los apisonadores artesanales hechos de madera que se encuentran en la actualidad).

---

<sup>7</sup> CEBALLOS, Mario. *La restauración de adobe en los edificios coloniales de Antigua Guatemala*. p. 24.

La compactación se realizaba en capas de 10 a 15 cm de espesor, luego de este proceso se deslizaba el encofrado hacia la sección adyacente y luego de desencofrar se ponía al sol a secar. Después, los vanos de puertas y ventanas se abrían con cincel cuando el muro ya había secado. Un ejemplo del encofrado se observa en la figura 8.

Figura 8. **Forma de encofrado del tapial**



Fuente: MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. p. 60.

### 1.3.2.3. Bahareque

El bahareque es el tipo de estructura compuesta de elementos verticales y horizontales de madera, caña, bambú o ramas de árboles arreglados en una configuración tipo canasta para luego ser rellena con una mezcla de arcilla, paja y roca. La estructura del bahareque se compone básicamente de:

- Horcones y travesaños: los horcones hacen las veces de las columnas, tradicionalmente son troncos de árboles, caña o bambú los cuales, en uno de sus extremos, forman una horqueta (una forma de “Y”), y los travesaños son piezas de madera, caña o bambú, y hacen las veces de viga.

- Estructura de refuerzo: tradicionalmente es de caña.
- Material de relleno: consiste en una mezcla de arcilla, paja y roca, aunque también se puede encontrar pino seco, residuos de madera (viruta), dependiendo de cada región.

La figura 9 muestra un ejemplo de la técnica de construcción mencionada.

Figura 9. **Casa construida con técnica de bahareque, municipio de Olopa, Chiquimula, Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

### **1.3.3. Elementos constructivos de la época colonial**

En la gran variedad de tipos de edificaciones coloniales y soluciones estructurales que se emplearon se identifican algunos elementos que cumplen funciones estructurales básicas y que aparecen, con distintas variantes, en la mayoría de las edificaciones.

De manera generalizada puede decirse que, para cada elemento estructural, el método constructivo podía variar dependiendo de factores como el material de construcción y los arreglos de los mismos.

Algunos elementos estructurales no fueron construidos con materiales debido a la carencia de ciertas propiedades mecánicas, que, aunque no se habían explorado ampliamente, la intuición educada de los constructores incidió en el método adecuado para construir cada elemento y edificación colonial. La roca, el ladrillo, el mortero, las técnicas con tierra, la madera y otros materiales cerámicos o de origen natural fueron los materiales constitutivos del método constructivo de la época colonial.

### **1.3.3.1. Cimentaciones**

Actualmente en el diseño de una cimentación se toman en cuenta factores como el tipo de suelo, la capacidad resistente del mismo, el material, las dimensiones, profundidad y tipo de cimentación. En el inicio de la época colonial el diseño de cimentaciones fue sin considerar tanto la profundidad o la heterogeneidad del suelo. La profundidad máxima de la cimentación era de 0,8 m, pero a partir del siglo XVII ya se dio importancia al suelo y se utilizaban distintas profundidades de cimentación en un mismo edificio.

El cimientado corrido fue un tipo de cimentación ampliamente utilizado en la época colonial. El material de construcción era, generalmente, mampostería de rocas unida por mezcla de arcilla o cal y arena, ladrillo o calicanto.

El adobe no se utilizó en las cimentaciones puesto que no tiene resistencia ante la humedad. Las zanjas de cimentaciones se rellenaban luego con terrón (pedazos de roca volcánica) o ripio (que era de ladrillo y roca de edificios demolidos), unido con arena y a veces algo de cal. El ancho de la zanja de cimentación debería tener una profundidad de  $\frac{1}{3}$  del ancho del edificio en templos y de  $\frac{1}{4}$  del ancho para casas de habitación.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> MARKMAN, Sidney David. *Colonial architecture of Antigua Guatemala*. p. 34.

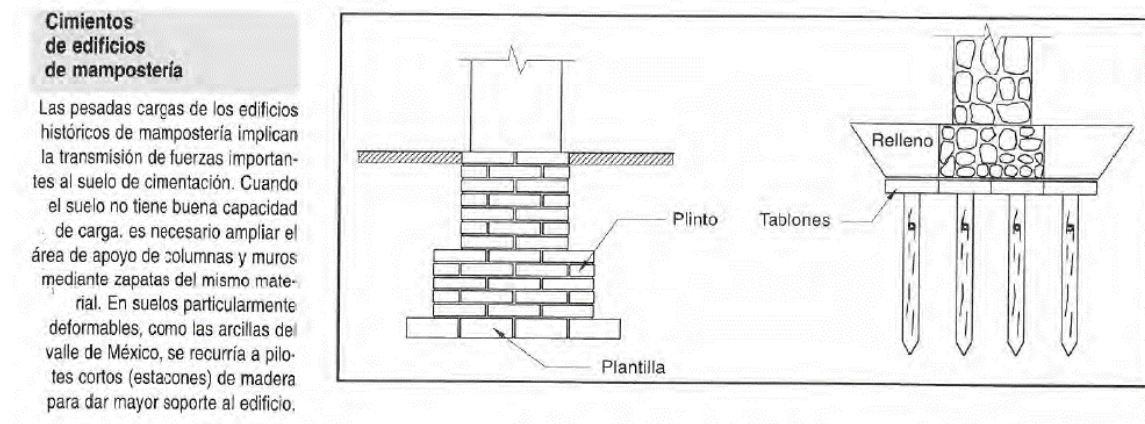


La heterogeneidad en el valor soporte del suelo era algo que se buscaba al momento de construir la cimentación, no existían ensayos de valor soporte, pero por inspección visual y la experiencia de los constructores se determinaba el tipo de suelo y sus características mecánicas.

El dimensionamiento del cimiento varió de una época a otra, en un inicio eran demasiado anchos, pero a partir del siglo XVIII los constructores detectaron que el factor más importante para una buena cimentación era tener un suelo de alta resistencia, pero cuando no era posible, aplicaban los criterios antes mencionados para asegurar que el cimiento pudiese transmitir los esfuerzos de la edificación al suelo.

En la figura 10 se puede visualizar un diagrama transversal de un cimiento y diferentes formas en que era construido.

Figura 10. **Sección transversal de cimientos históricos**



Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p.70.

### **1.3.3.2. Muros y contrafuertes**

Los muros son elementos claves para soportar las cargas dinámicas y estáticas que se producen en la estructura y también absorben empujes laterales. Pueden ser contruidos de distintos materiales, pero en la época colonial la mampostería dominó como sistema de construcción de muros. La mampostería resulta de la combinación de rocas, ladrillos o adobes con mortero cuya función es la de llenar los huecos entre las rocas o bloques, propiciar una mejor y más uniforme transmisión de cargas en el elemento estructural y la maleabilidad en la forma, entre otras.

Existe una gran variedad de modalidades de mampostería encontradas en las edificaciones, y resulta laboriosa la caracterización si se toma en cuenta que no sólo en la época colonial se utilizó la mampostería, se puede, sin embargo, mencionar dos grandes grupos: la mampostería organizada, o con aparejo, y la mampostería irregular, en que las rocas se colocan sin labrar o casi, distribuidas en forma irregular en una matriz de mortero.

Es difícil proponer valores típicos de las propiedades mecánicas; los resultados experimentales son escasos puesto que es difícil reproducir en laboratorio las condiciones específicas de la obra, y por la gran variedad de situaciones que pueden presentarse.

Únicamente la mampostería de ladrillo ofrece un resultado bastante acertado cuando se imita en laboratorio y existe abundante información acerca de la misma. La resistencia en compresión suele variar entre 5 y 50 kg/cm<sup>2</sup>. La resistencia en tensión de la mampostería es baja y depende mucho de la adherencia entre el mortero y las rocas.

Para fines de cálculo es normalmente recomendable considerarla igual a cero, aunque puede alcanzar valores de entre 1 y 2 kg/cm<sup>2</sup>. En la tabla III se pueden apreciar algunas propiedades mecánicas de elementos de mampostería de edificaciones históricas.

Tabla III. **Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería**

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de algunos tipos de mampostería de edificios históricos.				
Material	Peso Volumétrico t/m <sup>3</sup>	Resistencia a compresión	Resistencia a cortante	Módulo de elasticidad
Adobe	1.8	2-5	0.5	3 000
Bloques de tepetate con mortero de cal	1.8	5-10	0.5	5 000
Ladrillo con mortero de lodo	1.6	5-10	1.0	5 000
Ladrillo con mortero de cal	1.6	15-20	2.0	10 000
Mampostería de piedra irregular con mortero de cal	2.0	10-15	0.5	5 000
Mampostería de piedra de buena calidad	2.0	30	2.0	20 000
Resistencias y módulos, en kg/cm <sup>2</sup> Las propiedades indicadas representan valores conservadores entre los encontrados en la literatura.				

Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p.31.

La resistencia de un muro a esfuerzos cortantes estará determinada por los esfuerzos de tensión en forma diagonal (cuando un muro falla por corte generalmente se vislumbra una grieta diagonal en él), los valores alcanzados son bajos, pero no pueden ser descartados.

En la figura 11 se puede apreciar una falla por corte en un muro construido con adobe.

Figura 11. **Falla cortante y desprendimiento del recubrimiento de un muro, Convento de Santa Teresa, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Los muros generalmente soportaban toda la carga transmitida por las cubiertas, éstas eran generalmente de dos tipos: artesonado en madera y teja y de mampostería en forma de bóveda o cúpula; en ambos casos las cargas que se transmitían eran grandes.

La resistencia de un muro a fuerzas de corte es también regida por esfuerzos de tensión, esta vez en dirección diagonal; por lo mismo, los valores que se alcanzan son bajos, pero no se pueden despreciar en este caso porque de ellos depende la resistencia de los muros, y de las construcciones, ante fuerzas laterales como las inducidas por los sismos. La mampostería tiene un comportamiento esencialmente frágil puesto que el material falla de manera brusca al alcanzarse su capacidad de carga.

El carácter frágil se acentúa para las mamposterías de mayor resistencia por lo cual, tales estructuras están expuestas a la posibilidad de colapsos súbitos con pocas señales de daño previo.

Era común que los materiales de construcción con los cuales se hacían los muros presentaran un aspecto regular a lo largo de la fachada, pero en el interior fueran de tipo ciclópeo (como se puede apreciar en la figura 12), así la mampostería exterior hacía las funciones de cimbra. Combinaciones así son difíciles de determinar por simple inspección, se requieren de métodos de sondeo o exploración por excavación para determinar una composición real.

Figura 12. **Mampostería ciclópea en un muro del Convento Santa Clara, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Como dato para cálculo de deformaciones de las estructuras de mampostería, así como para el análisis estructural, es importante conocer el módulo de elasticidad del material, que varía en intervalos sumamente amplios. Se han obtenido valores desde 5 000 kg/cm<sup>2</sup> para la mampostería irregular con altos contenidos de mortero, hasta de 200 000 kg/cm<sup>2</sup> en mampostería de bloques de roca de buena calidad con juntas de mortero delgadas.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 32

Los muros están sometidos a empujes laterales y éstos inducen esfuerzos flexivos, pero en las edificaciones coloniales, debido a la masa de los elementos, la carga vertical es muy grande en comparación con las fuerzas laterales y esto hace que la edificación trabaje en todo momento a compresión, al soportar los esfuerzos laterales y verticales, soportan también esfuerzos de corte, y estos esfuerzos son absorbidos por medio de la fricción interna de los materiales y la fricción entre las grandes superficies de las juntas de los muros. Los muros de las edificaciones coloniales, construidos en mampostería, deben su resistencia y estabilidad a la fricción y al peso propio de sus elementos.

Con el tiempo, se quiso reducir el tamaño de los muros tomando en cuenta el manejo de los empujes laterales y de las cargas verticales. Para soportar estas cargas y reducir el espesor de muro se utilizaron los denominados arcos de descarga. Éstos consistían en una serie de arcos y columnas de mampostería que trabajaban a compresión y absorbían toda la carga proveniente de la cubierta. De alguna manera el sistema estructural se parecía al actual de marcos rígidos puesto que los muros quedaban como tabiques entre los arcos de descarga. Así las columnas y arcos soportaban las bóvedas.<sup>10</sup>

El sistema de construcción de los muros seguía un patrón en muchos de los lugares y ambientes, generalmente eran muros gruesos y se pueden observar desde grosores de menos de un metro hasta más de dos metros. En los muros también se colocaban capas de un solo material y eran separadas por hileras, también llamadas rafas, generalmente de ladrillo, y permitían nivelar y confinar mejor el muro (ver figura 13).

El sistema de construcción de los muros seguía un patrón en muchos de los lugares y ambientes, generalmente eran muros gruesos y se pueden observar desde grosores de menos de un metro hasta más de dos metros.

---

<sup>10</sup> WEVER, Edgar. *Edificaciones de la época colonial en Guatemala - análisis y restauración*. p. 34.

Figura 13. **Rafas (hileras de ladrillo) en un muro, San José Catedral, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

### **1.3.3.3. Columnas**

Las columnas eran construidas de manera masiva para darle soporte a la estructura. Son elementos básicos para el soporte estructural de la edificación y transmiten el peso del mismo a los pisos inferiores hasta llegar a la cimentación. Tenían dimensiones y formas geométricas distintas en una misma edificación; la sección era generalmente cuadrada, rectangular o circular, variando en su altura y acabados.

El ladrillo es probablemente el material predominante, en la época se fabricaron piezas de ladrillo cóncavas para que al colocarlas la columna circular tuviera una forma más definida. El ladrillo fue uno de los materiales de construcción más versátiles para la construcción de elementos estructurales.

Ejemplos de la inclusión del ladrillo en la construcción de columnas se puede observar en la figura 14.

Figura 14. **Materiales de construcción para columnas, San José Catedral, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

En el caso de columnas que hacían función de contrafuerte y otras que se incrustaban en los muros (que se denominaban pilastras), se utilizó la roca como material de construcción. La separación entre columnas dentro de las paredes era variable, pero se recomendaba que fueran colocadas a un máximo del ancho de la edificación para asegurar cierto grado de simetría y estabilidad, y que su ancho fuera de un sexto del mismo ancho de la edificación. La capacidad de carga de una columna está determinada a partir de la resistencia del material del que está hecha y al mismo tiempo se ve afectada por distintos factores que reducen significativamente la resistencia respecto del material y la forma de la columna.



Entre los distintos factores incidentes en la capacidad de carga de una columna se encuentran la distribución del material, el tipo de material (algunas columnas eran monolíticas, por ejemplo, las columnas de madera), la uniformidad y simetría del área de carga que tributa a dicha columna (excentricidades).

A diferencia de otros elementos estructurales, las columnas muestran signos graves de daño cuando están cerca del colapso. El primer signo de que la columna está por colapsar se puede apreciar cuando se observan grietas verticales.

#### **1.3.3.4. Arcos**

Encontrar una solución para el apoyo de pisos y techos fue difícil. Resultó natural recurrir a la madera, aprovechando su capacidad para resistir esfuerzos de tensión. Para edificaciones importantes se buscaron soluciones más duraderas y más imponentes mediante el uso de mampostería.

Las vigas y losas de cantera sólo permitieron cubrir luces muy cortas, por su baja resistencia a tensión y su alto peso. La solución fue evolucionando hacia la colocación de losas en “V” invertida, y después hacia el arco acartelado o falso, en que las rocas se van proyectando cada vez más hacia el interior de la luz, en cada hilada, trabajando en voladizo hasta que es colocada la roca labrada de cierre.

Un avance significativo se logró cuando se ideó darle una geometría circular a la distribución de rocas, acuñándolas una contra la otra y así fue como se formó el arco circular (ver figura 15).

En el arco circular transmite las cargas hacia los apoyos mediante esfuerzos de compresión que son resistidos eficientemente por la mampostería. Por esto último, el arco es la forma más natural de cubrir luces con mampostería, lo mismo que la bóveda, la cual se definirá más adelante. El material de construcción de los arcos era generalmente rocas o ladrillo.

Figura 15. **Ejemplo de arco en la Catedral de La Antigua Guatemala**

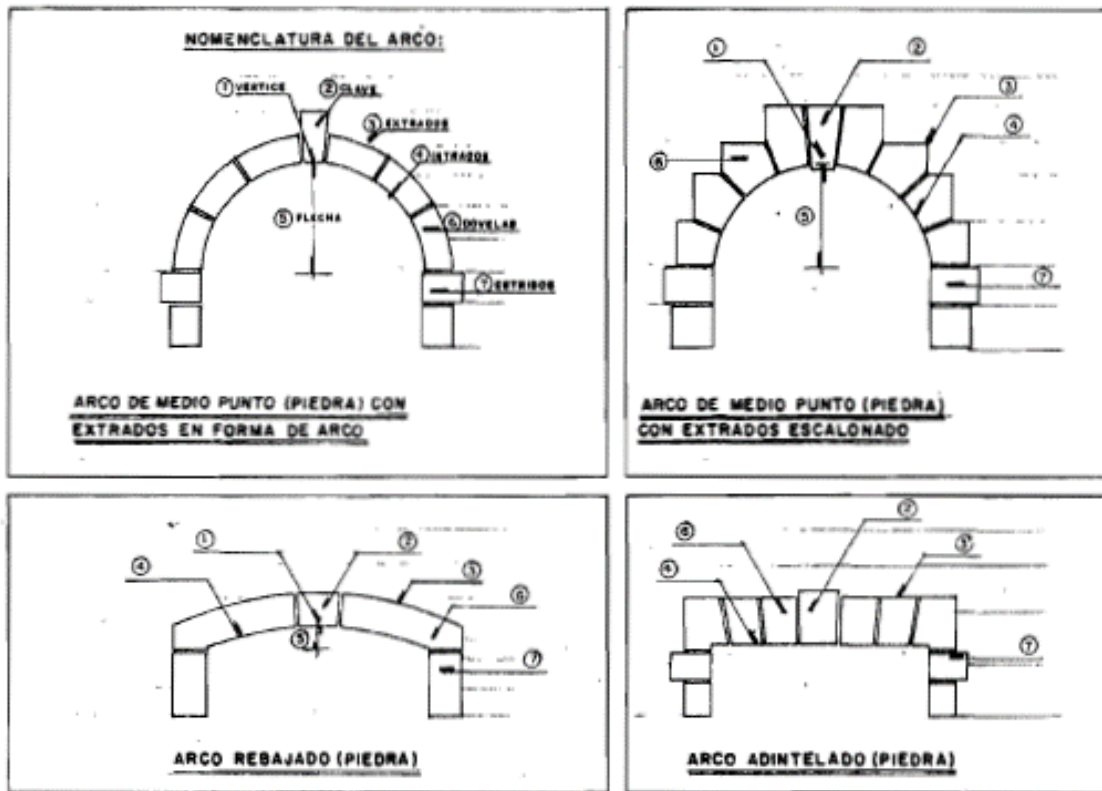


Fuente: elaboración propia.

El arco es el elemento de la metodología constructiva más significativo de las edificaciones coloniales, no sólo por su aplicación e innovación sino también por la estabilidad que les brindaba a las edificaciones; muchas de las edificaciones coloniales están básicamente diseñadas y construidas a base de arcos.

Las funciones de los arcos variaban dependiendo su posición en la edificación, soportando entresijos, corredores, bóvedas o vanos entre fachadas y puertas. Aunque para los vanos entre puertas fue común la utilización de vigas de madera incrustadas en el muro también se construían los dinteles con roca o ladrillo, estos materiales eran arreglados en algunas ocasiones en forma de arco o como se puede apreciar en la figura 16.

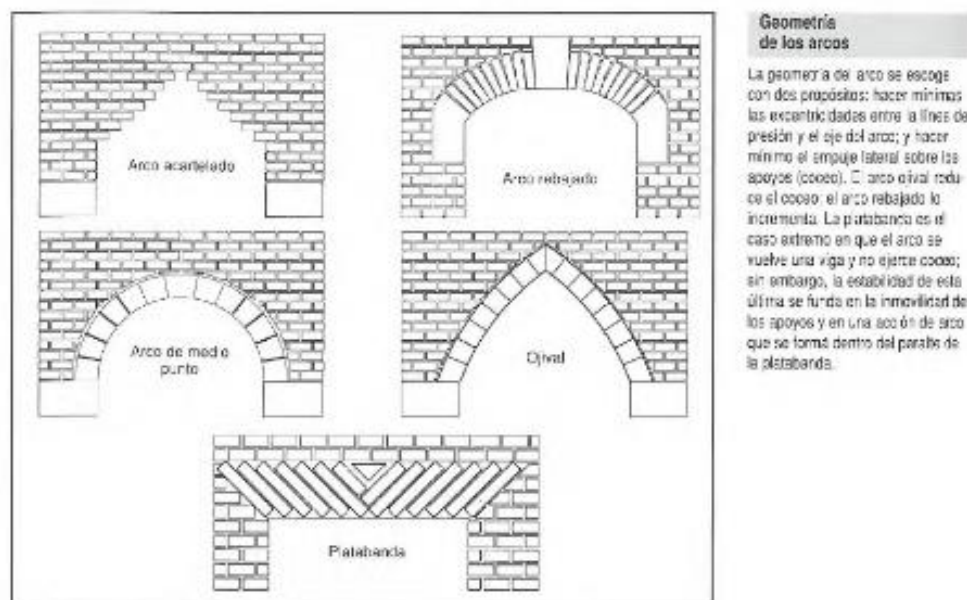
Figura 16. **Diferentes tipos de arreglos de roca labrada para dinteles**



Fuente: WEVER, Edgar Alfredo. *Edificaciones de la época colonial en Guatemala – análisis y restauración*. p. 39.

Las cargas verticales aplicadas al arco se transmiten hacia los apoyos siguiendo una trayectoria que depende en gran medida de la distribución de cargas, pero también de la geometría del arco. En la figura 17 se pueden apreciar las geometrías básicas de los arcos de la época, aunque, en Guatemala, es más común observar los arcos con geometría circular.

Figura 17. Geometría básica de los arcos



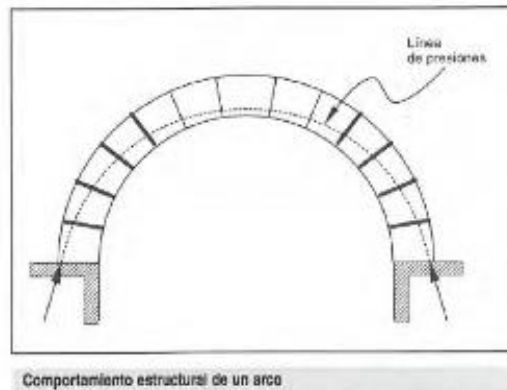
Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 55.

Los apoyos son afectados por componentes de fuerzas horizontales y esfuerzos cortantes, exceptuando el caso de los arcos acartelados en donde no se producen ese tipo de esfuerzos o fuerzas, a esto se llama coceo. El coceo es una particularidad del arco y es ese empuje horizontal que transmite a sus apoyos y tiende a voltearlos hacia afuera; es un caso crítico cuando se habla de los apoyos del arco los cuales pueden ser columnas o muros.

A la trayectoria que toman las fuerzas inducidas en un arco se le denomina línea de presiones y si ésta se separa del eje del arco, las fuerzas inducen flexión en la sección del mismo, cargas axiales y esfuerzos cortantes. La forma e inclinación de los sillares, ladrillos o dovelas que componen el arco afectará la magnitud de esfuerzos cortantes y la falla por dichos esfuerzos (ver figura 18).

Difícilmente hay casos en donde se pueda observar el fallo de arcos por efecto de sobrecargar, las fallas observables en las edificaciones coloniales son por la incidencia de una carga sísmica que se transmitió a través de toda la estructura y afecto del comportamiento de la misma.

Figura 18. **Línea de presiones en un arco de medio punto**



Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 55.

### 1.3.3.5. Cubiertas

Dentro de este grupo se puede encerrar cualquier tipo de entrepiso o techo, y los hay en diferentes tipos y contruidos de diferentes materiales. Es muy marcado el uso de materiales como roca, ladrillo, madera y mortero para la construcción de cubiertas.

En un inicio, en las edificaciones coloniales se utilizaban cubiertas de madera y paja. Luego, lo más común utilizado para los entresijos, fue el armado o artesonado de madera y teja de arcilla cocida. Existen distintos sistemas utilizados para entresijos y cubiertas.

En el caso de las bóvedas, se utilizaba un relleno de selecto para llegar a un nivel plano en losa exterior; otro método consistía en la utilización de madera que se recostaba sobre soportes denominados “ánforas” en los vértices del ambiente, con el fin de disminuir la carga muerta de la edificación.

En el caso de edificaciones grandes (como conventos, templos, catedrales), las cubiertas se construían sobre enormes arcos de ladrillo recostados sobre columnas independientes o sobre columnas incrustadas en los muros, de esta manera cubrían luces enormes dando lugar a bóvedas y linternillas de gran extensión y altura.

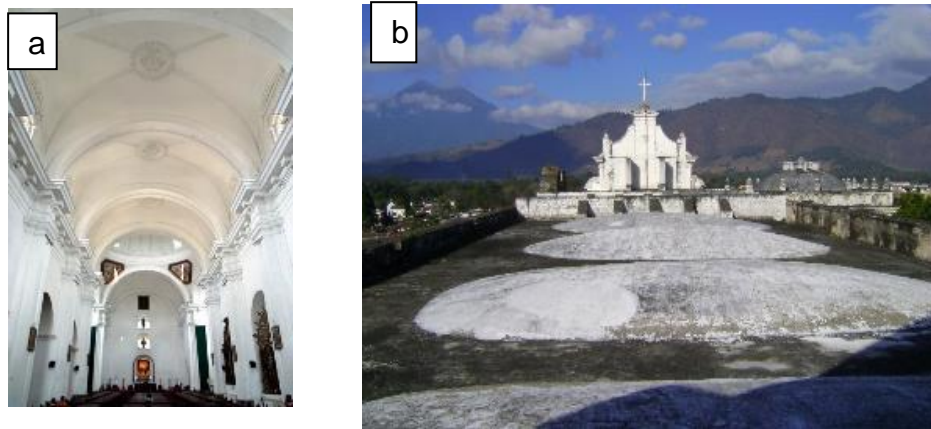
#### **1.3.3.6. Bóvedas**

Las bóvedas son techos de roca o ladrillo, combinación de ambos u otros materiales, curvados en forma de arco, de modo tal que las componentes se sostienen recíprocamente cubriendo un espacio sin apoyos intermedios.

El uso de las bóvedas se observa mejor en las grandes naves centrales de templos, catedrales (ver figura 19), conventos e incluso existen bóvedas subterráneas que se construían con el fin de soportar el peso del suelo, así se podían tener espacios bajo tierra que funcionaban como conexiones entre lugares, catacumbas, bodegas o cuartos fríos para almacenar alimentos de mejor manera.

Una bóveda es considerada como la extensión natural del arco para formar una techumbre completa, la bóveda cilíndrica o de cañón corrido representa el tipo más común y puede visualizarse como una sucesión de arcos adosados. Su comportamiento, modos de falla y análisis estructural se puede estudiar considerando una franja de bóveda de ancho unitario, es decir, un arco.

Figura 19. **a) Vista desde debajo y b) Vista superior de las bóvedas centrales del Templo de San Francisco El Grande**



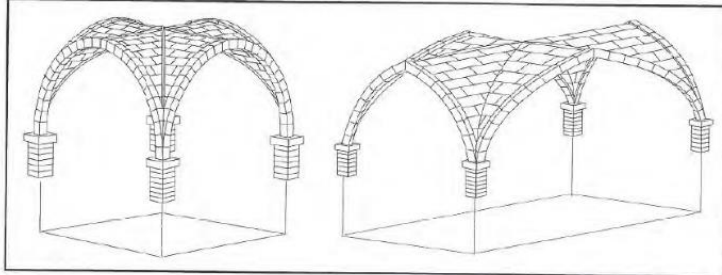
Fuente: elaboración propia.

La carga se transmite a lo largo de la línea de presiones de dicha bóveda hacia los estribos que hacen la función de apoyos con esfuerzos en varias direcciones y momentos de volteo. Las bóvedas cruzadas o intersecadas dan lugar a una cubierta con un trabajo propiamente tridimensional, cuya mayor rigidez le permite cubrir luces mucho mayores que con la bóveda simple. La bóveda cuatripartida, es el ejemplo más simple de estas estructuras de intersección (ver figura 20).

Figura 20. **Bóvedas cuatrimpartidas y sextipartidas**

**Bóvedas cuatrimpartidas y sextipartidas**

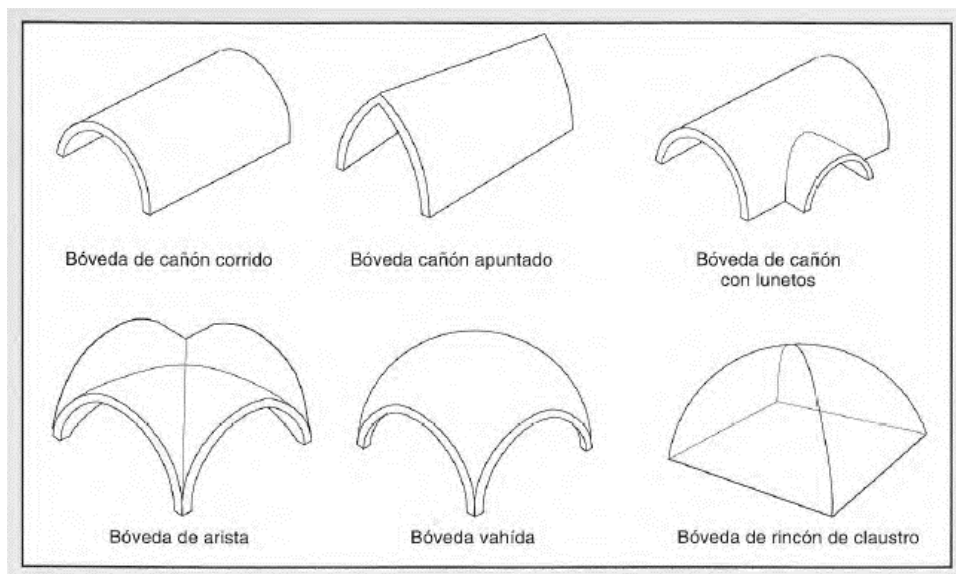
El pliegue que se produce en la intersección entre las bóvedas cilíndricas aumenta significativamente la rigidez de la cubierta permitiendo cubrir claros considerables. La bóveda cuatrimpartida es característica del estilo románico y la sextipartida, del gótico.



Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 60.

Se han empleado un gran número de variantes de la bóveda cilíndrica, las que dan lugar a formas más eficientes desde el punto de vista estructural. Varios tipos de bóvedas se pueden apreciar en la figura 21.

Figura 21. **Tipos de bóveda**



Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 59.



Las bóvedas intersecadas y las nervadas transmiten el peso del techo en un número reducido de puntos de apoyo, por lo que resulta crítica la carga vertical aplicada a los elementos de soporte, pero sobre todo la presión que se ejerce en los puntos de apoyo. Esta situación dio lugar a la introducción de los contrafuertes y de los arbotantes tan característicos en la arquitectura gótica.

### 1.3.3.7. Cúpula

La cúpula es un elemento estructural que se utiliza para cubrir un espacio de planta circular, cuadrada, poligonal o elíptica, mediante arcos de perfil semicircular, parabólico u ovoidal, rotados respecto de un punto central de simetría. En la figura 22 se puede apreciar una cúpula semiesférica con un remate de linternilla y ventanas alrededor cerca de la base.

Figura 22. **Cúpula del Templo de La Merced, La Antigua Guatemala**



Fuente: Mona Hura. *Iglesia de La Merced – Antigua Guatemala*.

<https://www.flickr.com/photos/monahura/4409422887/>.

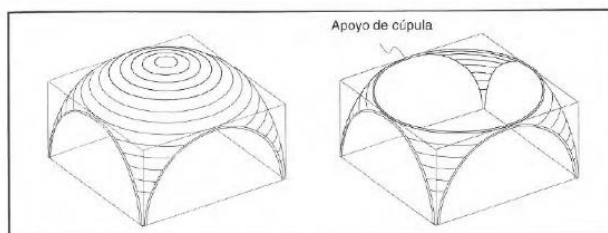
Consulta: 1 de junio de 2020.

El funcionamiento estructural de la cúpula es prototipo del de los cascarones o estructuras espaciales delgadas que transmiten las cargas, debidas sobre todo a su propio peso, en esencia por esfuerzos compresivos en dos direcciones principales. El problema de pandeo no es crítico en las cúpulas de mampostería, porque el espesor mínimo suele ser suficiente para evitar este modo de falla. Los esfuerzos radiales de compresión aumentan progresivamente de la clave hacia el arranque en una cúpula hemisférica; por ello, se ha tratado siempre de reducir el peso de la cúpula sobre todo en su parte superior.

La transmisión de carga vertical de la cúpula a sus elementos de soporte suele ser crítica ya que, por su forma no se puede dar apoyo en toda la circunferencia, por lo que se concentra el peso considerable de la cúpula en unos cuantos elementos aislados y se requieren elementos de transición como arcos y pechinas.

“Las pechinas son superficies de transición, en forma de triángulos esféricos, y permiten concentrar el peso de una cúpula, en cuatro puntos, para transmitirlo a columnas y así dar lugar a un amplio espacio abierto inferior. El área cubierta pasa de ser circular a cuadrada.”<sup>11</sup> (ver figura 23).

Figura 23. **Diagramas de pechinas**



Fuente. MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 63.

<sup>11</sup> MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 63.

Los arcos que se forman no tienen una función estructural específica, porque es la pechina, como elemento estructural integral, la que recibe y transmite la descarga de la cúpula. En la figura 24 se pueden observar las pechinas de una cúpula.

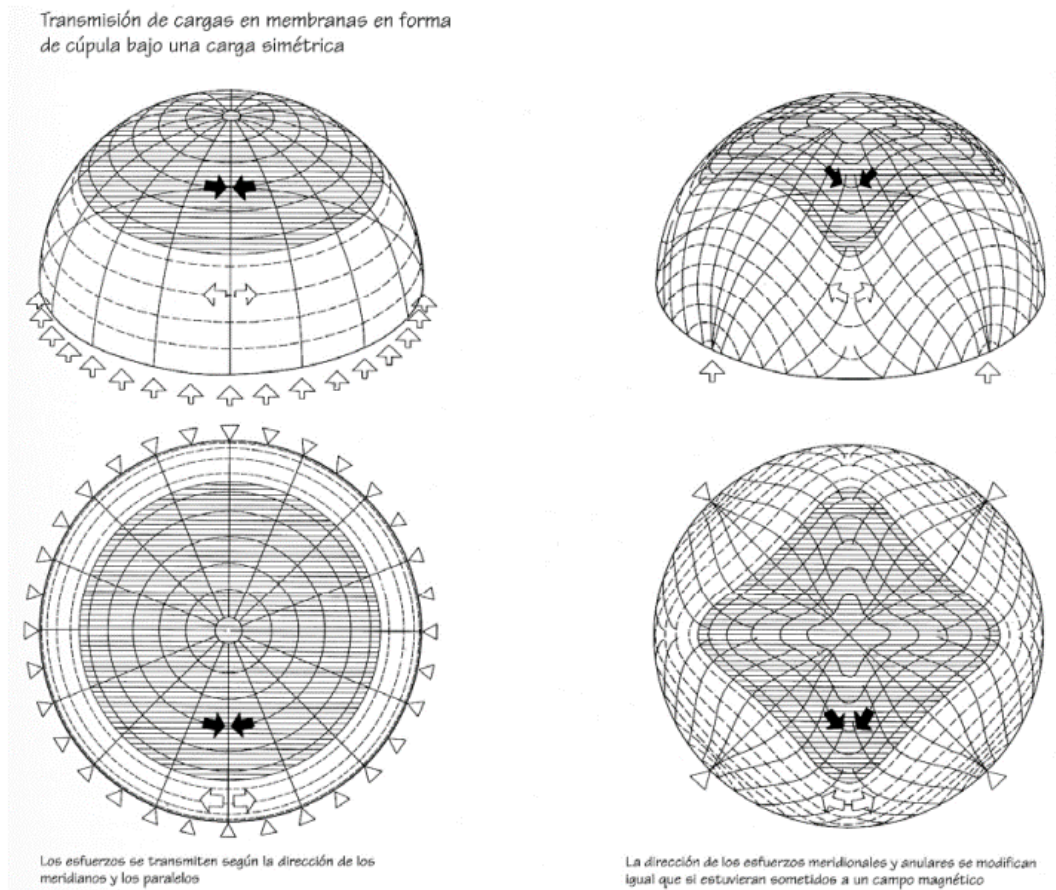
Figura 24. **Vista de las pechinas de una cúpula, Templo de San Francisco El Grande**



Fuente: elaboración propia.

Los daños en las cúpulas son causados por los esfuerzos tangenciales, que son de compresión en la parte superior, pero toman valores crecientes de tensión hacia la base de la cúpula. Por la baja resistencia en tensión de la mampostería, dichos esfuerzos dan lugar frecuentemente a un agrietamiento a lo largo de los meridianos que hace que el domo se separe en una serie de gajos que funcionan como arcos adyacentes. Estos arcos son capaces de transmitir las cargas por esfuerzos normales de compresión, de manera que la cúpula agrietada no pierde estabilidad, una manera de entender la forma de transmisión de presiones en una cúpula se muestra en la figura 25.

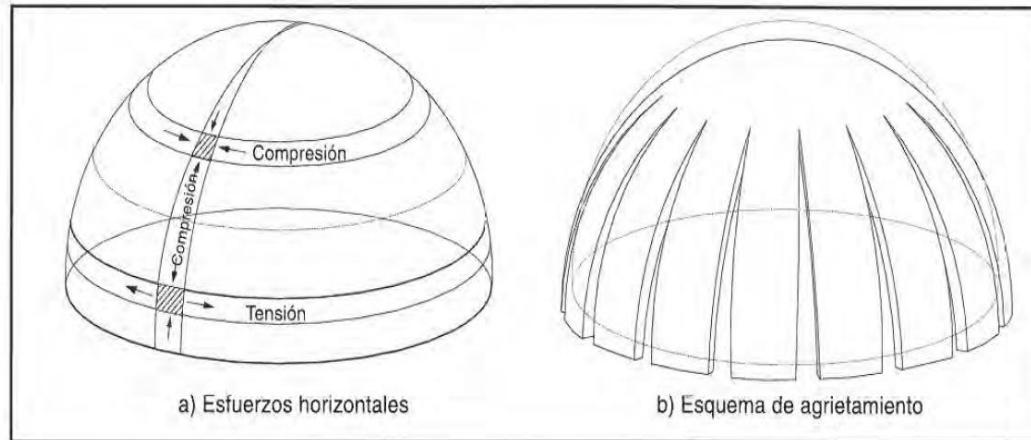
Figura 25. **Diagramas de transmisión de cargas en cúpulas respecto a sus puntos de apoyo**



Fuente: REQUENA RUIZ, Ignacio. *Análisis de tipologías estructurales bóveda, lámina, cúpula y paraboloides*. p. 17.

Al igual que en su equivalente plano, que es el arco, la cúpula presenta variantes de forma que van desde la semiesférica hasta la cónica, estas se muestran en la figura 26.

Figura 26. **Esquema de la cúpula esférica**



Fuente. MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 63.

### 1.3.3.8. **Vanos**

Los vanos entre puertas y ventanas eran soportados por distintos materiales. Un método fue la utilización de vigas de madera incrustadas en el muro o soportadas por pilastras. Otro método de soporte de vanos era por arcos de roca o ladrillo, así se aseguraba el soporte de las cargas de muros superiores y una mejor distribución de esfuerzos.

La roca no era tan utilizada debido que su colocación era complicada, sin embargo, algunos de los arcos eran construidos con rocas cortadas en forma de triángulos truncados, de modo que se pudieran crear distintos arreglos como los arcos rebajados, adintelados, de medio punto en forma curva o escalonada (ver figura 27). En el caso del ladrillo, su manejo era más sencillo y se podían crear también arcos rebajados o adintelados.

Figura 27. Vanos de puertas y ventanas construidos con roca labrada



Fuente: elaboración propia.



## **2. FILOSOFÍA DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA ÉPOCA COLONIAL**

### **2.1. Principios generales del diseño estructural de la época**

La observación de las estructuras y formas de la naturaleza fue importante para desarrollar la práctica estructural en distintas épocas históricas, de hecho, el cálculo de las edificaciones y el determinar a partir de procesos cuantitativos las dimensiones, propiedades y comportamientos de los materiales y elementos es una práctica relativamente reciente.

Las formas tan esbeltas, complejas y refinadas que se ven representadas en las edificaciones coloniales fueron diseñadas y realizadas a través de la llamada geometría constructiva, que utilizaba conceptos geométricos como el manejo de cuadrados, círculos, triángulos y líneas para definir puntos y trazos de las estructuras cuyo estudio primario comienza en el análisis e interpretación de la geometría euclidiana y terminando en la experiencia adquirida a través del tiempo por la incidencia de factores externos como los sismos o los colapsos parciales o totales.

Entonces, la evolución de las estructuras realizadas por el hombre se basó en gran medida por prueba y error. Observar la magnitud y el atrevimiento de las distintas estructuras coloniales requirió de varios intentos fallidos que llevaron a definir límites en los cuales debían de mantenerse las características de la estructura para asegurar una estabilidad y comportamiento adecuado.



A pesar del gran avance en las matemáticas y física en la antigüedad, la aplicación no llegó tan rápidamente al cálculo de estructuras. Hans Straub, autor de *A History of Civil Engineering*) escribió:

No existe evidencia de una aplicación deliberada y cuantitativa de las leyes de las matemáticas y la física para determinar las dimensiones y la forma de las estructuras que se obtenían más bien con lo que podría llamarse una intuición educada y a pesar del notable desarrollo de la estática y la mecánica, había una mínima conexión entre la teoría y la práctica y pocos intentos de aplicar los conocimientos científicos para propósitos prácticos.<sup>12</sup>

Si bien las bases de la mecánica clásica, estática y mecánica estructural estaban cimentadas desde Galileo y Newton, éstas no encontraron una aplicación directa al cálculo estructural, sino que sirvieron como una referencia para desarrollar la estética y la técnica estructural y constructiva. Para avanzar en la aplicación de los conocimientos de la mecánica estructural se requiere un conocimiento de la forma en cómo las fuerzas se generan y se distribuyen de un elemento a otro a lo largo de la estructura, pero no hay evidencia de la aplicación cuantitativa de tales conocimientos en siglos antes de Cristo.

Son claramente notable las formas majestuosas, complejas, masivas y detalladas de las estructuras en las edificaciones coloniales, así que, ¿Cómo lograron ponerlas en pie?; las estructuras fueron diseñadas y realizadas recurriendo a conceptos geométricos relativamente elementales, algo denominado geometría constructiva cuyo enfoque era la manipulación de la simetría y la utilización de cuadrados, círculos y triángulos, para definir los puntos y trazos necesarios, y acá, la geometría euclidiana encontró una aplicación directa en la construcción casi dos mil años después de su generación.

---

<sup>12</sup> STRAUB, Hans. *A history of Civil Engineering: An outline from ancient to modern times*. p. 130.

## **2.2. La geometría y mecánica aplicada en el diseño estructural**

Más que cualquier otra disciplina, la arquitectura, la ingeniería estructural y la mecánica estructural es el resultado de una larga y distinguida historia en donde la geometría cobró auge en todo momento.

Ahora bien, para comprender realmente cómo incide la geometría en el diseño estructural y arquitectónico, hay que entender las influencias que tuvieron los sistemas constructivos para edificar las formas tan diversas que se observan aún en la actualidad. Se aborda desde tres líneas básicas y concurrentes: la geometría, la mecánica y la arquitectura, aunque, para los fines de esta investigación, se hará énfasis en las dos primeras.

La primera referencia de la geometría se atribuye al siglo veinte antes de Cristo, en Egipto. La historia de la geometría en la ingeniería estructural se remonta a la construcción de las pirámides; la geometría fue creada y desarrollada para resolver los problemas que los ingenieros y científicos de la época requerían.

En el principio, la geometría era una colección de reglas de uso común para medir y construir casas y ciudades. Fue hasta el año 300 AC que Euclides de Alejandría, en sus elementos, ordena y escribe todo ese saber, imprimiéndole el sello de rigor lógico que caracteriza y distingue a las matemáticas. Se da cuenta de que toda prueba debe basarse sobre ciertos principios previamente establecidos ya sea, a su vez, por demostración o bien por convención. Pero al final, este método conduce a la necesidad de convenir en que ciertos principios básicos (postulados o axiomas), son válidos sin necesidad de demostrarlos, que están dados y son incontrovertibles para construir sobre ellos el resto de la teoría.

La geometría euclidiana se ocupa del estudio de las propiedades de figuras en el plano, y las del espacio tridimensional. Las medidas obtenidas con la geometría euclidiana son denominadas longitud, área o volumen. En contraposición, el caracterizar o medir la irregularidad de los objetos es posible mediante una teoría matemática denominada geometría fractal (utilizada en la actualidad), obteniendo una medida denominada dimensión fractal.

Lo que hoy se conoce como Geometría Euclidiana, y hasta hace dos siglos simplemente como Geometría, está basada sobre los cinco postulados de Euclides:

- Por cualesquiera dos puntos, se puede trazar el segmento de recta que los une.
- Dados un punto y una distancia, se puede trazar el círculo de centro en el punto y radio la distancia.
- Un segmento de recta, se puede extender en ambas direcciones indefinidamente.
- Todos los ángulos rectos son iguales.
- Dadas dos rectas y una tercera que las corta, si los ángulos internos de un lado suman menos de dos ángulos rectos, entonces las dos rectas se cortan y lo hacen de ese lado.

La posibilidad de extender con paso firme la geometría euclidiana a más de dos dimensiones es una de las aportaciones de mayor profundidad del método cartesiano. El tratamiento moderno de la geometría se debe al matemático alemán David Hilbert quien desarrolló en su obra Fundamentos de la geometría un conjunto de 21 postulados para la geometría euclidiana que no se separan mucho de los principios de Euclides.

En los tratados modernos de los postulados de la geometría euclidiana no hay descripciones de objetos como en los Elementos de Euclides, sino unas premisas que son el punto de partida para el desarrollo de resultados posteriores. La necesidad del conocimiento de la geometría para los ingenieros estructurales ha sido reconocida por muchos investigadores a través del tiempo, incluso en la antigüedad.

Es, por supuesto, importante notar la conexión bidireccional de la geometría Euclidiana y el análisis mecánico clásico (la base de la mecánica estructural). El concepto de la geometría Euclidiana puede ser usado como base para la creación y el desarrollo del análisis mecánico y viceversa, también es posible probar conceptos geométricos como por ejemplo el centro de gravedad de un triángulo, la estabilidad estructural de ciertas formas, entre otros.

En la mecánica, la referencia más antigua es una obra menor, atribuida a la escuela peripatética, conocida como la Meccanica problemata o problemas de mecánica. La concepción del cosmos, esta estuvo ligada al dogma de la iglesia y a la concepción del mundo geométrico, ambos se desarrollaron alrededor del recurso de la mecánica, considerándose a la mecánica como base para diversas disciplinas.

Sobre conceptos como el movimiento rectilíneo, el peso de objetos, la caída libre y otros, se construye o explican las máquinas simples, al estar presente el movimiento circular. Es oportuno indicar que, al partir de la filosofía natural, el objetivo no es el de producir aplicaciones prácticas, sino más bien de buscar las causas de los fenómenos. También se debe hacer notar que, aunque Aristóteles dedica un libro especial a la física, esta última no corresponde con la concepción actual de la misma, estando más bien ligada a la filosofía natural, al descubrimiento a través del intelecto de las causas de los fenómenos.

Arquímedes fue otro precursor del pensamiento mecánico y es de particular importancia, ya que, a partir de una forma “mecánica”, es decir, llega a conclusiones y descubrimientos importantes. A partir del trabajo de Arquímedes se desarrollará a la moderna concepción de los centros de gravedad, que está presente en varios tratados del Renacimiento y posteriores, entre los cuales cabe destacar a Juan Bautista Villalpando y Milliet Deschalles quienes también escriben sobre arquitectura.

Baldi es de los últimos comentaristas de Aristóteles, en un intento de unir los conceptos del Estagirita con la Scientia de Ponderibus, mostrando un lento proceso de cambio desde un modelo de análisis geométrico hacia uno basado en la Resistencia de Materiales, o nueva ciencia, como le llamara más adelante Galileo, iniciando el análisis de la estática del cuerpo rígido, se definía en un modelo geométrico. La influencia del helenismo, en cuanto a su concepción geométrica del razonamiento, perduraría hasta el final de la edad media. En este espacio no es posible analizar todas las variantes, influencias, avances y retrocesos que se vivieron en Europa en cuanto a la geometría como teoría o a la geometría como mecánica.

No obstante, sí es necesario hacer notar que, la geometría euclidiana, marcó un hito en la historia, un modo particular, una lógica de razonamiento basada en postulados y teoremas “verdaderos”. Ahora bien, el impacto en la ingeniería estructural se basa en que los edificios se pensaban de un modo geométrico, donde la medida tenía menor importancia en la definición de los esquemas reguladores o trazos armónicos; los conocimientos geométricos, el uso de regla y compás, adquiriría una importancia, como una “verdad” científica.

La importancia de los estudios de la mecánica citados en párrafos anteriores reside en dos aspectos fundamentales, primero, identificar la base geométrica sobre la que descansa un sistema de lugares, de importancia simbólica más que estructural. Segundo, mostrar la importancia de la regla y compás tanto en la explicación de los fenómenos como en su traducción en elementos estructurales, ligados todos al movimiento circular.

Un ejemplo directo de la aplicación de estos conocimientos se ve con Joseph y Diego de Porres, hijo de Joseph (constructores y arquitectos icónicos de la época colonial). Joseph de Porres, nació en Santiago de Guatemala en 1695, realizó sus primeros trabajos como aprendiz en 1657 durante la construcción del templo del hospital San Pedro, obra a cargo del alarife Juan Pascual. Tuvo acceso a libros de arquitectura italiana escritos por Sebastiano Serlio y Giacomo Vignola; Joseph adaptó estos elementos a los requerimientos del barroco inicial, desarrollando un estilo constructivo especial que identificó a Santiago de Guatemala en el siglo XVIII.

Joseph de Porres madura su experiencia al volverse maestro mayor de la Catedral de Santiago de los Caballeros de Guatemala y que continúa en Santa Teresa y la Compañía de Jesús, en los cuales es posible identificar un sistema de modulación que no habría sido posible encontrar sin contar con el andamiaje conceptual aportado por la mecánica, proveyendo de claves que permiten una nueva lectura de la arquitectura de la Antigua Guatemala, que tome en cuenta tanto aspectos estilísticos como también, la concepción del mundo o ciencia de la época.<sup>13</sup>

### **2.3. Consideraciones respecto al diseño sismo-resistente de las edificaciones**

Cuando se habla de una estructura sismo-resistente los principios de seguridad estructural para su diseño o revisión son cruciales.

---

<sup>13</sup> RAMÍREZ, Mario Raúl. *La influencia de la meccanica problemata en la arquitectura de Joseph de Porres*. p. 31.

Pensar que una estructura que es segura en términos generales signifique que no vaya a fallar, es erróneo, de hecho, toda estructura fallará, exceptuando el caso en que sea demolida o intervenida para preservarla. De hecho, se observan distintas fallas en las edificaciones coloniales que se deben, por un lado, al deterioro que experimentan los materiales con el tiempo y, por otro lado, a que la cantidad de fenómenos que la afectan crece con el tiempo.

La comprensión que la ingeniería ha alcanzado sobre el comportamiento sísmico de estructuras es muy reciente. Fue apenas en el siglo pasado que comenzó a entenderse la forma en que las estructuras responden ante los movimientos sísmicos.

Las prácticas a seguir en el caso de edificios históricos han ido evolucionando conforme se han ido acumulando experiencias por el sistema de acierto y error. Las primeras mediciones de los movimientos sísmicos durante terremotos fuertes se llevaron a cabo apenas en 1933 y no fue sino hasta 1970 que se registró por primera vez la forma en que un edificio respondía ante un terremoto suficientemente fuerte como para producirle daño.

Los primeros procedimientos de la ingeniería para realizar un diseño sísmico no se formularon sino hasta principios del siglo, aunque anteriormente se habían llevado a cabo algunos intentos esporádicos. A estos esfuerzos se sumó la acumulación de detalles constructivos que producían un desempeño sísmico satisfactorio. Tras el surgimiento de los métodos modernos de construcción, en los que el acero y el concreto reforzado tomaron el lugar del ladrillo y la roca como materiales principales de construcción, se desarrollaron diseños estructurales que permitían a los edificios soportar severas cargas ambientales (viento y movimientos sísmicos), desempeñándose de forma predecible y aceptable.

Tanto el acero como el concreto reforzado son materiales dúctiles con un amplio rango de comportamiento linealmente elástico, por lo que el comportamiento de los edificios construidos con estos materiales puede ser estudiado mediante métodos analíticos o computacionales. El análisis de edificaciones hechas con materiales frágiles y no reforzados, tales como la roca, el ladrillo o el adobe, puede ser realizado solo mientras las construcciones estén en el rango elástico, que es muy corto, antes de que sufran daños. Una vez que se han formado grietas en este tipo de construcciones, su análisis se torna extremadamente difícil, incluso utilizando herramientas de cómputo modernas y avanzadas.

En la década de 1960 surgió una revolución conceptual en el diseño sísmico de construcciones cuando los ingenieros desarrollaron la idea de un diseño dúctil. Este tipo de diseño confiere a los sistemas estructurales la capacidad de soportar cargas de gravedad y cargas sísmicas cíclicas aún después de que los materiales constructivos han alcanzado su punto de fluencia. Antes de que existiera este concepto, el enfoque esencial del diseño sísmico consistía en asegurarse de que la estructura tuviera la resistencia suficiente para soportar las cargas laterales. Los distintos enfoques de diseño dúctil no han abandonado la idea de la resistencia estructural, pero se complementan con la introducción de refuerzos y detalles de conexión, de forma que los elementos tengan la capacidad de transmitir sus cargas aún después de haber sido dañados.

En su forma más sencilla, el término ductilidad se entiende como la relación que hay entre el desplazamiento asociado a la falla estructural (definida esta como la incapacidad de continuar soportando cargas verticales y horizontales), y el desplazamiento en el que los materiales inician la fluencia (definido este como el inicio de la deformación permanente).



El acero y el concreto reforzado se caracterizan por ser materiales sumamente dúctiles cuando se utilizan materiales de refuerzo suficientes y bien orientados. Los materiales frágiles (por ejemplo, mampostería de adobe, ladrillo cocido, tejas, vidrio y concreto no reforzado), presentan gran fuerza de compresión, pero baja ductilidad, a menos que se les refuerce.

Por ejemplo, un material sumamente utilizado, el adobe no reforzado, tiene muy baja ductilidad, baja resistencia a la de compresión y casi nula resistencia a la tracción; esta es la razón que se esgrime, para explicar su mal comportamiento sísmico.

El estudio de los efectos de los sismos es clave para el diseño de cualquier edificación. El diseño sismo-resistente de una edificación moderna toma en cuenta aspectos como las cargas, las fuerzas sísmicas, el potencial sísmico de la zona, el nivel de importancia de una estructura, el tipo de suelo y otros para asegurar un grado de consolidación.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura es una característica intrínseca de ésta, que depende del criterio empleado en su diseño y es independiente de la peligrosidad sísmica del sitio en donde esté ubicada. El conocimiento adecuado de la amenaza sísmica existente ayuda a definir la acción que debe tomarse al momento de consolidar o restaurar una edificación colonial.

“Así, cada estructura (o tipo de estructura) tiene su propia función de vulnerabilidad y su determinación varía para comportamientos estructurales distintos”.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> SÁNCHEZ, María Inés. *Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile*. p. 10.

“En la época colonial se respetaban dos criterios básicos de diseño, el primero era que la edificación debía de ser muy esbelta, cuidando la configuración o forma y el segundo, que la cimentación fuera lo suficientemente profunda para resistir actividades sísmicas, criterios que actualmente no se aplican cuando se diseña o se habla de una estructura sismo-resistente”.<sup>15</sup>

La geometría siempre estuvo involucrada en todos los aspectos del diseño de las edificaciones coloniales y existen aspectos adicionales dentro del diseño sismo resistente de las edificaciones que se evidencian no solamente en las construcciones de la época, sino desde la antigüedad, los aspectos son los descritos a continuación.

### **2.3.1. Orientación geográfica**

Generalmente las ciudades se establecían conforme la alineación de los puntos cardinales, sin embargo, también dependían de la topografía del terreno y otros factores económicos y geoeconómicos. Había y aún existen motivos de índole muy práctica: maximizar las horas de sol por la iluminación o calefacción, por ejemplo, pero también otros motivos de tipo simbólico como encarar hacia el oriente, la iluminación especial en ciertos días santos o de solsticio, entre otros.

### **2.3.2. Proporción**

La teoría de la proporción nace de la creatividad arquitectónica: la relación de la parte con el todo; las relaciones del todo con todas sus partes.

---

<sup>15</sup> HERNÁNDEZ, Edgar Fernando. *Recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente de edificaciones coloniales en La Antigua Guatemala*. p. 35.

“Esta teoría, ya aplicada en Egipto y descrita literariamente por primera vez por el arquitecto romano Vitruvio, va unida a los trazados geométricos con regla y compás, y en ella conviven las proporciones estáticas inherentes a la llamada modularidad (1, 1/4, 1/2, 3/4, 1/3, 2/3, 1/5, entre otros) con las proporciones dinámicas (2, 3, 5, entre otros)”.<sup>16</sup>

La teoría de la proporción ha perdurado a lo largo de la historia, buscando siempre la armonía entre partes. En la construcción de edificaciones de uso religioso, por ejemplo, existe una relación 1:1:4 o 1:1:3 (ancho:altura:largo), que es común denominador. Por otra parte, las casas y algunos conventos y monasterios se caracterizan por volúmenes a partir de vacíos o patios interiores que propician formas cuadradas, rectangulares o irregulares que se articulan por el sistema de entrepiso y finalmente por la cubierta.

Los constructores españoles traían conocimientos que se habían desarrollado en Europa y otras regiones para el cálculo y diseño de edificaciones, como, por ejemplo, el método de cálculo del grosor de un muro que sostiene una bóveda era el siguiente: del centro del arco se traza una diagonal al semicírculo del perfil del mismo, y otra de la imposta a la roca clave.

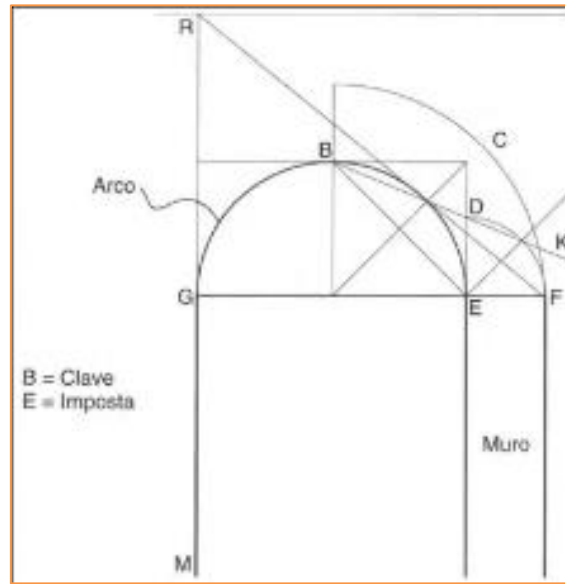
La distancia entre la imposta y la intersección se toma como radio de un cuarto de círculo con centro en la propia imposta, que define el espesor necesario para el muro de apoyo, esto último se ve reflejado en la figura 28.

Poleni publicó el primer ejemplo de cálculo de la seguridad de una estructura y corresponde a la revisión de la cúpula de la Basílica de San Pedro, en Roma.

---

<sup>16</sup> CATALÀ, Claudi Alsina. *Los secretos geométricos en diseño y arquitectura*. p. 1.

Figura 28. **Diseño geométrico de espesor de muros para carga de bóvedas**



Fuente: MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. p. 15.

Poleni publicó el primer ejemplo de cálculo de la seguridad de una estructura y corresponde a la revisión de la cúpula de la Basílica de San Pedro, en Roma. Debido a que la cúpula presentaba grietas, Poleni desarrolló un procedimiento de cálculo basado en un mecanismo de colapso. Supuso que la cúpula podía considerarse formada por una serie de arcos semicirculares, o gajos, separado por las grietas existentes, y postuló que, si cada arco era estable en forma independiente, el conjunto también lo sería.

### 2.3.3. La forma

La forma involucra aspectos como configuración, tamaño, altura, y proporción que influyen en el comportamiento estructural y la respuesta a un sismo.

La configuración de las edificaciones coloniales fue una herramienta de diseño sísmico, gracias a esto, muchos de los monumentos y edificios coloniales están de pie a pesar de los distintos movimientos sísmicos que hubo durante cierta época.

Tres figuras geométricas expresan lo anterior:

- El círculo y la esfericidad como símbolos de perfección divina y eternidad, sin principio ni fin.
- El cuadrado como símbolo de lo terrenal por su clara delimitación de cuatro extremos; por eso cuando en él se aloja el círculo, se alude a lo divino en la tierra (Cristo encarnado). Y si el cuadrado gira sobre sí mismo, es como la tierra activada, animada o espiritualizada.
- El triángulo equilátero, por sus tres lados y ángulos iguales formando unidad. Es símbolo del esencial misterio de la Trinidad dentro de la doctrina cristiana.<sup>17</sup>

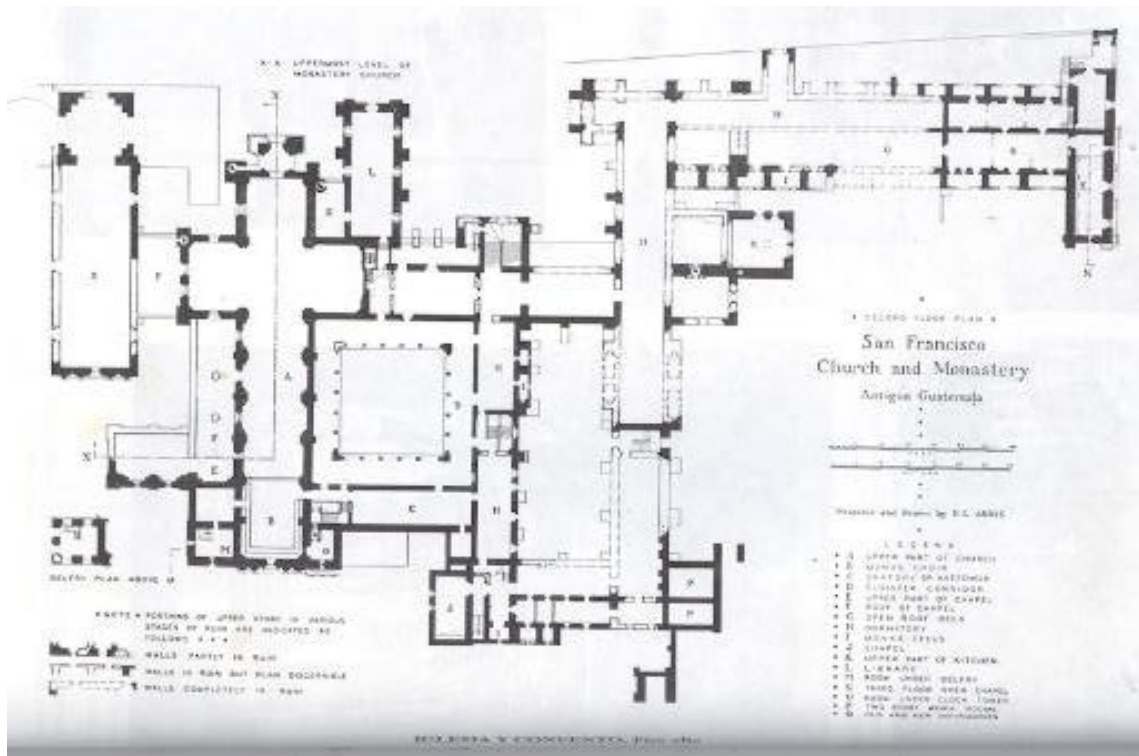
Gran parte de las diferentes proporciones y formas se pueden apreciar cuando se visualiza una edificación en planta, para tal hecho, los levantamientos topográficos existentes son una gran herramienta, y en carencia de ellos, los métodos modernos de levantamientos en 3D y capturas aéreas proporcionan un alto grado de detalle.

Por ejemplo, una de las formas más predominantes en la época colonial cuando se trataba de los templos era la planta cruciforme, es decir, la planta cuya forma aparenta ser una cruz. Un ejemplo claro de dicha planta es la del templo de San Francisco El Grande (figura 29), en La Antigua Guatemala, en donde la nave principal es un largo espacio en donde, en la parte interior se adosan dos espacios para capillas.

---

<sup>17</sup> Matalla, Elizabeth. A. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana.* p. 24, 25.

Figura 29. Templo y Convento de San Francisco El Grande, Planta Alta



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 120.

La forma cruciforme puede apreciarse en el lado del templo tanto en la planta baja como en la planta alta. La planta no es simétrica pues existen edificaciones adosadas, pero la forma de cruz es evidente si se aísla la parte del templo. En la época colonial se ponía atención a las buenas medidas y proporciones no sólo con fines estéticos, sino que, especialmente en el caso de los templos, intentaba transmitir un mensaje a comunicar, impregnando de un sentido expresivo a la forma de las edificaciones, tanto a las edificaciones religiosas como a las domesticas.

#### **2.3.4. Influencia de la configuración y escala**

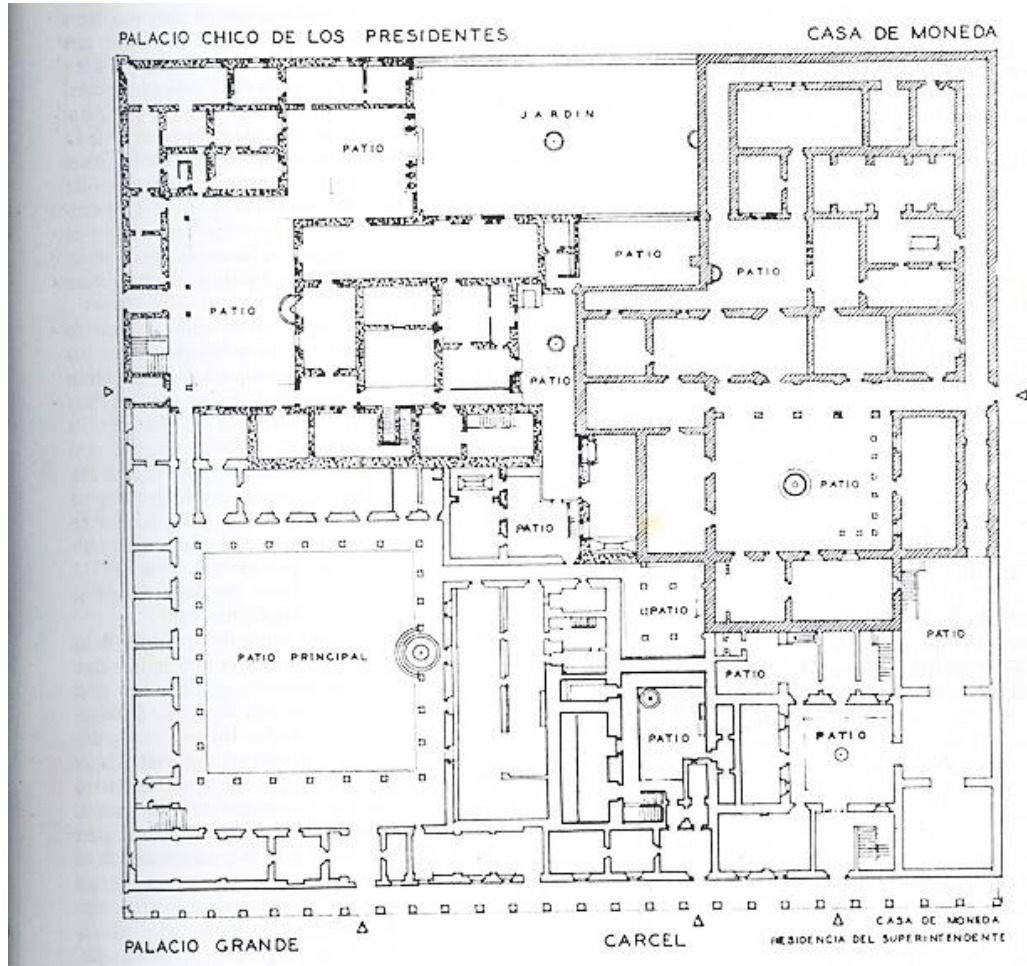
Por configuración se entiende que es la forma del conjunto del edificio, tomando en cuenta su localización, su tamaño y la naturaleza de los elementos resistentes y no estructurales dentro de él. Una edificación colonial no es un bloque homogéneo, sino un conjunto de partes, las cuales reciben fuerzas horizontales y verticales de otras partes a través de las juntas o uniones.

Debido a que el edificio no es un bloque homogéneo, el movimiento del suelo afectará diferentes partes de éste a intervalos diferentes y así puede inducir torsión o movimiento incompatible incluso en un edificio geoméricamente simétrico. El edificio, constituido por partes y conexiones, tendrá diferentes resistencias y rigideces en distintos lugares. La ordenación es la que hace que todas las partes del edificio tengan el tamaño o capacidad conveniente, ya sea considerando a cada una de por sí, o con respecto a la proporción de toda la obra. La disposición consiste en la oportuna colocación y el agradable conjunto de todas las partes del edificio según la calidad de cada una.

La escala, la altura, el tamaño horizontal, la proporción, la simetría, la distribución y concentración, la densidad de la estructura en planta, las esquinas, la resistencia perimetral, y la redundancia son otros factores que se tomaron en cuenta en la configuración.

Se observa en la figura 30 una configuración variada en donde se anidan varios conjuntos arquitectónicos dentro de un mismo edificio. Muchos de los espacios fueron diseñados pensando más bien en el uso del mismo que en la simetría o escala, sin embargo, es apreciable el uso de los espacios de patio corredor y la cuadrícula de espacios delimitada apropiadamente, no existen muros en diagonal o vanos demasiado largos.

Figura 30. **Plano compuesto, hecho por Luis Diez Navarro (1755-1769)**



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 33.

Por principios de mecánica analítica se sabe que a menor peso menor inercia. A medida que aumenta el tamaño absoluto de una estructura, se disminuye el número de alternativas para su solución estructural que permita una consolidación sismo-resistente, es por ello que la escala tenía incidencia en la configuración tridimensional de la edificación.



“Cuando aumenta el tamaño de un edificio, para que la resistencia de los elementos que lo conforman aumente en la misma medida que la masa, estos han de ser, en proporción, cada vez más gruesos. Este principio se aplicó en las edificaciones coloniales con la relación de ancho de muros y la altura de estos”.<sup>18</sup>

### **2.3.5. Influencia de la altura y proporción**

El período de vibración que una edificación presenta ante un movimiento sísmico, a medida que un edificio se hace más alto, aumenta, y ello contribuye a un cambio de la magnitud de las fuerzas y el nivel de respuesta, pero esto no es todo.

El periodo de un edificio no es solamente una función de su altura, sino también de factores como la relación entre altura y ancho, alturas de los pisos, tipos de materiales, y sistemas estructurales y la cantidad y distribución de masa.

Para el comportamiento y diseño sísmico, las proporciones de un edificio son más importantes que su tamaño absoluto. “Cuanto más esbelto sea un edificio, peores serán los efectos de volteo de un sismo, y mayores los esfuerzos sísmicos en las columnas exteriores, en especial las fuerzas de compresión por volteo, las cuales pueden ser difíciles de manejar.”<sup>19</sup>

Este último principio indica la relación de esbeltez con el ancho de la edificación, siendo esta relación altura/anchura de 3 o 4. En este sentido, los edificios coloniales presentan en general proporciones que mejoran su comportamiento.

---

<sup>18</sup> MATALLA, Elizabeth. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana.* p. 43.

<sup>19</sup> REITHERMAN, Arnold. *Configuración y diseño sísmico de edificios.* p. 68.

El equivalente en planta de la relación altura/anchura es la relación de aspecto; las formas largas y esbeltas son inconvenientes

“Por ejemplo, el grosor de los muros es muy importante en el comportamiento de una edificación de adobe. Los muros moderados o gruesos se definen aquí en términos de la esbeltez de sus paredes o como la relación entre la altura y el grosor (SL) de los mismos: muro grueso (SL < 6), muro moderado: (SL = 6-8) y muro delgado (SL > 8)”.<sup>20</sup>

Una edificación de adobe deberá pasar por muchas modificaciones en sus características dinámicas y sufrir desplazamientos mayores que los que se generen por la fisuración inicial, antes de convertirse en una edificación inestable. Generalmente los edificios de un piso son más rígidos en el sentido transversal más corto, mientras que la rigidez de estructuras de más de un piso es casi igual en los dos sentidos.

El sentido longitudinal de un edificio de una sola planta es, por tanto, más crítico respecto a los efectos espectrales de sismos.

“Los diafragmas largos y angostos tienden a tener periodos que sintonizan con la parte más crítica del espectro sísmico. Estos elementos no solo están sujetos a daño, sino que sus reacciones afectan partes adyacentes, como los muros de apoyo”.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> MATALLA, Elizabeth. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana.* p. 45.

<sup>21</sup> *Ibíd.* p. 46.

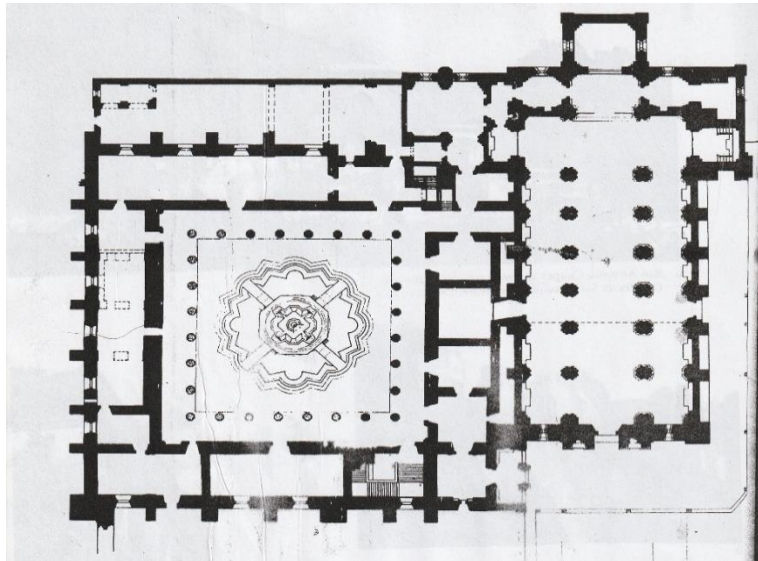
### 2.3.6. Simetría

Se dice que una edificación es simétrica respecto a dos ejes en planta si su geometría es idéntica en cualquiera de los lados de cualquiera de los ejes que se estén considerando. Un edificio puede ser simétrico respecto a un eje. La teoría de la simetría con su juego de transformaciones isométricas en el plano o en el espacio ha dado lugar a ingeniosos recursos compositivos, considerados en muchos casos como referentes de belleza. Técnicamente, la simetría estructural implica que el centro de masa y el centro de resistencia están localizados en el mismo punto. Puede haber simetría en la elevación, pero tiene menor significación dinámica que la simetría de planta.

De cualquier forma, las formas simétricas son preferibles a aquellas que no lo son, porque en términos geométricos, la asimetría tiende a producir excentricidad entre el centro de masa y el centro de rigidez y por tanto provocará torsión. La excentricidad se puede deber a causas no geométricas, por ejemplo, variaciones en la distribución de peso, pero la asimetría provocará casi inevitablemente torsión. Por otra parte, la asimetría, tiende a concentrar esfuerzos, por ello la concentración de esfuerzos en una esquina es mayor.

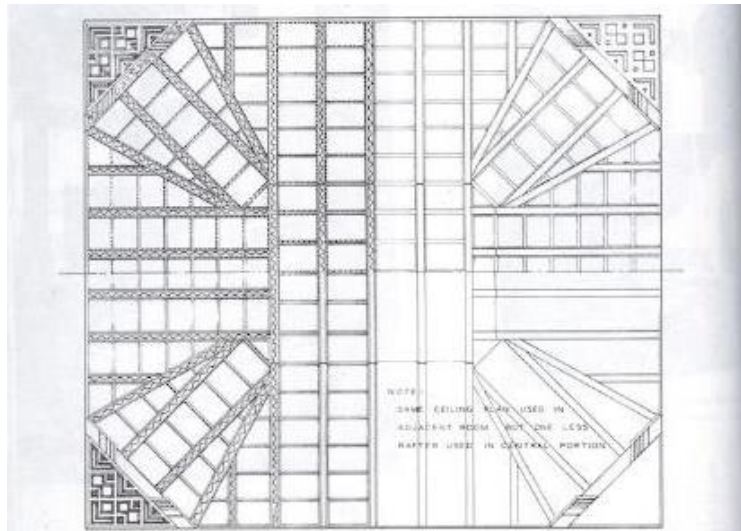
Sin embargo, un edificio con esquinas interiores no es necesariamente asimétrico, pero sí irregular, de forma que la simetría por sí sola no es suficiente y solo cuando se combina con la sencillez es que las formas geométricas tienden a eliminar la concentración de esfuerzos. En la figura 31 se puede apreciar dos plantas, una del monasterio y la otra del templo La Merced, ambas, por separado, tienen características simétricas si se toma como eje de coordenadas el centro geométrico de la planta. En la figura 32 se observa la búsqueda de simetría en techos de edificaciones coloniales.

Figura 31. **Monasterio y Templo La Merced en La Antigua Guatemala**



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 132.

Figura 32. **Simetría en estructura de techo, Casa del Sacristán Mayor, Catedral, La Antigua Guatemala**



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 70.

### **2.3.7. El material**

De los materiales que brindaba el lugar, la tierra fue inicialmente uno de los principales insumos, pues de ella se configuraba la estructura bien sea a través de adobes, bloques de tierra de un tamaño manual prismático que variaba; de tapia pisada (tapial), otro bloque de tierra, pero de tamaño mayor, compactado con pisón manual; o el que venía usando la cultura indígena, conocido como bahareque, mezcla entre madera flexible y tierra.

“La técnica de construir con tierra para los conquistadores y conquistados no fue una novedad; a los europeos les era familiar porque habían heredado técnicas árabes y mediterráneas que durante siglos y los grupos indígenas contaban con amplia experiencia en el uso del suelo o la tierra como material de construcción”.<sup>22</sup>

Con el paso del tiempo, utilizaron materiales más resistentes y en arreglos que permitían un mejor soporte y solidez a la estructura, materiales como la roca, la cual fue predominante y ampliamente utilizada en todas las partes de las estructuras, con mayor frecuencia en muros.

### **2.3.8. El lugar**

Inicialmente, el lugar en donde se encuentran las edificaciones coloniales fue consecuencia de las políticas de fundaciones y población de los colonizadores que en su recorrido fueron encontrando lugares poblados y otros lugares que tenían una cultura de la tierra distinta.

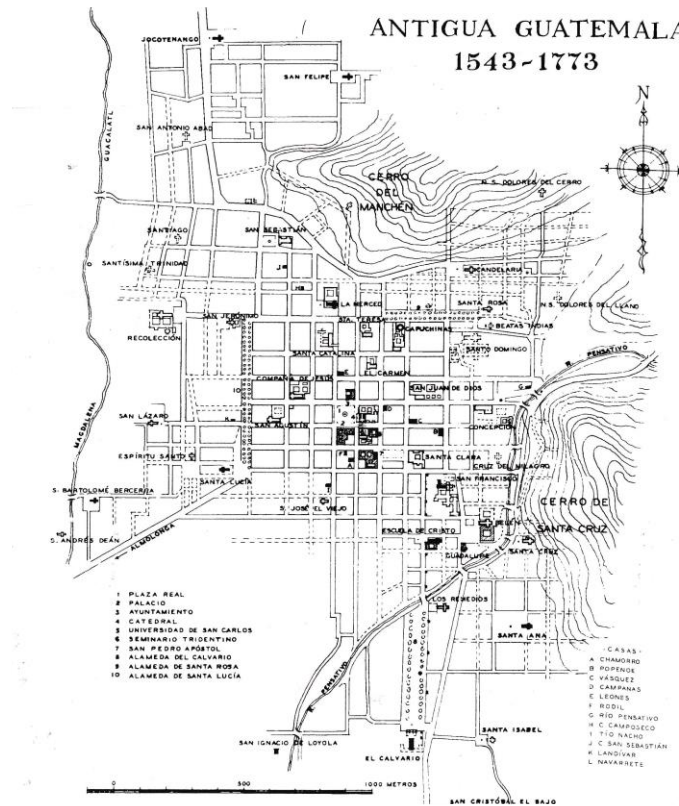
---

<sup>22</sup> MATALLA, Elizabeth. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana.* p. 54

Había una concepción distinta entre lo que los indígenas y los españoles consideraban una condición básica y necesaria para establecer una población y fundar una ciudad. La selección del lugar de asentamiento, desde la perspectiva de los españoles en la época de la conquista, dependió de factores como: abundancia de recursos naturales, clima saludable, vientos predominantes, situación respecto del sol y del agua y otros.<sup>23</sup>

En la figura 33 se puede apreciar la distribución ordenada en base a los cuatro puntos cardinales de La Antigua Guatemala entre 1543 y 1773.

Figura 33. Mapa de la Ciudad de Santiago de los Caballeros 1543-1773



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. p. XX.

<sup>23</sup> MATALLA, Elizabeth. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana*. p. 84.

En contraste, para los nativos, un buen lugar era aquel que tiene la presencia de poblaciones numerosas, y dado que las técnicas de construcción no eran tan avanzadas antes de la influencia de los europeos, la incidencia de terremotos como un factor para fundar una ciudad no era preponderante.

#### **2.4. Consideraciones respecto la falla de una edificación colonial**

Las fuerzas de inercia son generadas por la oposición que la masa presenta a una aceleración dada. En este caso, por la aceleración que el suelo impone a la construcción. La estructura no sólo responde a las características del movimiento del suelo sino también a sus características de deformidad (rigidez o flexibilidad).

Las fuerzas de inercia inducidas en la edificación influyen directamente sobre la magnitud y forma de actuar de estas fuerzas. Por otra parte, habrá que considerar que por poseer un suelo muy blando (flexible), la estructura de mampostería reestructurada (más rígida) disminuirá la ampliación de la aceleración, por lo que hace sumamente importante que el ingeniero conozca las características dinámicas del suelo.

Algunas condiciones que propician el fallo en los elementos estructurales o el sistema estructural de la edificación colonial son las siguientes:

- Agrietamiento y fisuración.
- Erosión basal (formación de concavidades en la base de los muros).
- Drenaje deficiente del sitio.
- Humedad excesiva.
- Relleno de interiores con materiales incompatibles y de propiedades físicas diferentes.

- Falta de continuidad, simetría o relaciones de esbeltez en los elementos constructivos.
- Daños por movimientos sísmicos y fallas geológicas locales.

Sin embargo, de todas las causas del entorno, suelo, topografía o intemperismo las fallas derivadas de los movimientos sísmicos son las más graves. Los sismos producen vibraciones del terreno que ponen en peligro las edificaciones por el movimiento que se induce en su base.

Durante un sismo, la base del edificio que está fija al suelo tiende a seguir el movimiento del terreno, mientras que, por inercia, la masa del edificio se opone a ser desplazada y a seguir el movimiento de su base y así se generan fuerzas de inercia que comprometen la estabilidad estructural del edificio. La cuantificación de dichas fuerzas y de la respuesta de las estructuras ante ellas es un problema complejo de dinámica estructural, requiriéndose grandes métodos de simplificaciones para plantear soluciones prácticas.

Ya se han mencionado que la estabilidad estructural no depende específicamente de la geometría constructiva, sino también de los aspectos antes mencionados, pero cuando se trata de sismos, las fuerzas que se inducen en la estructura no son función solamente de la intensidad del movimiento del terreno, sino dependen en forma importante de la masa de la edificación y de su forma de vibrar.

Las fuerzas de inercia que se generan por la vibración del edificio se transmiten a través de la estructura, siguiendo trayectorias que dependen de la configuración estructural. Estas fuerzas generan esfuerzos y deformaciones que pueden poner en peligro la estabilidad de la construcción.



La eficiencia de una estructura en cuanto a su comportamiento sísmico depende de su capacidad para canalizar las fuerzas de inercia hacia los elementos idóneos para resistirlas, sin que se produzcan concentraciones de esfuerzos en zonas débiles. Finalmente, el sistema estructural debe llevar las fuerzas de inercia hacia la cimentación y el terreno en donde esta se apoya. Como ninguna edificación cumple a cabalidad los parámetros de eficiencia sísmica por completo, las fallas son el indicador más evidente de la falta de estabilidad estructural. En la tabla IV, se exponen las tipologías comunes que se evidencian en edificaciones coloniales.

Tabla IV. **Tipologías comunes de daños y fallas en elementos estructurales**

ELEMENTO	TIPO DE FALLA	DESCRIPCIÓN
MUROS	Daños fuera de plano	Las grietas de flexión comienzan como grietas verticales en muros transversales, se extienden vertical o diagonalmente hacia abajo, hacia la base de los muros y se extienden horizontalmente hacia el siguiente muro perpendicular. La existencia de grietas no significa necesariamente que un muro sea inestable. Los muros pueden mecerse sin convertirse en inestables. Después del desarrollo de grietas, la estabilidad fuera del plano de un muro depende de la relación de esbeltez, de la conexión con la estructura, de las cargas verticales y de las condiciones del muro en su base.
	Grietas de flexión y colapso	Los muros largos, altos, esbeltos, con aparejos de una o dos hiladas verticales sin solera de amarre que interconecten las mismas, son susceptibles a la formación de grietas horizontales de media altura, debido a los movimientos sísmicos fuera del plano.
	Falla por corte en el plano	Las grietas clásicas en "X" o diagonal son causadas por fuerzas de corte en el plano.
	Falla en las esquinas	Pueden desarrollarse grietas verticales o diagonales en las esquinas en uno o en ambos planos de la intersección de los muros, pueden ser ocasionadas por fuerzas de corte en el plano o por fuerzas de flexión fuera del plano.
	Daños en intersecciones de muro	Los muros perpendiculares pueden separarse unos de otros y dañarse al golpearse entre sí.
	Deslizamiento entre muros y marcos de madera	Las estructuras de techo, cielo raso y entrepiso a menudo se separan de los muros. Normalmente, en construcciones históricas la importan estructuras de madera no están o están mal ancladas a los muros.

Continuación de la tabla IV.

MUROS	Daños en el muro o en las varillas de anclaje	Las fisuras a menudo se inician a partir de los anclajes o traviesas estructurales. Resulta difícil evitar la concentración de esfuerzos en estos puntos y esto generalmente lleva a la aparición de grietas y de otros daños, como el aplastamiento del material.
	Agrietamiento horizontal en la parte superior	Pueden aparecer grietas horizontales cerca de la parte superior de los muros, en donde haya una viga collar o en donde el techo se ancle a la misma. Estas grietas son ocasionadas por una combinación de fuerzas horizontales y pequeños esfuerzos de compresión vertical que se presentan cerca de la parte superior del muro.
	Daños de flexión en muros a media altura	Pueden formarse grietas horizontales cuando los muros de carga son largos y la parte superior del muro está restringido por efecto de una viga collar o de una conexión al techo o al sistema de techo.
COLUMNAS	Falla por inestabilidad local	Ciertas porciones de muro pueden convertirse en inestable como resultado de fisuras que surjan en las esquinas de la edificación y en las aberturas de ventanas y puertas.
	Falla por corte en columnas	Grietas aproximadamente a 45 grados en los extremos de las columnas; generalmente hay desprendimiento del material de recubrimiento y fisuración.
	Falla por efecto de columna corta	Grietas a 45 grados formando una X en la parte de la columna que no está restringida por muros laterales.
	Falla por flexo compresión en columna	Fractura y desprendimiento del concreto, exposición y deformación del refuerzo en los extremos de la columna.
ABERTURAS	Grietas en aberturas y vanos por concentración de esfuerzos	Normalmente aparecen grietas en la parte superior de puertas y otras aberturas (ventanas), propagándose vertical o diagonalmente hacia arriba. También pueden nacer grietas en las esquinas inferiores de las ventanas.
CUBIERTA	Falla por flexión	Grietas en la cara inferior a 45° formando una X (cuando la cubierta está apoyada en los 4 extremos).
ARCOS Y BOVEDAS	Falla por desplazamiento o apertura de claros	Estos elementos de la cubierta trabajan por "gravedad" transmitiendo las descargas, componente vertical y horizontal (coceo), hacia los muros y contrafuertes. La inestabilidad se presenta cuando existe abertura de los apoyos (variación del claro) y se modifica la línea de presiones de su trayectoria original.
CÚPULAS	Falla por esfuerzos combinados	Se generan agrietamientos en la cúpula debido a los esfuerzos cortantes que se presentan en la mampostería (agravados por la discontinuidad que provocan las ventanas), la inestabilidad de esta estructura se presenta en los efectos de flexión, carga axial, torsión y cortante que experimenta la base (tambor).

Continuación de la tabla IV.

CONTRAFUERTE	Falla por unión muro-contrafuerte	En general estos elementos se agrietan verticalmente en la unión muro-contrafuerte. Las grietas inclinadas se formaron en la mampostería del contrafuerte cuando el incremento del esfuerzo horizontal por el cortante dinámico excede la capacidad del material.
--------------	-----------------------------------	---

Fuente. elaboración propia.

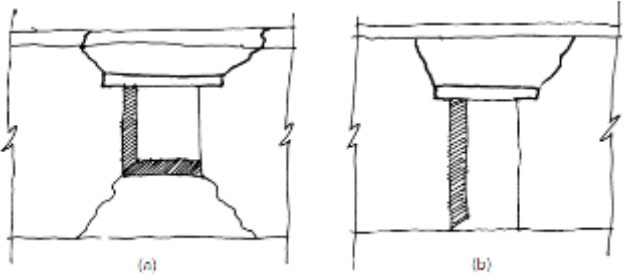
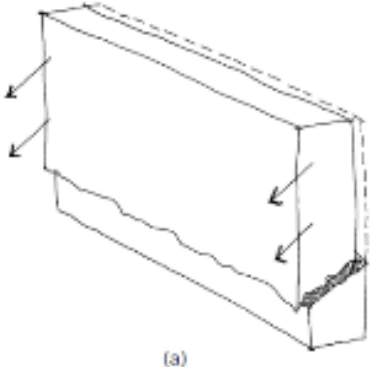
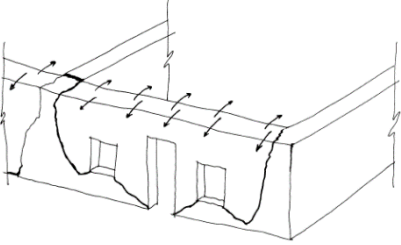
Figura 34. **Gráficas de fallas comunes en elementos estructurales**

Colapso de muro de tímpano: (a) volteo desde la base del muro; y (b) colapso desde media altura.	
Inestabilidad local: (a) ilustración de cómo una parte local de muro, puede volverse inestable, si el patrón de grietas origina la formación de un bloque aislado susceptible de colapso; y (b) daño por flexión fuera del plano, a media altura.	

Continuación de la figura 34.

<p>Las ilustraciones muestran (a) el dibujo de grietas de corte en forma de "X" en un muro interior; (b) un patrón típico en "X" y (c) la manera en que se forman las grietas en forma de "X" como resultado de una combinación de grietas de corte ocasionadas por movimientos sísmicos alternos en direcciones opuestas.</p>	
<p>(a) Ilustración de desplazamiento vertical hacia abajo y horizontal de una porción de muro en esquina, (b) el modo en que ocurren grietas verticales en muros fuera del plano en las intersecciones con muros perpendiculares en el plano.</p>	
<p>Ilustración que muestra la forma en que una combinación de grietas de corte y de grietas de flexión puede dar como resultado el desplazamiento o el colapso de esquina.</p>	

Continuación de la figura 34.

<p>Ilustración de grietas que se originan en puntos de concentración de esfuerzos: (a) grietas que aparecen primero en las esquinas superiores de la abertura de una ventana, seguidas por grietas en las esquinas inferiores; y (b) grietas en esquinas superiores de una abertura de puerta.</p>	
<p>Ilustración que muestra la manera en que los daños ocasionados por la humedad pueden ocasionar la formación de un plano de debilidad a lo largo del cual una porción de muro puede deslizarse.</p>	
<p>Flexión fuera del plano de muro portante.</p>	

Fuente: TOLLES, Leroy., KIMBRO, Edna; GINELL, William. *Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización sismorresistente de estructuras históricas de adobe*. p. 58-68.

## **2.5. Limitaciones de la filosofía del diseño estructural de la época colonial**

Se observa que muchas de las edificaciones coloniales que existen en Guatemala conservan su estabilidad estructural hoy día y han soportado el paso del tiempo y de eventos sísmicos, pero, como se mencionó anteriormente, suponer que porque una estructura ha subsistido todo este tiempo es prueba suficiente de que es segura y estable es una creencia alejada de la realidad. Los constructores de la época eran excelentes en lo que hacían, pero la filosofía de la época tenía limitaciones que se pueden evaluar tomando en cuenta los conocimientos actuales sobre diseño estructural. Se pueden reunir las limitaciones de la filosofía del diseño estructural de la época colonial en los siguientes aspectos:

### **2.5.1. Tecnología**

La tecnología y metodología constructiva moderna permite analizar, diseñar y crear estructuras formadas por arreglos de elementos lineales (como columnas y vigas), planos (como muros o losas), fácilmente agrupados en retículas en dos o tres dimensiones, pero el aspecto principal que incluso hoy limita de las herramientas comunes de análisis para las edificaciones coloniales, es la baja resistencia a esfuerzos de tensión de los materiales empleados, lo que da lugar a agrietamientos y separación entre los elementos.

En las edificaciones coloniales no existe una continuidad en toda la estructura, requisito que se busca en las estructuras modernas. La continuidad en una estructura implica uniones rígidas y capaces de transmitir esfuerzos de tensión y de flexión.

Se sabe que varios elementos de las edificaciones coloniales sólo pueden transmitir eficientemente fuerzas de compresión y sus apoyos son simples, y esas son limitantes para un comportamiento estructural aceptable, pero estos estudios no estaban tan avanzados en la época colonial, los constructores, arquitectos y maestros mayores basaban su experticia en la experiencia, y en el ensayo y error.

Un factor determinante en la adquisición de nuevos conocimientos fueron los movimientos sísmicos. Guatemala se encuentra ubicada en una zona sísmica de alta actividad lo que, durante la época colonial y años posteriores, propició la adquisición de experiencia a partir de la observación de las fallas presentadas en distintas edificaciones, además que el sismo del 4 de febrero de 1976 dejó al descubierto fallas (ver figura 35), que aportarían al estudio del comportamiento estructural de las edificaciones coloniales en Guatemala.

Figura 35. **Colapso de muro en Antigua Guatemala, lado oriente del Palacio de los Capitanes Generales**



Fuente: Página de Facebook. La Antigua Guatemala.

<https://www.fb.com/LantiguaGuatemala/photos/pcb.127508535312900/127507848646302/?>

Consulta: 01 de junio de 2020.

Cada catástrofe sísmica pone en evidencia el mal funcionamiento de un edificio y la necesidad de intervenir todas aquellas estructuras que han sido diseñadas con un criterio de normativa antiguo o, más aún, que han sido construidas antes de que existiera una normativa que regulara el diseño. El concepto de vulnerabilidad sísmica es indispensable en estudios sobre riesgo sísmico y para la mitigación de desastres por terremotos.

### **2.5.2. Arreglos y tipos de materiales de construcción**

En las estructuras modernas se busca comúnmente utilizar un solo tipo de material puesto que tienen propiedades mecánicas uniformes, esto permite, hasta cierto punto, obtener un comportamiento deseado bajo cargas o fuerzas inducidas, pero los materiales utilizados en las edificaciones coloniales eran de distintos tipos, estaban apilados o arreglados de maneras diversas y varían en sus propiedades mecánicas. Los análisis indican que los elementos estructurales de la época tienden a mostrar un comportamiento no lineal por las tensiones inducidas en las secciones transversales que terminan en el agrietamiento.

### **2.5.3. Diseño estructural**

En la actualidad se presentan muchos conocimientos y técnicas para el diseño estructural de edificaciones; métodos exactos, aproximados y de energía ayudan a resolver con un alto grado de precisión las formas más complejas de modelos tomando en cuenta casi cualquier fuerza que pueda afectarlos, pero en la época colonial las técnicas y criterios de diseño se basaban en proyecciones geométricas que se guardaban con los años, adicional a esto la experiencia constructiva utilizada en otros lugares ayudaba a los constructores a tener una idea aproximada de los materiales y metodología constructiva a utilizar.



Se ha dicho que cualquiera sea el método de construcción, material o la forma de una edificación colonial, el comportamiento estructural se rige por los mismos principios de la mecánica estructural de la época actual, pero hay ciertos principios de análisis que se han perfeccionado para estructuras modernas y son indistintamente aplicables en edificaciones de tipo colonial o histórico por el mismo hecho que los principios generales de diseño de época mejoraron y variaron.

### **3. METODOLOGÍA DE LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**

#### **3.1. Criterios generales utilizados por profesionales para realizar una inspección y análisis visual de edificaciones coloniales**

Muchos de los profesionales han enfocado su análisis en edificaciones concretas, otros han participado en la intervención o proceso de conservación de varios monumentos o sólo de algunos elementos propios de la edificación. No existe un manual o guía concreta con la que una edificación colonial puede evaluarse e inspeccionarse, pero siempre hay criterios que los profesionales toman en cuenta para realizar su trabajo.

De acuerdo con lo indicado en una entrevista realizada con el Arq. Norman Muñoz, Conservador de la Antigua Guatemala, la manera de evaluar una edificación colonial tiene su base en la observación del entorno inmediato, de la topografía, de la ubicación respecto de otras edificaciones y del uso que se le pudo dar a la edificación en su época. Durante la entrevista él hizo énfasis en cómo podrían determinarse las causas de fallas en elementos (muros, columnas u otros), no viéndolos como conjunto, sino de manera separada. Mencionó también que, la inspección de una edificación la empezaría al observar los elementos dispersos y no arreglados que se encuentran sobre el suelo; el análisis e inspección es sencillo, las causas de porqué muchos de los elementos estructurales se encuentren ahí actualmente podría deberse a los múltiples sismos y terremotos, o que a partir de ellos se hayan provocado grietas o fisuras y estas propiciarán el colapso del elemento.

Por ejemplo, si se revisara un muro, hay muchas cosas que pueden observarse: al momento de llegar al lugar se podría observar erosión que podría tener varias causas tales como vandalismo, destrucción intencionada, o por la misma acumulación de suelo a la par del muro, puesto que cuando se impregna de agua de lluvia esta tiene que salir por algún lado, y generalmente el muro actúa como una esponja y eso puede provocar el deterioro del mismo por humedad. Hay plantas también que crecen sobre o a los lados de un muro y sus raíces puede penetrar profundamente en él lo que puede ocasionar grietas.

Respecto de las grietas, el arquitecto también comentó que es importante ver la trayectoria de las mismas; por lo regular la construcción de los muros se realizaba colocando mampuestos y arreglándolos por bloques, es decir, se colocaban rocas hasta cierta altura, luego rafas de ladrillo y así se repetía hasta encontrar una altura de muro deseada, entonces dependiendo de la forma de la grieta así podría determinarse las causas del fallo en el muro.

En La Antigua Guatemala no existía una cantera de la que se podría extraer indefinidamente rocas para construir el elemento de un solo tipo de material, por lo que muchas veces varias partes del elemento tiene combinación de materiales como roca, tierra o ladrillo.

En algunos muros se pueden observar boquerones o agujeros, es decir que el muro tiene continuidad vertical o horizontal y sin embargo, hay un espacio que se ha desplomado o deteriorado. Este espacio probablemente estaba construido con un método o material distinto, más noble que el resto del muro, ya sea porque no existía el material suficiente para terminar esa parte o bien porque se cambió el uso inicial de la edificación o de algún espacio dentro de la edificación.

Cuando se realiza una inspección, la cimentación también tiene un papel importante. De acuerdo con lo indicado por el arquitecto Muñoz, existen

edificaciones en las cuales, a nivel del suelo, se observa erosión y pérdida de la sección que tenía en un inicio, a veces esta misma erosión continúa hacia abajo, en la cimentación y esto incrementa la probabilidad de un colapso ante algún evento sísmico.

Para un análisis visual también es importante observar de qué manera se sostiene el elemento estructural, si es por masividad (como la mayoría de los elementos) o si es que estaba amarrado a otros elementos y estos le daban soporte adicional.

Una inspección y análisis visual, según el arquitecto, sería como realizar un diagnóstico médico, tener en cuenta sus antecedentes, sus patrones, su estado actual y su posible reacción frente a eventos telúricos. Hay que evaluar valores intrínsecos y extrínsecos necesarios para generar un análisis en base a la inspección visual.

En una entrevista con el Arq. Hairo Miche, quien es uno de los profesionales del Departamento de Restauración del Consejo Nacional para la Protección de la Antigua Guatemala, relató su opinión acerca de las inspecciones visuales que él ha realizado en varias edificaciones e hizo énfasis en las fallas que pueden observarse en las mismas. Ha participado de la restauración del Convento de Santa Teresa, ubicado al nororiente de La Antigua Guatemala. En él logró observar distintas fallas relacionadas a movimientos sísmicos. Una de las más representativas era falla con una forma curva que se extendía a lo largo de una pared en el segundo nivel del convento.

Esta falla “columpio” se debió al empuje del sismo sobre una de las caras longitudinales en el muro y, dado que el mismo está restringido por sus extremos, la fuerza se concentró a lo largo en forma cóncava.

Otro aspecto a considerar es la tipología de las estructuras. Hay muchas fallas que se produjeron por una ordenación inadecuada de los elementos. Un elemento muy distintivo en la construcción de las edificaciones coloniales fue el “calicanto”, es decir, muro de roca y ladrillo. En este caso, el muro estaba compuesto por una acumulación de roca que llegaba hasta cierta altura y luego se colocaba una cantidad de hiladas (rafas) de ladrillos con una separación establecida entre hiladas (cisa). Estas hiladas actuaban como separación de bloques en el muro y a la vez como nivelación para continuar con el levantamiento de pierda dado que la misma siempre es de forma irregular y no es posible obtener superficies niveladas con un muro compuesto sólo de roca.

Las hiladas de ladrillo actúan como la solera de un muro común, y generalmente se mantenía una separación de noventa centímetros entre cada una. Muchas de las fallas se producían en las mismas hiladas de ladrillo y la fisuración se propagaba entre el aglomerante que sostenía las rocas. Estas fallas se debían a la separación inadecuada de la cisa lo que provocaba inestabilidad y poca consistencia al soportar los esfuerzos cortantes producidos por los sismos.

Otro aspecto a considerar es la cubierta, puesto que esta les provee un amarre a los muros y permite la perpendicularidad y verticalidad de los mismos, en el caso del convento mencionado, esta no existía, entonces los muros no eran completamente verticales y su inclinación depende de su propio peso, su ubicación y alguna fuerza externa que pudiese haber modificado su estado inicial.

El arco, otro elemento distintivo en la tipología estructural de la época, fue uno de los elementos que mejor respondía ante los sismos. El arco, como tal, tenía la función de anclar y sostener elementos adheridos al mismo. En el

convento no se encontró ninguna falla total de un arco más sí fisuración y agrietamiento.

Cuando varios arcos se añaden y luego hay una falla, se produce un desfase entre la verticalidad de las columnas más no del arco en sí. Cuando existe una bóveda y es de medio cañón generalmente la falla se produce en el centro. Hay un agrietamiento a lo largo de la misma y para restaurar el elemento es necesario un apuntalamiento.

La falla en las bóvedas se producía por la concentración de esfuerzos en el centro del eje longitudinal y por el propio peso de las mismas, por ello existen bóvedas que podían tener hasta sesenta centímetros de grosor o más, dependiendo de la extensión.

En otra entrevista con el Arq. José Leonel López, quien laboró como director del Instituto de Antropología e Historia (IDAEH), tiene experiencia en restauración de monumentos y sostiene que para realizar un análisis es necesario separar el análisis visual en dos fases, la primera es visual y la segunda es investigativa.

Recopilar la información del lugar a través de una recopilación de los datos históricos del edificio es fundamental para realizar un análisis. Aspectos como la topografía del lugar, el uso histórico y las intervenciones realizadas a la fecha son parte importante para determinar el estado de una edificación histórica.

Actualmente la intervenciones realizadas son visualmente evidentes, el Consejo Nacional para la Protección de la Antigua Guatemala (CNPAG), tomó la iniciativa de marcar las partes intervenidas dejando un espacio delimitado con un repello de cemento y de aproximadamente medio metro cuadrado de área para

indicar que es un área intervenida, o bien la intervención se hace con ladrillo, entonces es más sencillo notar que la tipología cambia (por ejemplo, cuando se interviene un muro que está hecho de tapial o roca, la intervención con ladrillo es notoria y es la evidencia de que se ha modificado el elemento).

El arquitecto también comentó que para realizar cualquier tipo de evaluación se debe tomar en cuenta la forma y la simetría de la edificación y, en su opinión, las estructuras deberían clasificarse de acuerdo a su uso. Si se pudiera tomar un orden para realizar una inspección, el primer paso es determinar la tipología de la edificación a evaluar (monumento, institucional, ermita, templo, residencia, claustro, entre otros).

El arquitecto Osmin Maza, director del proyecto de restauración del Palacio de los Capitanes Generales en La Antigua Guatemala dio una breve pero acertada forma de realizar una inspección visual. Lo primero que habría que hacer es realizar un reconocimiento del sistema constructivo y la tipología de la estructura, luego hacer un registro de los daños, alteraciones y deterioros y dentro de esto identificar los agentes que provocaron los daños y a partir de esto se puede realizar un dictamen o informe del diagnóstico.

Siempre es necesario recopilar la información histórica suficiente para entender el nivel de importancia de las edificaciones puesto que algunas fueron construidas para fines culturales, otras para funciones administrativas y otras para fines de comercio, salud o educación.

El Ingeniero Julio César Armas Torres tiene perspectivas que comentar en relación a la ingeniería civil en el campo de la conservación y del análisis de las edificaciones históricas. Para él, en la intervención de un monumento histórico deben participar un arquitecto, un arqueólogo y un ingeniero donde el arquitecto

manifieste el valor arquitectónico, las soluciones espaciales, la importancia de los elementos y el uso digno del edificio, en base al informe de investigación histórica proporcionado por el arqueólogo, quien conoce los hechos históricos que pudieran trascender en él.

Para realizar una adecuada inspección visual, el ingeniero recomienda que se debe efectuar un reconocimiento global del edificio y establecer un seguimiento en los sectores a fraccionar, según la magnitud del mismo. Es conveniente realizar simultáneamente un levantamiento fotográfico que permita auxiliar al momento de dibujar principalmente en las elevaciones. También debería realizarse un registro del estado actual: en éste se debe indicar las grietas y todas las diferentes alteraciones que manifieste.

Para establecer exactamente las diferentes etapas constructivas que han contribuido al deterioro del edificio, algunas veces es necesario realizar calas o testigos en muros a nivel de repello y así establecer principalmente las razones de las grietas que no muestran una razón lógica de falla, pero esto supera los límites de la inspección visual.

El ingeniero argumenta que la exploración es resultado de la realización visual, que permite establecer con claridad los resultados deseados, hasta una excavación arqueológica, con los respectivos análisis de laboratorio e interpretación de datos gráficos e históricos; todo esto dependiendo del grado de complejidad que muestre el problema a tratar.



### **3.2. Aspectos de la metodología de inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala**

La conservación, consolidación y restauración del patrimonio arquitectónico requieren un enfoque multidisciplinario y el campo de la ingeniería aporta un criterio crucial para lograrlos

El valor de un edificio histórico no reside sólo en la apariencia de sus elementos individuales, sino también en la integridad de todos sus componentes, considerados como un producto único de la tecnología constructiva específica de su tiempo y lugar.

El análisis visual ingenieril se basa en información histórica y análisis cualitativos y cuantitativos. El análisis cualitativo parte de la observación directa del daño estructural y el deterioro del material, así como de la investigación histórica y arqueológica, mientras que el análisis cuantitativo precisa ensayos de materiales y estructurales, monitorización y análisis de la estructura. El análisis cuantitativo queda fuera del objeto de esta investigación.

Los aspectos a considerar para la inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala se concentrarían en los siguientes enunciados:

#### **3.2.1. Investigación histórica y análisis arquitectónico**

Es necesario hacer conciencia de la importancia de adoptar un enfoque integral para la preservación de edificios.

Es prácticamente imposible crear estrategias de adecuación que preserven la edificación original sin contar con información específica sobre dicha construcción, y sobre sus características arquitectónicas e históricas. Se precisa información sobre su concepción, sobre las técnicas que se usaron en su construcción, los procesos de daño y deterioro y las alteraciones que le han afectado y, finalmente, sobre su estado actual.

La construcción religiosa, doméstica y pública desarrollaron tipologías constructivas con características particulares que fueron evolucionando hasta establecer las formas adoptadas que hoy en día se aprecia; en esa evolución existen tendencias regionales que reflejan influencias políticas, económicas, sociales y geográficas que fueron factores determinantes en la forma de las edificaciones coloniales, y estos cambios pueden conocerse incluso desde la recopilación de datos históricos de dichas edificaciones.

El objetivo del estudio histórico es entender la concepción y la importancia del edificio, las habilidades y técnicas utilizadas en su construcción, los cambios que se hayan producido tanto en la estructura como en su entorno y finalmente los sucesos que puedan haber causado algún daño. Los documentos usados para ello deben quedar adecuadamente registrados.

Cabe recordar que los documentos que se utilizan habitualmente han sido elaborados para fines distintos de los de la ingeniería de estructuras y, por tanto, puede que contengan información técnica que sea incorrecta u omita o falsee hechos o sucesos importantes desde el punto de vista estructural.

### **3.2.2. Alcance de la inspección**

Siempre, antes de recopilar los datos visuales e históricos específicos, debe realizarse un reconocimiento global del edificio y/o establecer el foco de la inspección.

Esto es necesario debido a que algunas edificaciones coloniales son una integración de varios elementos o tipos, por ejemplo, algunos monumentos integran un convento o monasterio, un templo y una casa colonial, otras edificaciones no son un conjunto sino un elemento aislado, un arco, un muro, un puente, un acueducto; la variedad exige que se especifique qué se desea inspeccionar y delimitarlo.

### **3.2.3. Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación**

En este apartado se abarcará todo aquello que pueda utilizarse como evidencia visual registrable, es decir, puede ser la elaboración de un croquis del área o edificación, fotografías, dibujos, planos existentes o incluso levantamientos topográficos.

De varias edificaciones coloniales ya existen planos arquitectónicos y estructurales modernos disponibles en distintas plataformas digitales, en instituciones gubernamentales, municipales o en documentos de carácter investigativo, de otras no se tendrá un plano actualizado sino uno de alguna época anterior, y también se pueden encontrar con edificaciones sin registros de ningún tipo.

No debe descartarse la posibilidad de hacer levantamientos topográficos del estado actual siempre que existan los recursos, financiamiento y el personal calificado para efectuarlos porque se tendrá una mejor concepción del espacio, de las dimensiones y del estado actual de la edificación.

Existen varios métodos y tácticas para realizar un levantamiento topográfico en un monumento histórico, los tres más comunes son los siguientes: levantamiento topográfico sólo con teodolito (utilizando un polígono base y radiaciones), levantamiento topográfico por medio de cinta métrica (usando el método de triangulaciones), y el levantamiento topográfico combinado donde se hace uso de los dos métodos anteriores, según convenga a las características y dificultades que manifieste el edificio para su representación gráfica. Existen más métodos, y el criterio de cuál se utilizará dependerá del profesional encargado de la inspección. La combinación de metodologías suele dar buenos frutos si se aplican de manera adecuada. Nuevas tecnologías, como los drones y la fotogrametría 3D tan tomado auge en la actualidad.

Los drones son aparatos pilotados por control remoto que pueden volar por medio de un controlador de vuelo, también son conocidos a nivel profesional por el nombre de RPAS (*Remotly Pilot Aircarf System*).

Las aportaciones fundamentales del dron a la ingeniería estructural de edificios históricos residen en la posibilidad observar y documentar, desde puntos de vista difíciles, los diferentes elementos estructurales, forma, geometría y estado de las edificaciones. En el mismo dron se pueden realizar diferentes acciones dependiendo la herramienta colocada en el mismo. La más común es una cámara fotográfica de alta resolución y amplio rango, que podrá realizar instantáneas, y tomar secuencias de vídeo.

“También es muy habitual dotar a los drones de cámaras de espectro no visible, como cámaras térmicas (infrarrojas) así como escáneres láser 3D”.<sup>24</sup>

La fotogrametría 3D se basa en el fenómeno por el cual se pueden reconstruir estructuras tridimensionales a partir de imágenes 2D debido al cambio que muestran los elementos al cambiar el punto de vista del observador. El conjunto de posiciones de las cámaras junto con las propias fotografías se utiliza para la siguiente fase que es la construcción de la geometría del modelo, es decir, la construcción de la malla de polígonos en 3D que definen la superficie del modelo. Por último, se puede crear, de forma automática, su textura fotorrealista para obtener el modelo 3D, de donde se pueden obtener vistas ortográficas.

#### **3.2.4. Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial**

Independientemente de a qué disciplina pertenezca, el especialista responsable de esta observación deberá tener experiencia en identificar fallas, daños estructurales, métodos constructivos, materiales de construcción, marcas de herramientas, la forma en que se han diseñado antiguas técnicas y detalles constructivos.

La observación directa (en campo) de la estructura constituye una fase esencial de la inspección visual; su finalidad reside en proporcionar una comprensión inicial de la estructura que, a su vez, permita enfocar apropiadamente las investigaciones posteriores. Sus objetivos principales son identificar el deterioro, daños y los efectos del entorno sobre el edificio.

---

<sup>24</sup> NAVARRO, Pablo., PIQUERAS, Teresa. y VERDIANI, Giorgio. *Drones para el levantamiento. Aplicación para la documentación de las torres del litoral valenciano.* p. 4.

El estudio de las alteraciones estructurales comienza con el levantamiento de los daños visibles. Durante este proceso, la interpretación de la información recogida debe guiar el levantamiento, de forma que el encargado de la inspección pueda hacerse una idea sobre el comportamiento estructural, con lo que, a su vez, podrá examinar más detalladamente los aspectos críticos de la estructura.

En los levantamientos de planos (cuando así sea propuesto), se deben localizar los diferentes tipos de materiales, consignando su deterioro e irregularidades estructurales, y los daños, poniendo particular atención en el cuadro de fisuras y en los fenómenos de aplastamiento. Debe tenerse en cuenta que las irregularidades geométricas pueden ser resultado de deformaciones previas, pero también pueden indicar una coincidencia entre distintas fases constructivas o modificaciones de la edificación colonial. Es importante descubrir cómo el medio ambiente o el entorno pueden estar dañando un edificio. El daño causado por intemperismo también puede acentuarse debido a un diseño original poco elaborado, por defectos de construcción (falta de drenajes, condensación, humedad creciente, entre otros), por el uso de materiales inadecuados o por deficiencias en el mantenimiento posterior.

La observación de las zonas donde se concentran los daños como resultado de compresión (zonas con aplastamientos), o de tracciones intensas (zonas agrietadas o elementos separados), y de la dirección de las grietas y fisuras, junto con una investigación de las condiciones del terreno, puede indicar las causas del daño. El arquitecto o el ingeniero que lleve a cabo la evaluación inicial del edificio podrían recomendar la eliminación siempre limitada de algunos acabados de muro, con el fin de entender el comportamiento sísmico pasado del edificio e investigar la presencia de posibles daños por humedad.

La evidencia de daño sísmico u otras condiciones, tales como humedad en la base de los muros, que pudieran afectar el comportamiento sísmico de una estructura quedan a menudo ocultas al efectuarse reparaciones superficiales, pero es necesario el conocimiento del criterio ingenieril del profesional de modo que pueda entender el comportamiento de la estructura y así identificar las posibles causas de los daños.

Las edificaciones, dependiendo de su rigidez y flexibilidad, manifiestan sus propias características de vibrar y responder. En igual forma se manifiesta el suelo. Es casi seguro que se generen por lo menos grietas durante eventos sísmicos de gran magnitud, pues los esfuerzos que estos eventos generan en las edificaciones muy probablemente excederán la capacidad de los materiales y sistemas constructivos. Al desarrollarse estas grietas, las características de respuesta dinámica de la estructura sufren cambios drásticos.

El movimiento a lo largo de las grietas cobra importancia cuando éstas se cruzan, formando segmentos independientes en los distintos elementos estructurales. De este modo, el comportamiento dinámico de una edificación colonial dañada ya no puede predecirse mediante técnicas analíticas convencionales, porque éstas pueden aplicarse sólo en modelos de respuesta elástica de edificaciones que no hayan sufrido daños.

### **3.2.5. Anotación de datos, comentarios y hallazgos de la inspección visual**

Simultánea a la observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación se procede a anotar los hallazgos.

Para los fines de esta investigación se provee una guía y un formato de evaluación denominado: Ficha para inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales, en el apéndice 1; esta última está sujeto a que se amplíe, sustituya o modifique de acuerdo a las necesidades del investigador o de quién esté a cargo de la inspección.

Hay instituciones en Guatemala, a quienes les compete el ámbito de las edificaciones históricas y coloniales, como la Dirección General del Patrimonio Cultural y Natural DGPCYN el Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres en América Central y República Dominicana CEPREDENAC, la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres CONRED o el Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala CNPAG que ya manejan algún formato para la evaluación o inspección de edificaciones coloniales o patrimoniales, el formato no necesariamente incluye una ficha como la provista en esta investigación sino es más bien un informe técnico.

Otra referencia para conocer un formato de anotación de datos de una inspección visual de una edificación, desde un punto de vista estructural y sísmico, lo ofrece la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica AGIES a través de la Norma de Seguridad Estructural NSE 6-2018, Evaluación y Rehabilitación De Obras Existentes en su Anexo B y C, aunque este formato no es específico de edificaciones patrimoniales o coloniales.

El encargado de la de la edificación definirá, al final, el formato, la extensión de la investigación y la forma en que serán presentados los datos recabados. No debe obviarse el carácter ingenieril en ningún aspecto y se recomienda incluir la información gráfica relevante que ayudará a la comprensión del informe.



### **3.2.6. Análisis de resultados**

En este apartado se analizan los hallazgos, se ordena la información recabada y se redacta el informe teniendo en cuenta que esta inspección puede ser utilizada previamente a los procesos de conservación, consolidación, integración o mantenimiento de la estructura. El análisis pasa por varias fases, desde la identificación de las características del sistema estructural hasta identificar las causas del daño y del deterioro basándose en los datos obtenidos a partir de la inspección.

Un análisis correcto es indispensable también para evaluar adecuadamente el nivel de seguridad y tomar una decisión racional respecto a las medidas de tratamiento que deben aplicarse a una edificación; la integración de los conocimientos de experto o profesional a cargo deberá verse reflejada en la identificación de las características estructurales, el análisis del comportamiento sísmico y las consideraciones en relación a la falla de los elementos.

## **4. GUÍA PARA LA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE EDIFICACIONES COLONIALES EN GUATEMALA**

### **4.1. Aspectos generales**

Una guía proporciona preceptos para encaminar o dirigir cosas, en este capítulo se especificará lo relacionado con la inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales en Guatemala.

Para conocer una estructura y poder efectuar un análisis visual se precisa información sobre su concepción, sobre las técnicas que se usaron en su construcción, los procesos de daño y deterioro y las alteraciones que le han afectado y, finalmente, sobre su estado actual. Normalmente este conocimiento se puede conseguir a partir de los siguientes pasos:

- Definición, descripción y comprensión de la importancia histórica y cultural del edificio.
- Descripción de los materiales y las técnicas constructivas originales.
- Investigación histórica que abarque la vida completa de la estructura y que incluya tanto las modificaciones de su forma como cualquier intervención estructural anterior.
- Descripción de la estructura en su estado actual que incluya identificación de daños, deterioro y posibles fenómenos progresivos.
- Descripción de las acciones implicadas, del comportamiento estructural y los tipos de materiales.

## **4.2. Guía preliminar de análisis e inspección visual ingenieril de edificaciones coloniales**

Esta guía se basa en la integración de los aspectos de la metodología de inspección y análisis visual ingenieril vistas en el capítulo anterior, en los aspectos filosóficos del diseño estructural de la época, consideraciones en relación a la falla y en las disposiciones que el país confiere para evaluar edificaciones.

Esta guía estará sujeta a cambios a partir de las experiencias que se practicarán en Antigua Guatemala.

### **4.2.1. Delimitación e información del alcance de la inspección de la edificación colonial**

La delimitación del alcance abarca tanto lo físico como lo legal. En campo es necesario identificar el o los elementos estructurales, el conjunto o la parte de la edificación a la que se practicará el análisis visual ingenieril.

El alcance también podrá estar condicionado por los permisos de acceso al lugar que se le confieran al profesional o institución encargada de la inspección, para fines prácticos, es necesario asegurarse que el ingreso a la edificación colonial sea posible para su observación directa. Para conocimiento del profesional acerca de qué monumentos están protegidos o a cargo de instituciones gubernamentales, los monumentos históricos de Guatemala están registrados dentro del Compendio de Leyes Sobre La Protección Del Patrimonio Cultural Guatemalteco, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura UNESCO y el Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala.

#### **4.2.2. Investigación histórica y estructural**

Recopilar la información histórica de la edificación colonial representa un aspecto básico del análisis dado que el conocimiento de la misma le confiere al profesional una base para definir, identificar, diferenciar y recopilar datos de carácter ingenieril.

Esta fase deberá describir la importancia histórico-arquitectónica de complejos de edificaciones, de edificaciones individuales y de elementos, detalles, espacios y volúmenes individuales de edificaciones. En ella deberían identificarse todos los elementos de distinción que definan el carácter estructural de las edificaciones.

Es esta investigación se deberá tratar de establecer la secuencia de construcción de los complejos de edificaciones y de las edificaciones individuales, documentando las fechas y las diferentes técnicas constructivas, las ampliaciones y remodelaciones. Esta tarea conllevará tanto investigación en archivos como de manera visual, con el fin de inventariar y evaluar las diferentes características estructurales de un edificio.

Entre los tipos de investigación a realizar están la documentación gráfica (fotografías históricas, pinturas, dibujos, esbozos, planos, entre otros), la documentación escrita (recuentos históricos descriptivos, artículos aparecidos en periódicos, especificaciones, permisos de construcción, contratos, entre otros), así como los registros de reparación y mantenimiento, incluyendo los reportes de los mismos (en caso de que exista ese acceso a la información). Deben valorarse las fuentes en cuanto a su fiabilidad como medio para reconstruir la historia de la construcción. Es esencial interpretarlas cuidadosamente para obtener datos confiables sobre la historia estructural del edificio.

#### **4.2.3. Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación**

Como se especificó en la parte metodológica es necesario tener datos visuales de la edificación colonial, estos datos apoyarán a identificar, delimitar, observar y definir los aspectos ingenieriles que sean de importancia para el análisis visual.

#### **4.2.4. Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial**

Esta evaluación estará a cargo de un equipo integrado, por lo menos, por dos personas, siendo una de ellas Ingeniero Civil.

El otro evaluador deberá poseer conocimiento en edificaciones similares a las que se están evaluando, pudiendo ser estudiantes de ingeniería o arquitectura, que hayan completado los cursos del área de estructuras, materiales y construcción, y que tengan experiencia práctica en construcción, esto, para asegurar que el criterio de inspección utilizado alcance los objetivos de esta investigación.

##### **4.2.4.1. Primera fase: Inspección global de la edificación**

- Inspeccionar alrededor de la edificación
- Examinar la estructura para irregularidades verticales, forma y en planta
- Buscar grietas en puertas, ventanas, uniones de muros o techos
- Buscar fracturas en la cimentación o en las paredes expuestas
- Identificar intemperismos, actos de vandalismos o destrucción intencional

#### **4.2.4.2. Segunda fase: examen del terreno**

- Examinar el suelo por presencia de grietas, deformaciones.
- Examinar evidencias movimientos verticales de suelo, socavamientos o hundimientos.
- En áreas de laderas, verificar la existencia de deslizamiento o caída de escombros.
- Examinar si en la zona existen fallas geológicas locales.

#### **4.2.4.3. Tercera fase: inspección de los datos estructurales**

- Evaluar el sistema estructural principal.
- Evaluar los materiales constructivos de la estructura.
- Identificar el sistema de resistencia de cargas y los elementos que influyen en ese sistema.
- Realizar la inspección de los elementos expuestos del sistema de cimentación, o pisos inferiores (criptas).

#### **4.2.4.4. Cuarta fase: inspección de los daños y fallas estructurales**

- Examinar grietas y fisuras. Las fisuras son todas aquellas aberturas incontroladas que afectan solamente a la superficie del elemento o a su acabado superficial, y las grietas son las que afectan a todo su espesor.
- Identificar los daños existentes.
- Examinar los colapsos y vulnerabilidades estructurales.

#### **4.2.5. Completar la lista de revisión y generar la documentación de la inspección visual ingenieril**

Para cualquiera de los fines que la inspección visual aplique se deberá reunir la información recopilada de la misma junto con el dictamen del análisis.

En general, la documentación incluirá la investigación histórica y estructural, los datos visuales, y la información recopilada en cada una de las fases de la inspección. Como se mencionó en el capítulo anterior, en esta investigación se presenta una ficha para inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales, la cual puede adjuntarse en la documentación.

El formato digital o físico, en el que se reunirá la información, estará sujeto a las disposiciones propias del profesional o institución encargada y a los aspectos de la metodología mencionados en el capítulo anterior.

#### **4.2.6. Análisis de los hallazgos**

El análisis es aspecto de la metodología en el que se pueden integrar los conocimientos de los antecedentes de la edificación, los aportes de la inspección visual y las consideraciones estructurales en base al criterio estructural y profesional.

Deberán estar bien identificados los aspectos estructurales, los daños, y consideraciones en relación a la falla para redactar el informe final que pueda aportar en las decisiones y criterios de los procesos de consolidación, integración o mantenimiento de la estructura y aquellos que afecten también la estabilidad de la edificación.

### **4.3. Aplicación del análisis e inspección visual en 4 edificaciones coloniales de la Antigua Guatemala**

En este trabajo, la visita a las 4 edificaciones coloniales ubicadas en la Antigua Guatemala serán la base para redactar una guía para realizar una inspección y análisis visual, desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, de las edificaciones coloniales en Guatemala.

#### **4.3.1. Convento Santa Clara**

- Datos históricos

Fue edificado en el sitio donde anteriormente existió un beaterio bajo la misma advocación, fue habitado por monjas de la Segunda Orden Franciscana o Hermanas Pobres de Santa Clara. La fundación tuvo lugar el 14 de enero 1700, las monjas provenían de Puebla, México.

El templo fue inaugurado en 1715, dos años más tarde los sismos de San Miguel le causaron severos daños; las reparaciones y mejoras estuvieron a cargo del Arquitecto Mayor Diego de Porres, concluyéndolas el 11 de agosto de 1734.

En 1773 la estructura se vio sumamente dañada por movimientos sísmicos dejándola al borde del colapso. El edificio del convento tiene componentes sólidos y es de los más grandes en La Antigua Guatemala. El claustro estaba rodeado de una doble arquería de proporciones simétricas. El convento como tal es un conjunto anidado de varias partes como el templo, el confirmatorio, la recepción, el claustro, la sacristía, cocina, habitaciones para clases y trabajo, jardines, púlpito, coro alto, sala común, confesionario, entre otros.



- Histórico de evaluaciones y restauraciones
  - o En el año 2012 se llevó a cabo la elaboración de primer arco de templo, integración de pechinas, vigas y fundición de solera armada e impermeabilización de arco.
  - o En 2013 se llevó a cabo la elaboración de segundo arco de templo, integración de pechinas, vigas y solera armada se concluyó con la fundición de dichas soleras y la impermeabilización del arco. Integración de piso de baldosa de arcilla artesanal (conocida por los constructores como barro), en área de antigua enfermería. Consolidación e integración de repellos faltantes en muro perimetral sobre la 7ª calle.
  - o En 2014 se llevó a cabo la elaboración de tercer arco de templo, integración de pechinas, vigas, solera armada y fundición de las mismas y para finalizar la impermeabilización del arco. Consolidación y reposición de materiales homogéneos y repellos en zócalo y muro perimetral sobre la 6ª calle en ambas caras (interna y externa de la primera fase), más cajuelas, anclajes verticales y dos soleras en el nuevo tramo de levantado de roca cantera más rafas de ladrillo e integración de albardón. Consolidación y reposición de materiales homogéneos en dintel de ventana octagonal de la fachada oriente del templo.
  - o En 2015 se finalizaron las pechinas faltantes de templo. Elaboración e integración de baranda de hierro liso para protección de flores de claustro central.

- o En 2015 hubo continuación de la consolidación y reposición de repellos zócalo y muro perimetral sobre la 6ª calle tanto en cara interna como externa (segunda fase), e integración de albardón. Integración de repellos faltantes y consolidación de aplanados originales en muro oriente anexo a antigua cocina, integración de material de transición y elaboración de cajuela. Elaboración de mueble de madera de conacaste para cobranza ingreso de turista a monumento.
- o En 2016 se continuaron los trabajos para la integración de repellos faltantes y consolidación de aplanados originales en muro oriente anexo a antigua cocina, integración de material de transición, elaboración de cajuela y fundición de solera armada. También se continuó de la tercera y última fase de la consolidación de grietas, integración de repellos en zócalo y muro perimetral sobre la 6ª calle. Remozamiento de puertas, portones y servicios sanitarios. Los trabajos de mantenimiento del monumento como extracción de maleza y macro flora, impermeabilización de piso baldosa se realiza de forma anual.
- Delimitación del alcance de la inspección de la edificación colonial

El área a inspeccionar será el templo de Santa Clara que se encuentra dentro del conjunto. El altar está orientado al norte y tiene dos entradas, actualmente selladas al público, las entradas están ubicadas en muro lateral poniente, la entrada es por medio de una puerta principal al convento y funciona como monumento turístico. El Convento de Santa Clara está a cargo de la dirección y administración por parte del Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala CNPAG.

- Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación

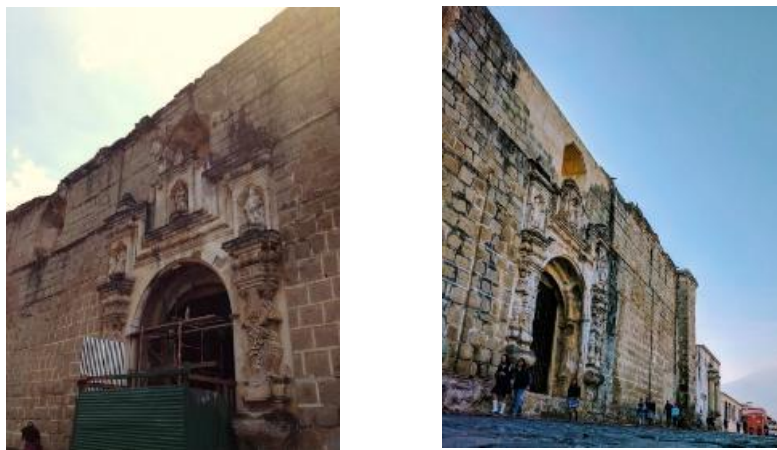
Las figuras 36 a la 46 forman parte del conjunto de datos visuales que apoyan la inspección y el análisis visual ingenieril de la edificación.

Figura 36. **Borde de bóveda, área de Templo de Santa Clara**



Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Muro poniente, Templo Santa Clara 2012 y 2019**



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Desprendimiento de material, Santa Clara**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Arcos, piso e interior del templo Santa Clara**



Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Coro alto y reparaciones del CNPAG**



Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Agrietamiento y desprendimiento de material**



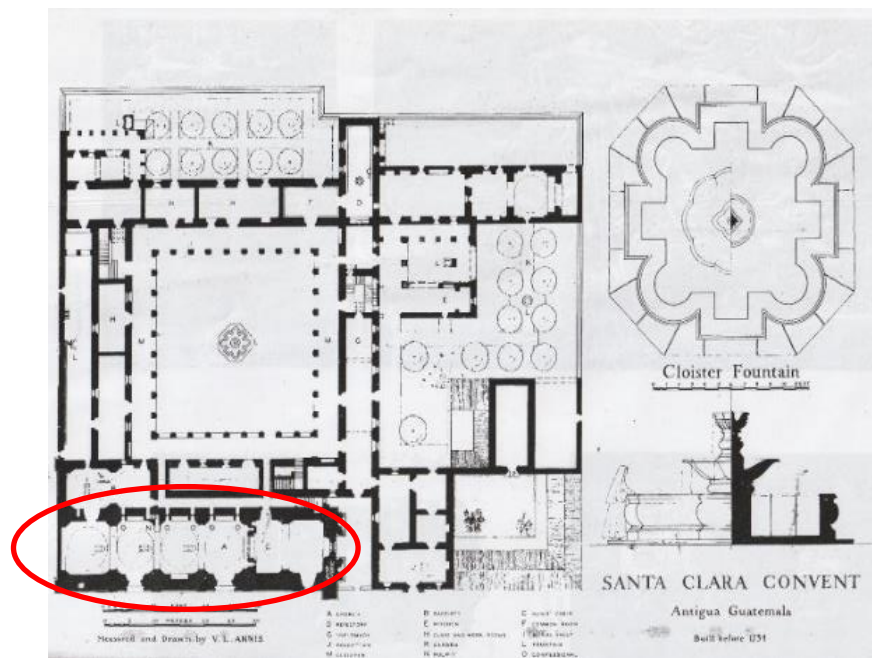
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Agrietamiento en vano superior poniente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Ubicación del templo en la planta del Convento Santa Clara**



Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de La Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 196.

Figura 44. Ubicación del Convento Santa Clara



Fuente: Conozca La Antigua Guatemala. *Mapa de La Antigua Guatemala*.  
[https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa\\_de\\_La\\_Antigua\\_Guatemala.htm](https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa_de_La_Antigua_Guatemala.htm)  
 Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 45. **Vista de muro poniente del Convento Santa Clara, sobre la 2ª. Avenida Sur, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Vista de muro norte, sobre la 6ª. Calle Oriente, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.



#### **4.3.2. Convento Santa Teresa**

- Delimitación del alcance de la inspección de la edificación colonial

El monumento de Santa Teresa de Jesús está compuesto por el monasterio y el templo, de los dos se evaluará el monasterio cuyo acceso al público está regulado por el CNPAG y tiene un costo de Q. 5,00 para turistas nacionales. Hay acceso a varios puntos del convento más no al templo puesto que aún no se ha efectuado la consolidación del edificio.

El convento de Santa Teresa de Jesús funcionó como cárcel de varones desde 1940 hasta 2007 y desde entonces su rehabilitación y conservación se ha identificado y se ve plasmado en los datos históricos antes mencionados.

- Datos históricos

En 1668 el Ayuntamiento, a petición del Alcalde Ordinario Capitán José de Aguilar y Revollo, acordó solicitar a Su Majestad licencia para la fundación de un Convento de Carmelitas Descalzas, como lo deseaba el Presbítero Bernardino de Obando. En 1675 el 22 de junio se expide Real Cédula autorizando la función del Convento de Carmelitas Descalzas, bajo la advocación de Santa Teresa de Jesús.

- Etapas constructivas

En 1675 el Ayuntamiento informa que el Obispo Mañosca y Murillo, según su testamento, donó las casas de su morada para la fundación del Convento de Carmelitas Descalzas.

El Presbítero Bernardino de Obando, adquirió las casas que habían pertenecido al Licenciado Juan de Gárate y Francia Oidor de la Audiencia, destinadas para la fundación del Convento de Carmelitas Descalzas. En 1677 se considera concluido el Convento, habiéndose dispuesto para iglesia una sala del mismo.

El 17 de agosto de 1683 se inició la construcción del Templo formal del Convento, quedando concluido el 12 de abril de 1687. Annis considera como autor del Templo al Arquitecto José de Porres, señalando la similitud de los elementos empleados en éste y la Catedral. En 1717 Dimanes consignó: La iglesia que es obra fuerte no recibió lesión alguna solo un cuarto alto por estar desamparado se le hizo una rajadura en la esquina.

Sin embargo, Annis en base a un documento del Archivo Nacional informa de los daños causados por los terremotos de ese año al edificio del Convento. Annis y Markman referenciados en un documento del AGCA, mencionan que para ese año fueron construidos albergues provisionales para las monjas, según Annis en la huerta, y según Markman, en los jardines del Convento.

- o De 1737 a 1751 Juarros señala que el Obispo Pardo de Figueroa encontró el Convento muy maltratado con la repetición de temblores, por lo que lo “reforzó en parte, y en parte lo renovó”.
- o En 1751 el templo sufre daños en los terremotos del 4 de febrero.
- o En 1770 el Ayuntamiento autorizó recolectar fondos para la reparación del Convento y Templo.
- o De 1940 a 1950 fue trasladada al Convento en ruinas de Santa Teresa de Jesús, la Cárcel de hombres que anteriormente ocupaba un sector del Palacio del Ayuntamiento.

- o En 1976 sufrió daños por los terremotos del 4 y 6 de febrero: rajaduras en los muros del convento, tanto en la planta baja como en la planta alta, desplome del muro testero del templo, gran grieta en la platabanda que separa el primero del segundo cuerpo, grietas horizontales en contrafuertes del muro oriental a aproximadamente 5 metros de altura, desprendimiento de una columna en el cuerpo inferior de la fachada.
  
- Intervenciones del CNPAG
  - o En 1980 se inició con la consolidación del muro del templo en el área de los confesionarios.
  - o En 1981 hubo reposición de material. Extracción de relleno interior del Templo.
  - o En 1983 se inició con la colocación de nueva puerta de madera en el acceso al templo.
  - o En 1986 se inició con la limpieza y extracción de ripio. Registro fotográfico del convento ocupado por la cárcel de hombres.
  - o En 1991 se inició con la restauración de linternillas y bóvedas de la planta alta del convento.
  - o En 1992 se hizo reposición de materiales en contrafuertes del muro sur. Inyección de grietas del muro testero del templo. También hubo reposición de materiales en el muro norte del presbiterio.
  - o En 2001 se iniciaron trabajos de consolidación de bóvedas en sacristía, y fachada. Limpieza del templo.
  - o En 2008 se inicia la liberación de vanos tapiados, liberación de elementos en muros, limpieza del claustro.

- o En 2010 se hace liberación y limpieza de arcadas y molduras del claustro central Liberación de cerramientos de block pómez colocados por los 50 años que la cárcel de hombres ocupó dicho monumento, en la mayoría de arcadas del claustro central. Limpieza, eliminación de líquenes, hongos y plantas en la cabeza de los muros.
- o Entre 2011 y 2012 se hace la consolidación y reestructuración de los muros. Consolidación, proceso que consistió en la integración de materiales homogéneos tales como ladrillo de arcilla artesanal y roca, ambos adheridos con mezcla a base de cal quemada, y aditivos para mejorar la adherencia.
- o Entre 2013 y 2014 se inició una investigación arqueológica. Estas se realizaron en diferentes áreas claustro central y diversos ambientes adyacentes al claustro.

Claustro central, estos consistieron en la elaboración de una traza en cuadrícula de 4\*4 metros, para luego realizar las excavaciones, para que el equipo de arqueología realizara el levantamiento fotográfico y dibujo, para al final tener la identificación exacta de los vestigios encontrados en dicha área. En dicha área se encontraron vestigios de atarjeas o taujías (una atarjea es tubo de arcilla protegido de dos maneras: teja y ladrillos, ambos unidos con mezcla a base de arena y cal), que datan del siglo XVIII y siglo XX.

El hallazgo más significativo fue la localización de la base de la fuente central, forma que fuera integrada a la fuente de la propuesta. La propuesta final del claustro central fue la integración de roca tipo morlón y la fuente central a una altura mínima para no crear falsos históricos.

Otra investigación arqueológica fue el hallazgo de la posible primera área de destilado de vino, en uno de los sectores sur oriente al claustro, encontrándose elementos tales como el tanque de destilado y un horno para el proceso.

En 2015 y 2016 se hacen nuevos trabajos de investigación arqueológica, integración, consolidación en áreas de patio sur.

Los trabajos de arqueología para determinar las improntas o elementos originales del área. También se realizaron trabajos de consolidación y aquellos necesarios para garantizar la estabilidad de los elementos tales como muros, columnas, sillares de ventanas y puertas y arcadas. Integración, con materiales homogéneos como ladrillo de arcilla artesanal, roca, y la integración de la terraza española en el patio sur, con sus elementos tradicionales como zoquetes, durmientes, tendales y reglillas de madera tratada, finalizando con la colocación de la baldosa de arcilla industrial, fundición y acabado final.

Se dio inicio con la integración de la cubierta final el lado norte primera crujía, con los elementos tradicionales tales como, tijeras, artesonado de madera, lámina de fibrocemento color rojo, y teja de arcilla artesanal como acabado final.

- Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación

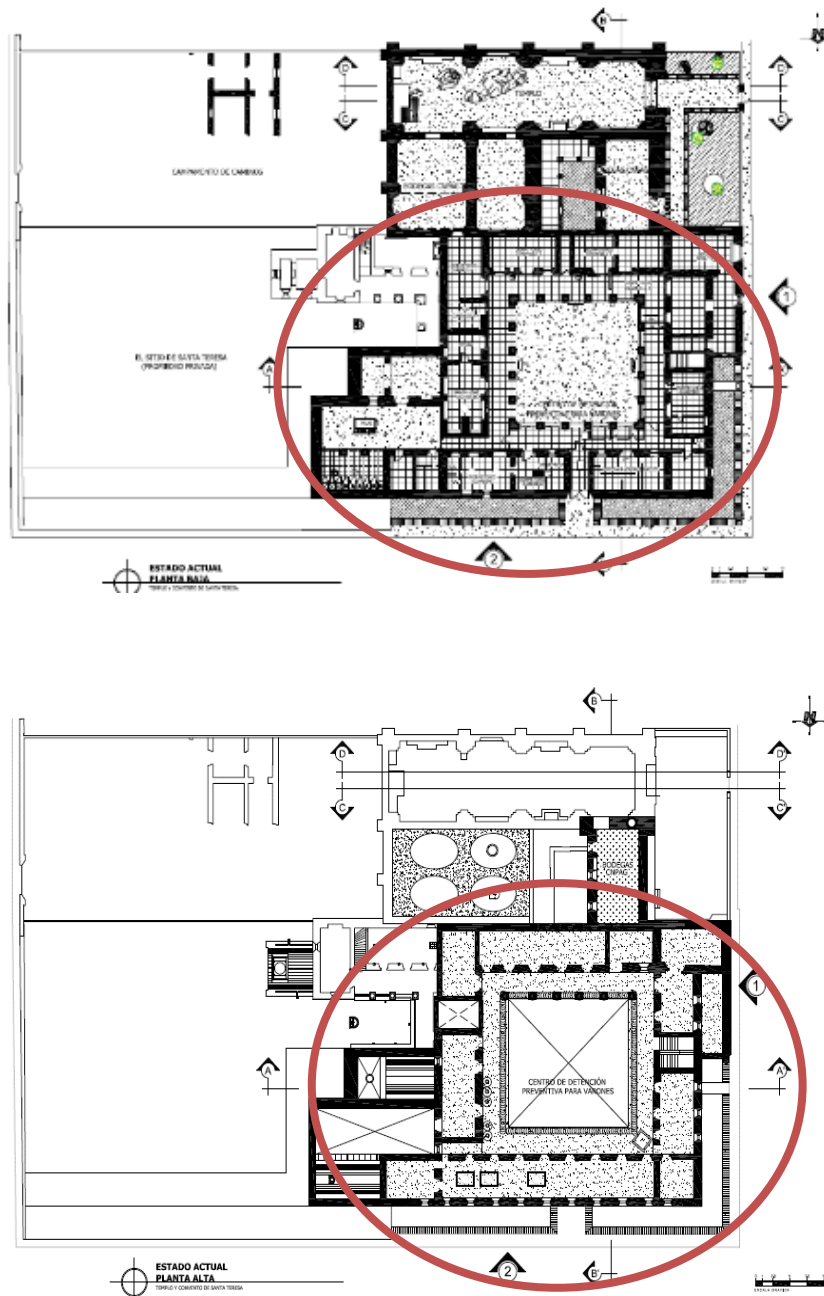
Las figuras 47 a la 57 forman parte del conjunto de datos visuales que apoyan la inspección y el análisis visual ingenieril de la edificación. Algunas fotografías no muestran el estado actual de la edificación, pero fueron parte del proceso de consolidación, reconstrucción y restauración de la misma. Actualmente la edificación sigue siendo intervenida por el CNPAG.

Figura 47. Ubicación del Convento de Santa Teresa de Jesús



Fuente: Conozca La Antigua Guatemala. *Mapa de La Antigua Guatemala*.  
[https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa\\_de\\_La\\_Antigua\\_Guatemala.htm](https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa_de_La_Antigua_Guatemala.htm).  
 Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 48. **Planta baja y alta, Convento Santa Teresa de Jesús**



Fuente: REJOPACHÍ, Luis; GODÍNEZ, María. *Propuesta de restauración y valorización del monumento Santa Teresa De Jesús, La Antigua Guatemala, Sacatepéquez*. p. 90-91.

Figura 49. **Fallas en muros en el convento**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Fallas y arreglos en columnas dentro del convento**



Fuente: Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala, CNPAG. *Proyectos*.  
<http://cnpag.com/proyectos.html>. Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 51. **Panorámica del patio y alrededores del convento**



Fuente: Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala, CNPAG. *Proyectos*.  
<http://cnpag.com/proyectos.html>. Consulta: 25 de mayo de 2020.



Figura 52. **Trabajos de remodelación por parte del CNPAG**



Fuente: Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala, CNPAG. *Proyectos*.  
<http://cnpag.com/proyectos.html>. Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 53. **Trabajos en techos y entrepisos por parte del CNPAG**



Fuente: Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala, CNPAG. *Proyectos*.  
<http://cnpag.com/proyectos.html>. Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 54. **Panorámica de esquina del Convento Santa Teresa de Jesús**



Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Falla por flexión fuera del plano de muro portante**



Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Perspectivas de la cara norte, sobre la 1ª. Calle Oriente, Convento de Santa Teresa de Jesús**



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Materiales diversos en vano y muro sobre la 1ª. Calle Oriente**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.3. Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz**

- Delimitación del alcance de la inspección de la edificación colonial

Se inspeccionará el conjunto en su totalidad, excluyendo la parte de la Casa Chamorro que no se encuentra actualmente en uso de parte del Hogar Fray Rodrigo de la Cruz.

- Datos históricos

La casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz fue construida en 1772 por el señor Francisco Ignacio Chamorro, según datos obtenidos por una entrevista a Don Ciriaco Morales, quien laboró en la casa cuando ya era propiedad de don José Llerena Sirión y quien convirtió esta propiedad en el Hotel Alcázar, el mismo fue inaugurado en 1938, antes de esto don José Llerena se tomó el trabajo de reconstruir las partes de la casa que habían sido dañadas con los terremotos.

Durante el proceso de reconstrucción se respetaron todos y cada uno de los detalles con que contaba la casa, como escudos, marcos de puertas, grosor de los muros entre otros, el Hotel se cerró en 1953 y años más tarde por medio de algunas negociaciones la casa paso a ser parte del patrimonio del Estado, luego de esto en agosto de 1961 se convirtió en lo que hoy en día se conoce como la Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz.

A continuación, hay una lista obtenida en el Registro de la Propiedad Inmueble en donde se indica la fecha y quién fue el propietario del Inmueble hasta cuando pasó a ser parte de las propiedades del Estado.

- o 15 de diciembre de 1916 Jesús Toledo
- o 23 de marzo de 1922 Justa Pérez de Ramírez
- o 14 de diciembre de 1944 Jesús Pérez Arrecis de Ramírez
- o 25 de enero de 1951 Ramiro Samayoa
- o 6 de junio de 1961 propiedad del Estado

Actualmente el hogar de ancianos funciona en una parte de la llamada “La Casa de Chamorro”, esta casa de dos pisos del siglo XVII, es conocida como la “La Casa de Las Sirenas” por las figuras que decoran su fachada, fue adquirida por Francisco Ignacio Chamorro y Villavicencio en 1764, construida hacia 1740 y perteneció a Doña Damiana Iturbide.

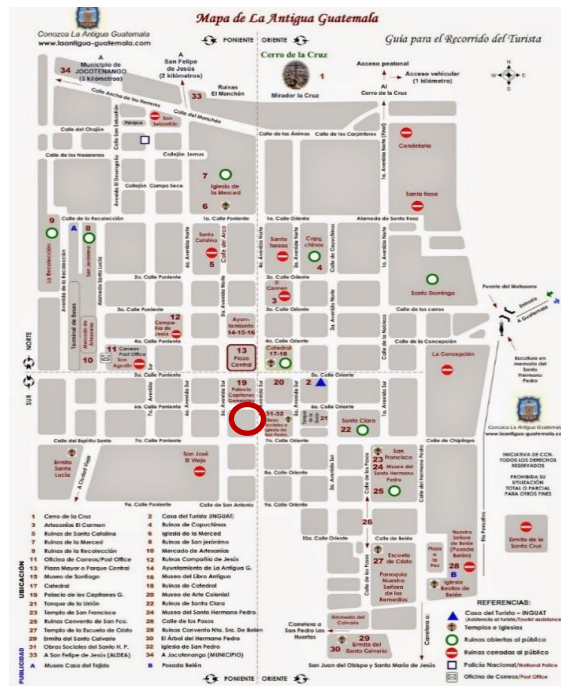
Debido a que esta casa no sufrió muchos daños en los terremotos de 1773 y fue bien cuidada por sus dueños posteriores sirvió durante varios años como hotel “El Alcázar”, que en julio de 1955 bajo el mandato del presidente Castillo Armas fue cambiado por las fincas estatales de café y caña “San Eduardo” y “Santa Cecilia” y pasó a ser la Casa de Protocolo de Antigua.

En 1963 y 1964 se llevaron a cabo renovaciones para asegurar su conservación. La parte principal de “La Casa de Chamorro” es conocida como la “Casa Internacional” y no está bajo el dominio del hogar. Actualmente el hogar es una dependencia del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social considerado dentro de la red hospitalaria del país como institución especializada en el cuidado del adulto mayor.

- Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación

Las figuras 58 a la 64 forman parte del conjunto de datos visuales que apoyan la inspección y el análisis visual ingenieril de la edificación.

Figura 58. **Ubicación de la edificación**



Fuente: Conozca La Antigua Guatemala. *Mapa de La Antigua Guatemala*.

[https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa\\_de\\_La\\_Antigua\\_Guatemala.htm](https://www.laantigua-guatemala.com/Mapa_de_La_Antigua_Guatemala.htm). Consulta: 25 de mayo de 2020.

Figura 59. **Deterioro en paredes dentro de la casa**



Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Detalle de piso**



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Panorámica de la esquina entre 6ª. Calle y 4ª. Avenida Sur**



Fuente: elaboración propia.

Figura 62. **Perspectiva de la terraza española**



Fuente: elaboración propia.

Figura 63. **Dintel de roca en puerta principal**



Fuente: elaboración propia.

Figura 64. **Perspectiva junto a la Casa Chamorro, 4ª. Avenida Sur**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.4. Muro divisorio Finca Retana – Calle a San Bartolomé Becerra**

- Delimitación del alcance de la inspección de la edificación colonial

La inspección se limitará a la extensión del muro que separa la Finca Retana, desde los límites del Cementerio San Lázaro hasta la entrada a Finca Retana ubicada en la Plaza de San Bartolomé Becerra.

El siguiente registro fotográfico y la ubicación en el mapa servirán para entender la ubicación del muro; la carretera que lleva a San Bartolomé Becerra empieza frente al Cementerio San Lázaro y a lo largo de ella se puede apreciar el muro del lado poniente.



- Datos históricos

Este muro no tiene una referencia histórica directa, en ninguna fuente bibliográfica que se haya tomado en cuenta aparece dicho muro. El muro es una estructura aparentemente monolítica, de longitud de 1 kilómetro y recorre parte de una de las fincas cafetaleras de la región de Antigua Guatemala en Sacatepéquez llamada “Finca Retana”.

La aparición de las fincas se remonta a partir de la segunda mitad del siglo XLX, cuando a raíz de la Independencia, el liberalismo atacó el latifundismo clerical convirtiéndose en latifundismo laico. El latifundio permaneció después de nuestra separación política de España y su expansión adquirió un nuevo vigor: en 1830 la antigua hacienda se convirtió en FINCA con la siembra del café, y el hacendado tradicional se convierte en finquero.

De acuerdo a los registros del CNPAG este muro se encuentra dentro de los límites de conservación de Antigua Guatemala, además la finca que limita que también tiene vestigios de distintos períodos constructivos de Guatemala, incluyendo unos de la época colonial; según otras investigaciones, la finca cuenta con datos históricos, actas, registros que tienen fecha de aproximadamente del año de 1600 y para futuras investigaciones pueden tomarse como referencia para entender la historia detrás de las edificaciones coloniales que dentro de la finca se encuentren.

La finca fue comprada a la empresa Grace y Compañía, Central América, el 13 de junio de 1932 y ha estado en propiedad de la familia Cofiño desde esa época. Anteriormente la finca fue de las familias Aguirre y Paúl. Originalmente la finca fue propiedad de una orden de frailes cuyo principal representante era el padre Retana y así es como se origina su nombre.

En un inicio, la finca se encontraba sembrada con caña de azúcar para producción de rapadura, ganado de leche y cochinilla. Posteriormente y ya bajo la administración de la familia Cofiño y junto con la universidad de Iowa State College con el Dr. Melhus y el Sr. William Popenoe, se inició por primera vez la siembra experimental de maíz híbrido.

También se hicieron trabajos de investigación de producción de aguacate finalmente se terminó de sembrar toda la finca con café. Actualmente se encuentran sembradas aproximadamente 175 hectáreas (250 manzanas), de café de las variedades principalmente de Arábigo, Borbón y Caturra. La finca tiene construida una ranchería para sus colonos y la habitan aproximadamente 20 familias.

La finca cuenta con un área de bosque natural y se ha reforestado con variedades de ciprés y pino oriundas de la región. El área total reforestada sobrepasa las 45 hectáreas (65 manzanas). También se cuenta con una pequeña producción de cítricos, principalmente naranja de la variedad Washington (Naval orange), y limón persa. Actualmente se han determinado como Zonas Específicas de Conservación, el casco urbano y la Ermita de San Andrés Deán dentro de la finca (Decreto 29-2005 Ley para la Protección de la Antigua). Se encuentra también un sitio arqueológico llamado "Los Venados".

- Registro visual y fotográfico

Las figuras 65 a la 72 forman parte del conjunto de datos visuales que apoyan la inspección y el análisis visual ingenieril del muro perimetral de Finca Retana, entrada a San Bartolomé Becerra, La Antigua Guatemala.

Figura 65. **Deterioro en muros perimetrales**



Fuente: elaboración propia.

Figura 66. **Muro antiguo y material contemporáneo**



Fuente: elaboración propia.

Figura 67. **Panorámica del ingreso a la Finca Retana y el muro**



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Vegetación encima del muro**



Fuente: elaboración propia.

Figura 69. **Deterioro en varias secciones del muro perimetral**



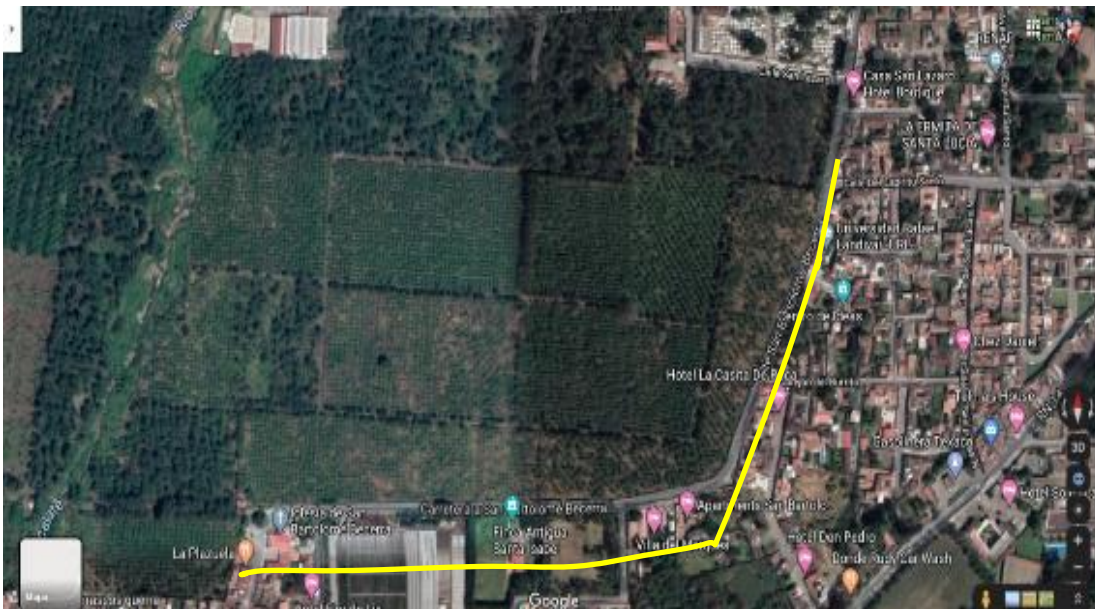
Fuente: elaboración propia.

Figura 70. **Grietas transversales en muro**



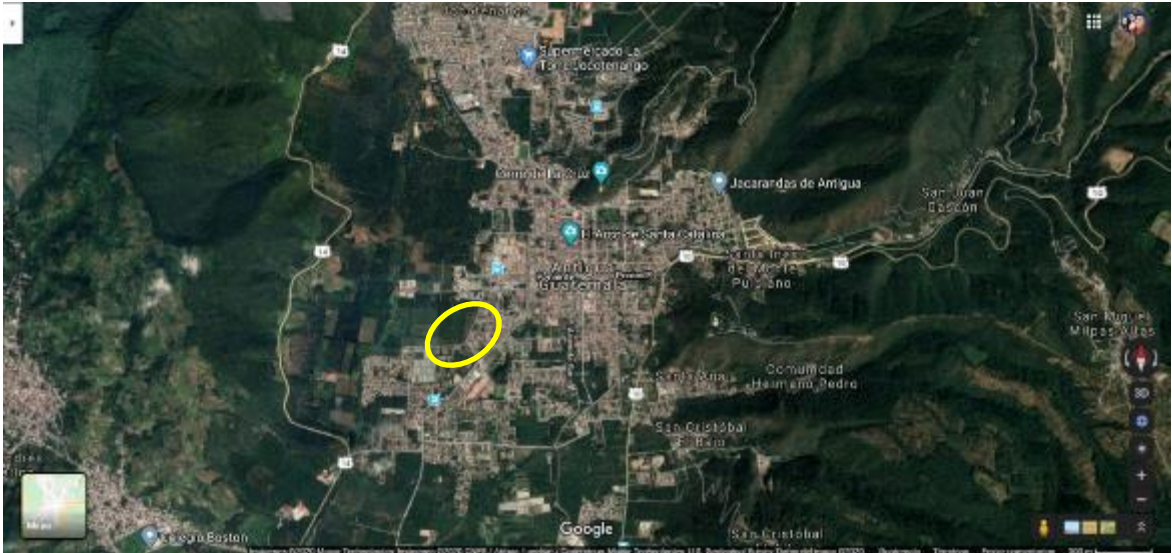
Fuente: elaboración propia.

Figura 71. **Ubicación del muro perimetral**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Maps.

Figura 72. **Ubicación del muro dentro del área de La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Maps.

#### **4.4. Análisis de las 4 edificaciones**

Los siguientes análisis toman en cuenta los aspectos de la metodología plasmados en el capítulo anterior e incorpora los datos y hallazgos relevantes que se tomaron e investigaron en la visita a cada edificación.

##### **4.4.1. Templo de Santa Clara**

El complejo de Santa Clara es uno de los más grandes de La Antigua Guatemala, es un integrado de varios tipos de edificaciones: un convento, templo, sacristía, jardín, púlpito, cocina, habitaciones y más. La inspección se realizó al área de templo el cual se puede apreciar en el plano de la figura 73, en donde también se observan los demás ambientes del conjunto.

El templo se encuentra ubicado en el extremo poniente. Actualmente en el monumento se encuentran realizando trabajos de restauración por parte del Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala y es jurisdicción legal del mismo. Es un sitio turístico abierto al público.

Figura 73. **Planta y divisiones del complejo de Santa Clara**



Fuente: REJOPACHÍ, Luis; GODÍNEZ, María. *Propuesta de restauración y valorización del monumento Santa Teresa De Jesús, La Antigua Guatemala, Sacatepéquez*. p. 82.

El Templo de Santa Clara cuenta con una sola nave central y la forma de la planta es rectangular. Los muros perimetrales tienen una composición variada, son muros gruesos, de más de 0,6 m de espesor.

- Condiciones del entorno inmediato

El templo está situado en el departamento de Sacatepéquez, municipio de La Antigua Guatemala. Los edificios gubernamentales y religiosos ocupan la época colonial en relación a la plaza central. Dentro del casco histórico actualmente es un sector donde se desarrolla el comercio, y en algunas áreas es residencial. En la periferia se ubican urbanizaciones, rastro municipal, centrales de abasto, cementerio, basurero municipal, mercado, área de cultivos y pastoreo de ganados; influyendo esto en el desarrollo de su economía.

De acuerdo a la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), para Sacatepéquez los parámetros sísmicos son:  $I_0 = 4,2$ ,  $S_{cr} = 1,50$  grados y  $S_{1r} = 0,55$  grados. Estos parámetros, junto con otros aspectos sísmicos especificados en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2, proveen un punto de partida para cualquier análisis dinámico o estructural que desee realizarse en el área.

De acuerdo con la clasificación de reconocimiento de los suelos de Guatemala de Simmons, indica que, para el municipio de La Antigua Guatemala la mayoría de los materiales geológicos presentes son de origen volcánico y ocupan el 100 % de la superficie del departamento. En específico para el casco urbano de la ciudad de La Antigua Guatemala, los suelos están constituidos principalmente por fragmentos de rocas adyacentes con partículas de tamaño variable, desde limos hasta gravas.



Se distribuyen en zonas bajas de acumulación (zona donde se recibe constantemente aportes de materiales), producto de la meteorización y disgregación de materiales sólidos (rocas, minerales, materia orgánica), de las partes altas hacia las bajas.

“Los materiales son transportados por los agentes geomorfológicos como el viento, agua, gravedad o fluvio-gravitacionales (fuerza combinada del agua y la gravedad), en pendientes que van desde moderadas hasta planas”.<sup>25</sup>

- Análisis del sistema y elementos de carga
  - o Cimentación

Es poco el detalle de cimentación que se puede observar en el área del templo, pero, en lugares aledaños, se ha determinado que los materiales que lo conforman son el calicanto y roca; la tipología constructiva le provee a la edificación una excelente resistencia a las cargas transmitidas.

- o Muros

Los muros son esbeltos anchos y de espesores variables de acuerdo al acabado. Los muros que colindan con la calle y la avenida tienen un acabado exterior en roca labrada, pero su composición interna, en lo observable, es de calicanto. Cada muro tiene hiladas de ladrillo (rafas) a cada cierta distancia desde el nivel del suelo, estas proveen un amarre tipo solera en cada uno de los muros dado que el arreglo geométrico de los ladrillos.

---

<sup>25</sup> Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. MAGA. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*. p. 16-17.

Los ladrillos, conjuntamente con el mortero que los une, provee un elemento más monolítico y sin concentraciones de esfuerzos excesivas que provoquen el agrietamiento. Cuando en el muro existen elementos que rompen el carácter monolítico del mismo, estos generan concentraciones de esfuerzos, un ejemplo en esta edificación son las ventanas que se encuentran sobre la 2ª. Avenida Sur.

En la figura 74 se observa el colapso de la sección de una ventana después del terremoto de 1976. Las concentraciones de esfuerzos generan una falla en corte en ambos sentidos de las esquinas superiores del dintel de la ventana. En la actualidad esta falla ha sido intervenida por parte del CNPAG Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala, esto permite las condiciones para una consolidación sismo-resistente para el muro.

Figura 74. **Colapso de la sección de una ventana, Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala, 1976**



Fuente: página de Facebook. *La Antigua Guatemala*.

<https://www.fb.com/LantiguaGuatemala/photos/pcb.127508535312900/127507848646302/>

Consulta: 01 de junio de 2020.

De acuerdo a las grietas y colapsos parciales observados en los muros, puede determinarse que responden a acciones estructurales lógicas de acuerdo a la forma, esbeltez y composición y su respuesta ante los sismos, en general las grietas y colapsos se deben a que el espesor del muro, al no tener un refuerzo para resistir tensión, el esfuerzo de flexión era contrarrestada sólo por el peso propio del elemento y, por consiguiente, del material de construcción (calicanto).

El calicanto es un material con una alta resistencia a la compresión, pero, dada la baja resistencia a esfuerzos de tensión del mismo y por la diferencia en sus módulos de elasticidad, provocan la fisuración y agrietamiento de este material. Existen evidencias de conservación e intervención a lo largo del templo, una de las más notorias es vano de la ventana que se encuentra sobre la 2ª. Avenida Sur. En la figura 75 se evidencia una de estas muestras de intervención por parte del Consejo Nacional para la Protección de La Antigua Guatemala.

Figura 75. **Intervención la parte superior de una ventana en el Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

- o Columnas y otros elementos de carga

El templo está conformado por un juego de 6 bóvedas, y por consiguiente sus respectivas columnas en las cuales se trasmite la carga de la cubierta. Las columnas son masivas, más anchas que el muro y existe un contrafuerte en la cara poniente del muro sobre la 2ª. Avenida, en el mismo eje que el de la fachada el cual se aprecia en la figura 76.

Figura 76. **Contrafuerte sobre la 2ª. Avenida Sur, La Antigua Guatemala**



Fuente: elaboración propia.

Se pueden observar algunas grietas en las columnas, aunque no hay un patrón definido que indique que existe una falla por flexión o corte, sino que las grietas son superficiales y se notan en el acabado de la misma. Aunque, difícil de visualizarlo sin instrumentos de nivelación, es probable que haya un cambio en la verticalidad de algunas columnas debido al colapso de las bóvedas (falla por apertura de apoyos).

El efecto conjunto del movimiento horizontal y vertical puede ser crítico en construcciones de mampostería (como esta edificación), cuya estabilidad se basa en la acción de equilibrar, por parte del peso propio, ante los empujes laterales.

La aceleración vertical del movimiento del terreno produce fuerzas de inercia verticales que actúan ya sea aumentando o disminuyendo la fuerza de gravedad, cuando estas fuerzas de inercia verticales actúan en sentido contrario a las de la gravedad disminuye la capacidad del contrafuerte para oponerse al momento de volteo producido por el empuje de la bóveda.

Las columnas del templo al no tener contrafuertes (exceptuando del lado poniente de la fachada), amplificaron las fuerzas en las cubiertas, más adelante, en el apartado de bóvedas, se ampliará el tema del colapso y por qué no se produjo en el área de coro alto. También se pudo observar el desprendimiento superficial del material en algunas columnas, pero esto no genera efectos adversos en la estabilidad a menos disminuyan la sección efectiva de las mismas. Estos desprendimientos en los bordes de las distintas columnas ya fueron corregidos de parte del CNPAG. Consejo Nacional para la Protección de Antigua Guatemala.

#### o Pisos

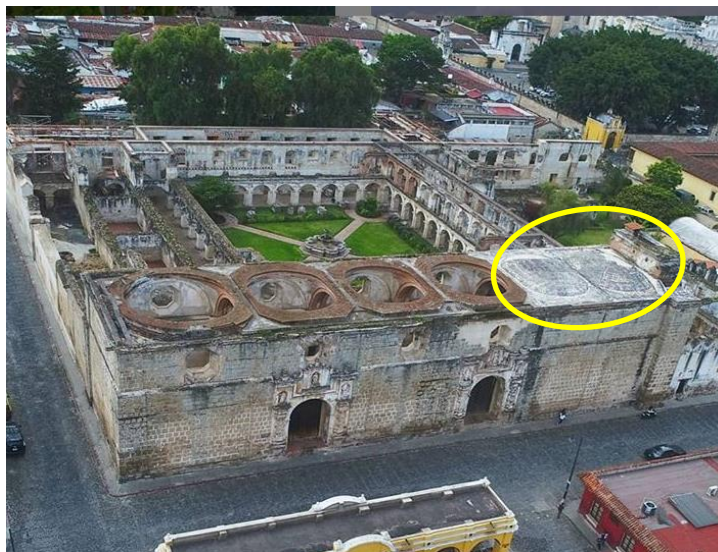
Cuando se analiza una edificación histórica es poco lo que se le presta atención a esta parte, pero dependiendo de las características del mismo, llega a incidir trabajando como una losa rígida (piso de cemento), o una losa elástica (cuando se emplea la baldosa). Cabe mencionar que hay un espacio subterráneo en el área de templo, una cripta. El piso de esta cripta es indeterminado, tiene una capa compactada de tierra encima que impide observar el material del mismo.

- o Cubierta, bóveda y entrepisos

Las bóvedas son los elementos estructurales distintivos de los cuales carece el Templo de Santa Clara. Actualmente el CNPAG ha corregido todo el anclaje, arcos y base para dichas bóvedas, pero, no hace muchos años esto no era así. La intervención del templo de Santa Clara ha sido uno de los proyectos más grandes que ha ejecutado el CNPAG en la última década. Las columnas sostenían bóvedas a lo largo de la nave principal, del conjunto de 6 bóvedas sólo restan 2 en pie.

En la figura 77 se observan las 4 bases de las bóvedas que colapsaron y las dos restantes (encerradas en un círculo), que sí están en pie y que forman parte del coro alto del templo.

Figura 77. **Vista aérea del conjunto y de las bóvedas del Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala, 2019**

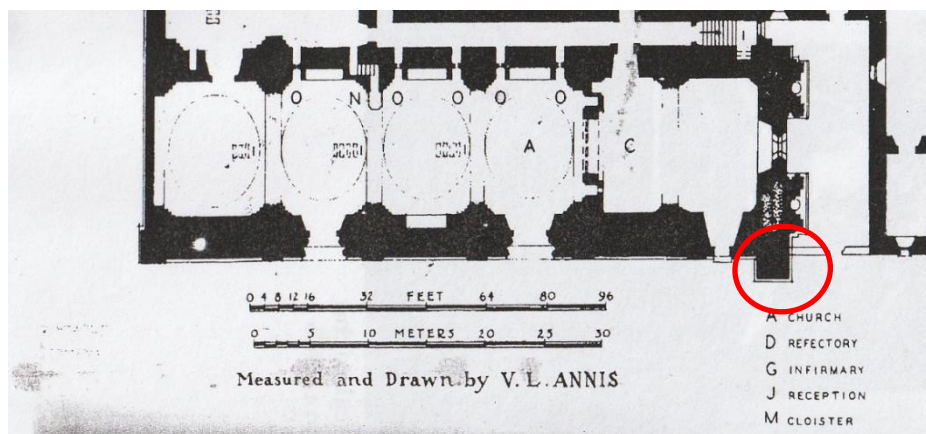


Fuente: Sivar Pixel. *La Plaza de San José*. [https://www.instagram.com/p/B1ZogO\\_D2QK/](https://www.instagram.com/p/B1ZogO_D2QK/).

Consulta: 17 de julio de 2020.

Al evaluar cómo se comportan las cargas en las columnas se debe entender primero que las estructuras abovedadas son hiperestáticas y la línea de presiones no puede hacerse de forma exacta a partir únicamente de las condiciones de equilibrio. El empuje de las bóvedas puede ser absorbido de mejor forma por un contrafuerte robusto, sin embargo, el contrafuerte sólo se presenta en eje de la fachada del templo lo que le provee una estabilidad mayor a esta región, pero también concentra los esfuerzos en el mismo lado, esto propició también el colapso de las otras bóvedas. El contrafuerte antes mencionado se muestra en la figura 78.

Figura 78. **Ubicación del contrafuerte en el Templo de Santa Clara, La Antigua Guatemala**



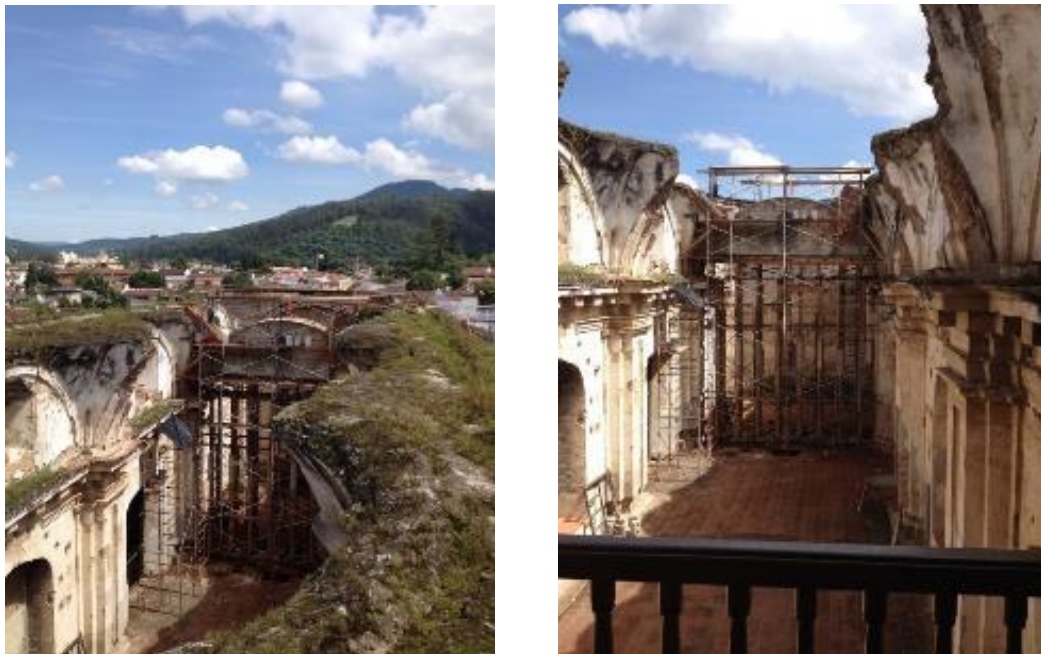
Fuente: VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de La Antigua Guatemala 1543-1773*. p. 196.

En un sismo, las fuerzas de inercia que se generan por la masa importante de la bóveda y las que se producen por el peso mismo del muro producen empujes normales al plano del muro. El techo no proporciona una restricción significativa al extremo superior del muro; tampoco lo hacen los eventuales muros transversales, los cuales nunca existieron en este templo.

El movimiento del muro hacia afuera no fue suficiente para producir su volteo, pero sí para provocar la inestabilidad de las bóvedas y sus colapsos; la razón por la que aún están en pie las dos bóvedas restantes encima del coro alto es porque esa zona, en relación a la nave restante, es más rígida (debido al entrepiso de la zona de coro), y también da lugar a fuertes concentraciones de esfuerzos, por ello en las uniones, dinteles y varios puntos de unión hay agrietamiento y desprendimiento de material.

La falta de contrafuertes y la esbeltez de los muros favorece el volteo de las columnas y muros y el coceo del techo de bóveda favorece el colapso del mismo. En la figura 79 se muestra la perspectiva de los arcos y bóvedas que colapsaron durante los múltiples movimientos sísmicos en La Antigua Guatemala.

**Figura 79. Arcos y bóvedas faltantes en Templo Santa Clara, La Antigua Guatemala, 2012**



Fuente: elaboración propia.



La zona de coro alto que antes se mencionó, que presentó agrietamiento a pesar de no haber colapsado totalmente, ya fue intervenida por el CNPAG, y se puede observar en la figura 80. La intervención fue realizada con ladrillo y utilizando aglomerantes contemporáneos, esto consolida la estructura y aumenta su resistencia a futuros sismos.

Figura 80. **Bóvedas en coro alto, Templo de Santa Clara**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.4.2. Convento de Santa Teresa de Jesús**

- Condiciones del entorno inmediato

El convento de Santa Teresa de Jesús se encuentra ubicado en la 1ª. Calle Oriente entre 3ª. Avenida Norte y 4ª. Avenida Norte de la Antigua Guatemala.

Este monumento es considerado de primer orden y su conservación es primordial y ha sido uno de los proyectos del CNPAG. En la periferia se ubican urbanizaciones, rastro municipal, centrales de abasto, cementerio, basurero municipal, mercado, área de cultivos y pastoreo de ganados; influyendo esto en el desarrollo de su economía.

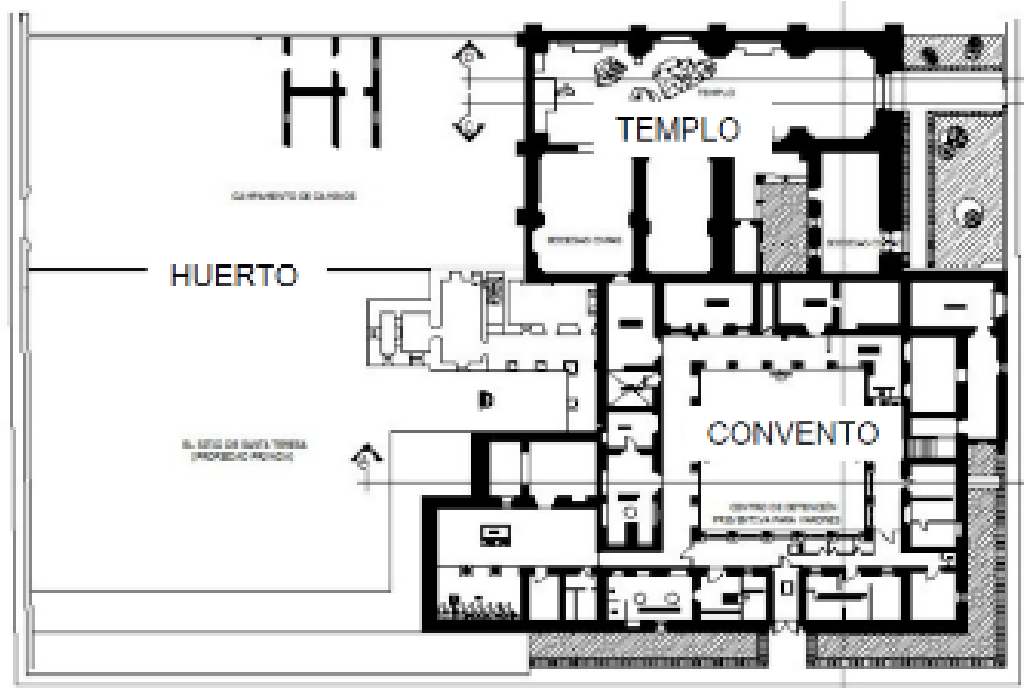
El autor Verle Annis considera la posibilidad que este conjunto pudiera haber sido construido por el arquitecto Mayor Joseph de Porres; pues se observa la existencia de elementos similares en el templo de Santa Teresa y la Catedral, como lo son la distribución y proporciones, las columnas dobles sobre base rectangular, distribución de hornacinas, entre otros.

De acuerdo a la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), para Sacatepéquez los parámetros sísmicos son:  $l_0 = 4,2$ ,  $S_{cr} = 1,50$  grados y  $S_{1r} = 0,55$  grados. Estos parámetros, junto con otros aspectos sísmicos especificados en la Norma de Seguridad Estructural NSE 2, proveen un punto de partida para cualquier análisis dinámico o estructural que desee realizarse sobre la edificación.

De acuerdo con la clasificación de reconocimiento de los suelos de Guatemala de Simmons, indica que, para el municipio de La Antigua Guatemala la mayoría de los materiales geológicos presentes son de origen volcánico y ocupan el 100 % de la superficie del departamento. No se observaron asentamientos diferenciales en el área del Convento de Santa Teresa de Jesús.

El conjunto estructural de Santa Teresa de Jesús se compone de un templo y un convento, en este análisis sólo se tomó en cuenta el área del convento. Un plano del conjunto se muestra en la figura 81.

Figura 81. **Plano del conjunto de Santa Teresa de Jesús**



Fuente: REJOPACHÍ, Luis; GODÍNEZ, María. *Propuesta de restauración y valorización del monumento Santa Teresa de Jesús, La Antigua Guatemala, Sacatepéquez*. p. 73.

- Análisis del sistema de carga vertical y horizontal
  - o Cimentación

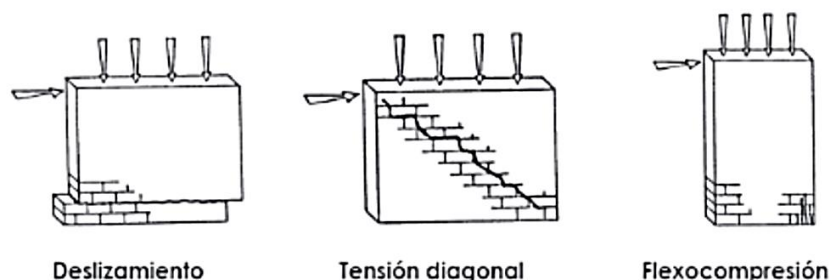
No se observó agrietamiento en los muros o columnas que pareciera tener continuidad hasta la cimentación, en general, por lo observado, los cimientos son de roca, tienen una excelente resistencia a la compresión y se presume que se utilizó cimiento corrido en la estructura, este último fue crucial para el amarre estructural de los muros en la parte baja.

## o Muros

Los muros evidencian un daño estructural grande. Se observaron varios módulos de falla: en varios puntos de segundo nivel se observan fallas por cortante (existe agrietamiento en diagonal en un solo sentido), las fallas por cortante ocurren cuando se vence la fuerza de fricción entre el mortero y cualquier mampuesto del que esté construido el muro. El agrietamiento se desarrolla a lo largo de una junta, de forma escalonada o a lo largo de las piezas, debido a la insuficiente fricción para contrarrestar el esfuerzo cortante aplicado a la pared.

La forma diagonal de las grietas es causada por fuerzas horizontales que actúan en el plano del muro, siendo más predominante en una dirección que en otra, lo que produce esfuerzos de tracciones en un ángulo de aproximadamente 45 grados con relación a la horizontal, aunque ese ángulo es variable dependiendo de la longitud del muro o de los elementos que interrumpan el carácter monolítico del muro (ventanas, vanos de puertas, nichos y otros). La forma de acción de las fuerzas se puede observar en la figura 82.

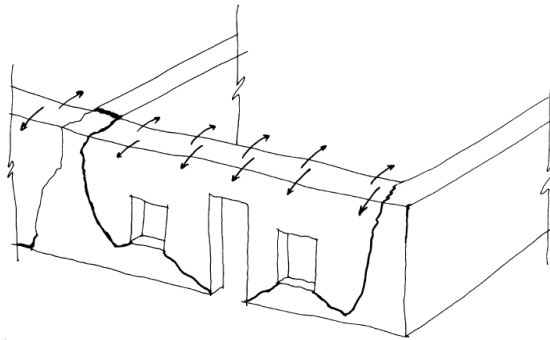
Figura 82. **Diferentes fallas en muros de mampuestos**



Fuente: PÁEZ MORENO, Diego Fernando., PARRA ROJAS, Sonia Ximena; MONTAÑA, Carlos Andrés. *Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería*. p. 54.

El agrietamiento por flexión fue un primer tipo de grieta que apareció en los muros de edificaciones coloniales durante un evento sísmico, y se debió a un movimiento de oscilación y la falta de un amarre estructural en la parte superior del muro. Este tipo de daño y el movimiento de oscilación asociado con él se ilustran en la figura 83 y 84.

Figura 83. **Falla por flexión en un muro**



Fuente: TOLLES, Leroy., KIMBRO, Edna; GINELL, William. *Guías de planeamiento e ingeniería para la estabilización sismorresistente de estructuras históricas de adobe*. p. 59.

Figura 84. **Línea de agrietamiento que evidencia falla por flexión en uno de los muros del segundo nivel**



Fuente: elaboración propia.

Se observó también fallas por flexión a mediana altura en algunos muros, en especial en los módulos de gradas en donde aprecia el empuje lateral del entrepiso a la altura del mismo, y en los muros del segundo nivel también se aprecian algunas fallas por flexión, pero en esta ocasión son debido a que en un inicio la parte superior del muro estaba restringida por efecto de alguna solera de amarre o el mismo sistema de techo.

Un término acuñado como “inestabilidad local” se refiere a un conjunto de fallas apreciables en un solo sector de la edificación o elemento estructural, este término también se ilustró en la tabla V en el capítulo 2; en una de las esquinas del convento se puede apreciar una de estas inestabilidades; las grietas evidencian un fallo por corte y por flexión (combinación de esfuerzos). En términos generales estas fallas se atribuyen a que a lo largo de la estructura no se desarrolla un flujo adecuado de las fuerzas de inercia.

Figura 85. **Evidencia de fallo por cortante y flexión**



Fuente: elaboración propia.

A lo largo del convento se observa un gran número de grietas en las aberturas de ventanas y de puertas. Las grietas en las aberturas se deben a la alta concentración de esfuerzos en estos sitios, la falta de amarres (soleras), y la mezcla de diferentes materiales para la edificación del muro. Las grietas pueden empezar tanto en las esquinas superiores como en las inferiores de las aberturas y extenderse diagonal o verticalmente hasta alcanzar la parte superior de los muros como se ilustra en la figura 86.

Figura 86. **Agrietamiento por concentración de esfuerzos en vanos**



Fuente: elaboración propia.

#### o Columnas

Alrededor de la cara interna del convento, colindando con el patio central, se encuentra el sistema de arcos, muy tradicional en claustros, conventos y palacios gubernativos. Las columnas de este convento fueron elementos propensos al volteo, pero más a la falla por flexión. La flexión que se generó produjo grietas horizontales, debido a que, por la alternancia de la dirección del movimiento, las grietas horizontales se abren y cierran sucesivamente en un proceso llamado “zapateo” en donde se disipó gran parte de la energía del sismo.

En vez del volteo hubo un cambio en la verticalidad de varias las columnas en una misma hilera, esto se pudo apreciar antes de la restauración como se aprecia en la figura 87.

Figura 87. **Proceso de restauración de columnas en el convento**



Fuente: elaboración propia.

o Cubiertas, arcos, techos y entrepisos

Alrededor de la cara interna del convento, colindando con el patio central, se encuentra el sistema de arcos, muy tradicional en claustros, conventos y palacios gubernativos. El convento tiene dos niveles y en el segundo existe una sola hilera de columnas en uno de los lados del polígono. Las columnas están construidas de ladrillo de arcilla cocido.



El entrepiso está conformado por bóvedas de cañón corrido, ubicadas en toda el área del convento, y en la sacristía. Los materiales que las conforman son ladrillos de arcilla cocida, calicanto y mampostería. En el caso del techo del segundo nivel no restan vestigios del mismo, pero estaba construida de un artesonado en madera con teja, y debido al traslado a la Nueva Guatemala fue retirado para reutilizar los materiales.

Se observó un agrietamiento significativo transversal en los arcos, tanto en el primero como en el segundo nivel, siendo más notorio en este último. El problema de estos arcos fue el coceo, o sea, el empuje horizontal que transmite a los apoyos, que en este caso fueron las columnas. En el segundo nivel es más crítico debido a que la rigidez que provee un techo de artesonado no es comparable con el de una bóveda o entrepiso, esto propició no sólo el agrietamiento sino el colapso del techo. La abertura de los apoyos dio lugar a un patrón de agrietamiento característico que inicia por una grieta en la parte inferior del centro del arco y después por grietas por la parte superior como se muestra en la figura 88.

Figura 88. **Falla por apertura de apoyos y coceo en arco**



Fuente: elaboración propia.

Las bóvedas en el piso inferior también sufrieron agrietamientos transversales debido a coceo (figura 89), las paredes de la bóveda, al momento del sismo, oscilan lateralmente y pueden llegar a una abertura tal que la bóveda se vuelva inestable. El agrietamiento observado también se debe a la poca capacidad de la mampostería para resistir esfuerzos de tensión.

Figura 89. **Falla por movimiento lateral de muros en bóveda**



Fuente: elaboración propia.

o Otras observaciones

El uso del convento como prisión durante más de 50 años en nada contribuyó con la conservación y preservación del mismo, haciendo virtualmente imposible darle mantenimiento, tergiversando el uso original para el cual fue construido el monumento y menospreciando el valor de este, produciendo una serie de alteraciones espaciales y conceptuales en dicha edificación, integrando elementos que nada tienen que ver con el edificio o con la historia de este.

#### 4.4.3. Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz

- Condiciones del entorno

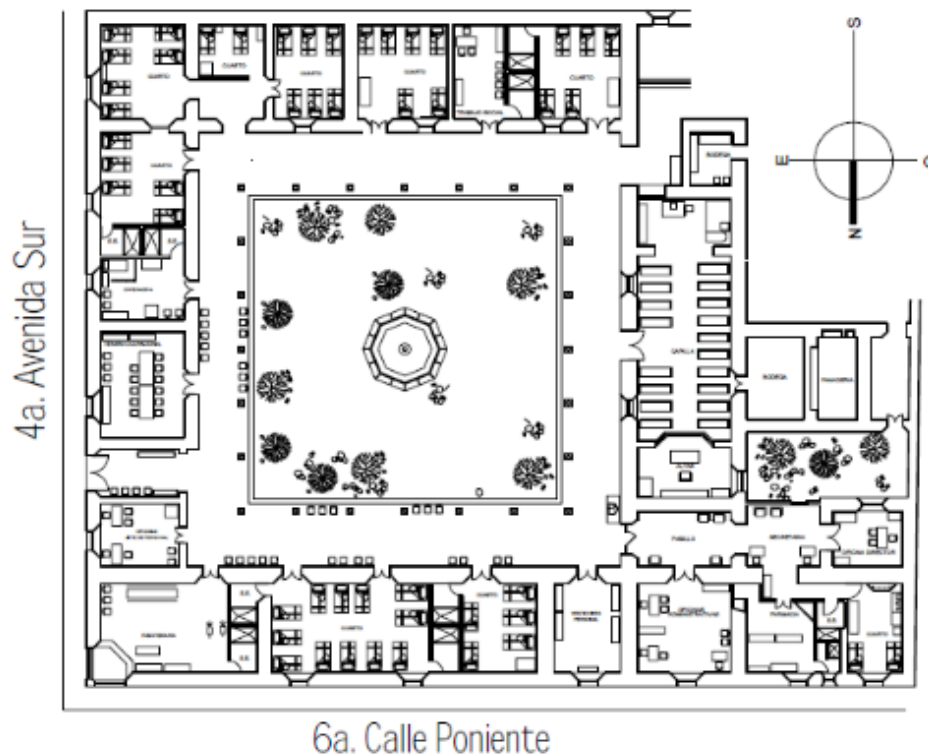
La edificación está clasificada como casa o vivienda colonial y funciona como Asilo de ancianos de parte del Estado de Guatemala. La ubicación de la Casa Hogar es entre la 6ta. Calle y 4ª. Avenida Sur es un área bastante transitada por toda clase de vehículos y flujo peatonal debido a que es una calle alterna al Parque Central, y que también conduce a lugares turísticos como el Parque de La Unión, el templo de San Pedro, Santa Clara y San Francisco

En el casco urbano de La Antigua Guatemala, los suelos están constituidos principalmente por fragmentos de rocas adyacentes con partículas de tamaño variable, desde limos hasta gravas. Se distribuyen en zonas bajas de acumulación (zona donde se recibe constantemente aportes de materiales), producto de la meteorización y disgregación de materiales sólidos (rocas, minerales, materia orgánica) de las partes altas hacia las bajas, transportados por los agentes geomorfológicos como el viento, agua, gravedad o fluvio-gravitacionales (fuerza combinada del agua y la gravedad), en pendientes que van desde moderadas hasta planas.

De acuerdo a la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), para Sacatepéquez los parámetros sísmicos son:  $I_0 = 4,2$ ,  $S_{cr} = 1,50$  grados y  $S_{1r} = 0,55$  grados. Estos parámetros, junto con otros aspectos sísmicos especificados en la Norma de Seguridad Estructural -NSE- 2, proveen un punto de partida para cualquier análisis dinámico o estructural que desee realizarse sobre la edificación.

La casa muestra una geometría cuadrada y es simétrica respecto del centro del patio, aunque varios muros transversales difieren de alineación entre un eje y otro como se puede observar en la figura 90.

Figura 90. **Planta conjunto, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz**



Fuente: SILÍEZAR MENA, Karen René. *Análisis y propuesta de restauración Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz.* p. 90.

### **Análisis general de la edificación**

El análisis visual global indica que la casa en general ha conservado su estabilidad estructural, seguramente en los últimos terremotos varios muros perdieron elementos que con el paso del tiempo se restauraron.

Actualmente la mayor parte del acabado superficial de los muros, pisos y demás se ha conservado, algo que es propicio y necesario debido a los usos a los que ha estado sometida la edificación.

La casa se ve afectada principalmente por factores de humedad tanto en los corredores de terraza española como en algunos de los muros (ver figura 91), y en el techo decorado de la oficina del director del asilo, en algunos muros también se pueden apreciar fisuras debido a movimientos sísmicos que ha soportado en años anteriores.

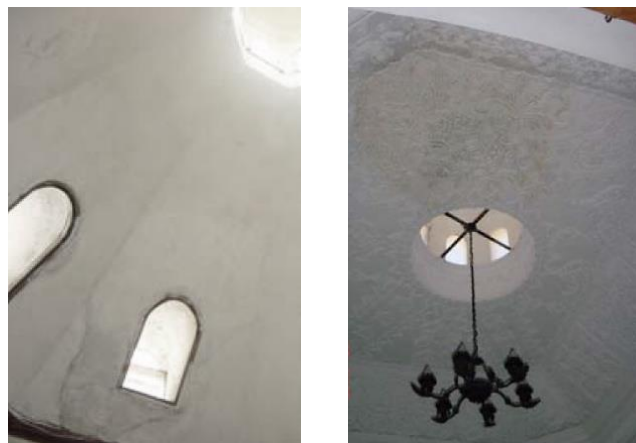
Figura 91. **Deterioro en paredes de la Casa Fray Rodrigo de la Cruz**



Fuente: elaboración propia.

Las cúpulas que tiene la casa han sido dañadas por la humedad (ver figura 92), debido a que sus linternillas no cuentan con ningún tipo de vidrio que proteja del agua durante la época lluviosa, esto desencadena humedad también en los muros.

Figura 92. **Deterioro en cúpulas y linternillas**



Fuente: elaboración propia.

- **Cimentación y muros**

El agrietamiento en los muros no muestra una prolongación hacia la cimentación y tampoco se han hecho calas arqueológicas para determinar el estado del mismo.

Los muros, que están hechos de adobe, han de presentar varias fisuras, lastimosamente por el acabado no se pueden apreciar correctamente, pero es seguro que existan ciertos fallos por cortante, sobre todo en la ventana que se encuentra en la esquina entre la calle y avenida, esa ventana provocó una concentración de esfuerzos en ambas caras del muro.

Desde una perspectiva estructural, la estabilidad de los muros es una característica especial de las construcciones de adobe porque esta persiste a pesar de que los muros estén agrietados a consecuencia de los terremotos. Es imposible evitar que las construcciones de adobe se agrieten durante los sismos importantes.

- Columnas, vigas, techo y otros elementos de cubierta

El soporte que un sistema de techos brinda a la parte alta de los muros puede agregar estabilidad adicional, especialmente cuando está anclado a los mismos. El techo de la Casa Hogar Fray Rodrigo es la estructura que posee elementos estructurales tipo viga, empezando por las vigas longitudinales y transversales que componen el área de artesanado en teja y luego el área de terraza española como se puede observar en la figura 93.

Figura 93. **Vista del artesanado de terraza española, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz**



Fuente: elaboración propia.

El artesanado en madera le provee cierto grado de rigidez a la estructura inferior. Los muros gruesos de una vivienda colonial como esta, construida de adobe, mejora la estabilidad sísmica de las misma, pero, es la estructura del techo la que deberá estar siempre bien anclada a los muros para complementar. No se visualizan problemas con el anclaje, pero sí con el deterioro del material.

La madera es un material estructural flexible, soporta bien los esfuerzos de tensión hasta cierto valor, pero tiene la particularidad que al ser de origen vegetal está más propenso a que sea afectada por intemperismos, plagas o a cambios por humedad y temperatura. Las vigas, el artesanado, columnas y la madera observable han sido intervenidas para extender su duración, pero, plagas como la polilla las han afectado además de la humedad y cambios de temperatura a lo largo de los años.

La casa tiene tres cúpulas, una por encima de la capilla, otra en la cocina y última en la oficina del director (las primeras dos se aprecian en la figura 93), estas están construidas con ladrillo de arcilla cocido, el acabado exterior es de una mezcla de cal, arena fina y agua. Estas cúpulas se ven severamente afectadas por la humedad.

Figura 94. **Cúpula y linternilla, Casa Hogar Fray Rodrigo de la Cruz**



Fuente: elaboración propia.



#### **4.4.4. Muro perimetral Finca Retana – Carretera a San Bartolomé Becerra**

- Condiciones del entorno

El muro perimetral divide a la Finca Retana de la Carretera que conduce hacia San Bartolomé Becerra, una de las aldeas de Antigua Guatemala. En cuanto a la finca, es una de las más antiguas del departamento de Sacatepéquez. La finca está localizada en la aldea San Bartolomé Becerra, Antigua Guatemala, en el costado oeste de la ciudad.

La finca está situada a una altura de 1 550 metros sobre el nivel del mar y es accesible por la carretera Interamericana o por la carretera nacional CA-14. Junto a los pueblos de San Juan del Obispo y Pastores.

En los terrenos de la Finca Retana aún se pueden apreciar vestigios de la iglesia de San Andrés Deán, pequeña población que fundó el Bachiller y Pbro. don Juan Alonso, de la Orden de Santiago, provisor y Deán de la S.I. Catedral de la Ciudad de Santiago de Guatemala, hacia el siglo XVIII, que es donde en ese entonces era la jurisdicción del Paraje conocido como San Bartolomé nombre con el que se le conocía originalmente a la finca, luego Potrero de Retana más tarde sería Finca Retana y hoy se le conoce con el nombre de Finca Retana y anexos

Los suelos de que se encuentra compuesta la finca son de origen volcánico y se llaman francos arenosos. El régimen de lluvias inicia durante el mes de mayo y finaliza durante el mes de septiembre y la precipitación promedio anual es de aproximadamente 90 mm.

- Análisis estructural del muro

Es importante mencionar que las características fundamentales del comportamiento inelástico del tapial son totalmente diferentes de los materiales dúctiles de construcción, ya que es un material frágil. Cuando un muro, no reforzado, de tapial se agrieta, su resistencia a tracción se pierde por completo, a pesar de que el muro puede permanecer de pie y soportar cargas verticales mientras no pierda su verticalidad y su estabilidad.

Gran parte de su deterioro se debe a la erosión a la que ha estado sujeto, también al vandalismo y a la vegetación que crece encima del muro, pero, el factor más crítico en este muro es la humedad. El agua es la amenaza no sísmica más seria para las edificaciones de tapial, tanto en áreas de alta como de baja sismicidad.

El agua puede dañar el muro al erosionar partes del mismo y reducir la resistencia del material; la erosión basal, que consiste en la desintegración y pérdida de una porción de un muro en su base, puede deberse al flujo del agua de lluvia por la superficie o a la caída de agua desde la parte superior del muro, que salpica contra la base del mismo.

La erosión basal también puede deberse a la absorción de agua por capilaridad que luego se desplaza hacia la superficie del muro para evaporarse. El agua puede contener sales solubles que se cristalizan cerca de la superficie al evaporarse. En el proceso de cristalización, las sales se expanden y pueden fracturar el tapial. El depósito y la cristalización constantes de sales solubles van erosionando lentamente la superficie.

En la figura 95 se puede apreciar la erosión basal del muro inspeccionado.

Figura 95. **Daño por humedad en muro divisorio**



Fuente: elaboración propia.

La erosión basal también puede deberse a la absorción de agua por capilaridad que luego se desplaza hacia la superficie del muro para evaporarse. El agua puede contener sales solubles que se cristalizan cerca de la superficie al evaporarse. En el proceso de cristalización, las sales se expanden y pueden fracturar el tapial. El depósito y la cristalización constantes de sales solubles van erosionando lentamente la superficie.

El grado de erosión basal puede aumentar por el efecto abrasivo del viento, la arena, y por efecto de los orificios hechos por animales, entre ellos los insectos, y el crecimiento de plantas, y se considera este es el caso del muro perimetral observado. Al final, independientemente de la causa de erosión basal, el resultado para este muro ha sido que el área del muro se redujo.

Este muro es una muestra de una construcción típica tapial de la época colonial y ha estado sujeta a intemperismos, no tiene protección de ningún tipo de cubierta (albardón) y tampoco ha recibido el mantenimiento adecuado para asegurar su estabilidad, de hecho, hay partes del muro que seguramente colapsaron y el espacio que quedó fue reconstruido con materiales diferentes (como muros prefabricados de concreto) como se muestra en la figura 96.

Figura 96. **Materiales contemporáneos agregados al muro de tapial**



Fuente: elaboración propia.

Cuando las cargas exceden la fuerza de compresión del material, se presenta la falla, y aunque este muro no tenga más carga que su propio peso, el efecto de péndulo invertido propicia el agrietamiento y la falla.

Cuando el muro se debilita por efecto de la humedad, puede desarrollarse un plano débil y la parte superior del muro puede deslizarse y derrumbarse a lo largo de este plano y, de hecho, se puede observar una variación en la verticalidad del mismo, algunas secciones pueden aparentar estar en vías de desplome o están propensas a un colapso de presentar un movimiento sísmico de gran magnitud.

Otro de los módulos de falla encontrados es la ruptura transversal por flexión, el muro al ser continuo y no tener juntas sísmicas a distancias determinadas actúa como un solo bloque de gran longitud y poco peralte, combinado con la variabilidad en el comportamiento elástico en algunas secciones de muro y la vibración que se desarrollan a lo largo del mismo, surgen grietas que “abren” el muro y separa bloques.

Es la razón por la que sólo algunas secciones han colapsado y se ha cubierto el espacio con materiales estructurales contemporáneos como se muestra en la figura 97.

Figura 97. **Mezcla de materiales de diferentes épocas**



Fuente: elaboración propia.

En otras secciones de muro es observable el agrietamiento antes mencionado, el que precede a la separación de dos secciones de muro como se muestra en la figura 98.

Figura 98. **Ruptura transversal por flexión**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.5. Modificaciones a la guía preliminar**

Estas modificaciones a la guía surgen a partir de las experiencias tomadas en Antigua Guatemala y reemplazan la guía descrita al inicio de este capítulo de la investigación y también tomando en cuenta la metodología para la inspección y análisis visual ingenieril de las edificaciones coloniales en Guatemala.

##### **4.5.1. Delimitación e información del alcance de la inspección de la edificación colonial**

La delimitación del alcance abarca tanto lo físico como lo legal. En campo es necesario identificar el o los elementos estructurales, el conjunto o la parte de la edificación a la cual se le practicará el análisis visual ingenieril, su ubicación, localización y zona geológica.

El alcance también podrá estar condicionado por los permisos de acceso al lugar que se le confieran al profesional o institución encargada de la inspección, para fines prácticos, es necesario asegurarse que el ingreso a la edificación colonial sea posible para su observación directa. Para conocimiento del profesional acerca de qué monumentos están protegidos o a cargo de instituciones gubernamentales, los monumentos históricos de Guatemala están registrados dentro del Compendio de Leyes Sobre la Protección del Patrimonio Cultural Guatemalteco.

#### **4.5.2. Investigación histórica y estructural**

Recopilar la información histórica de la edificación colonial es clave para el análisis, esta le confiere al profesional un parámetro para definir, identificar, diferenciar y recopilar datos que puedan apoyar la inspección y el análisis posterior de la edificación colonial. En esta investigación se deberá tratar de establecer la secuencia de construcción de los complejos de edificaciones y de las edificaciones individuales, documentando las fechas, diferentes técnicas constructivas, ampliaciones y remodelaciones. Esta tarea conllevará tanto investigación en archivos como de manera visual, con el fin de inventariar y evaluar las diferentes características estructurales de un edificio.

El tipo de información que se podría recopilar puede variar desde una documentación gráfica (fotografías históricas, pinturas, dibujos, planos, entre otros), documentación escrita (recuentos históricos descriptivos, artículos de periódicos, especificaciones, permisos de construcción, contratos, entre otros), los registros de reparación y mantenimiento, incluyendo los reportes de los mismos (en caso de que exista ese acceso a la información) o una combinación de varios.

Deben validarse las fuentes en cuanto a su fiabilidad como medio para reconstruir la historia de la construcción. Es esencial interpretarlas cuidadosamente para obtener datos confiables sobre la historia estructural del edificio.

- Datos históricos inexistentes

Dependiendo del tipo de edificación que se analizará es posible que no se cuenten con datos históricos específicos, hay vestigios, ruinas y elementos estructurales separados que no poseen una documentación histórica directa, para estos casos deberá buscarse datos históricos de edificaciones, fincas, aldeas o municipios aledaños, es posible que dentro de esa documentación existan apartados cortos de la historia de la edificación colonial a inspeccionar.

#### **4.5.3. Recopilación y levantamiento de datos visuales de la edificación**

Como se especificó en la parte metodológica es necesario tener datos visuales de la edificación colonial, estos datos apoyarán a identificar, delimitar, observar y definir los aspectos ingenieriles que sean de importancia para el análisis visual.

El tipo de datos dependerá del profesional, los recursos y del lugar; para fines de esta investigación se utilizaron fotografías propias y otras recopiladas de recursos web, planos arquitectónicos existentes y recopilados de otras fuentes bibliográficas.



#### **4.5.4. Observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial**

Esta evaluación estará a cargo de un equipo integrado, por lo menos, por dos personas, siendo una de ellas ingeniero civil. El otro evaluador deberá poseer conocimiento en edificaciones similares a las que se están evaluando, pudiendo ser estudiantes de ingeniería o arquitectura, que hayan completado los cursos del área de estructuras, materiales y construcción, y que tengan experiencia práctica en construcción.

El equipo de inspección deberá examinar cuidadosamente el edificio entero, adentro y afuera, particularmente su sistema estructural y colocando especial atención a las fallas de carácter estructural que la edificación posea, tomando en cuenta los criterios del profesional o encargado junto con los aspectos de la metodología que esta investigación propone. La evaluación es visual y no es de tipo destructivo. Con la finalidad de facilitar la evaluación estructural a continuación se describen cuatro fases que abarcan una evaluación visual ingenieril.

- Primera fase: inspección global de la edificación
  - o Inspeccionar alrededor de la edificación.
  - o Examinar la estructura para irregularidades verticales, forma y en planta.
  - o Buscar grietas en puertas, ventanas, uniones de muros o techos.
  - o Buscar fracturas en la cimentación o en las paredes expuestas.
  - o Identificar intemperismos, actos de vandalismos o destrucción intencional.

- Segunda fase: examen del lugar por factores geotécnicos
  - o Examinar el suelo por presencia de grietas, deformaciones y movimientos verticales.
  - o En áreas de laderas, verificar la existencia de deslizamiento o caída de escombros.
  - o Examinar si en la zona existen fallas geológicas locales. Apoyarse en documentos o recursos de la página web del INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología), CONRED (Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres), o estudios de otras instituciones o frentes investigadores fiables.
  - o Evaluar la taxonomía del suelo cuando haya estudios, apoyarse en documentos del MAGA Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
  
- Tercera fase: inspección de los datos estructurales
  - o Evaluar el sistema estructural principal.
  - o Identificar el sistema de resistencia de cargas y los elementos que influyen en ese sistema.
  - o Inspeccionar los elementos expuestos del sistema de cimentación, o pisos inferiores (criptas, acueductos subterráneos entre otros).
  
- Cuarta fase: inspección de los daños y fallas estructurales
  - o Examinar grietas y fisuras.
  - o Identificar los daños existentes.
  - o Examinar los colapsos y vulnerabilidades.

#### **4.5.5. Completar la lista de revisión y generar la documentación de la inspección visual ingenieril**

Paralelamente a la observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial, completar el formato de evaluación denominado: “Ficha para inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales” del Apéndice 1. Este formato puede llenarse simultáneamente con la observación e identificación de los aspectos ingenieriles de la edificación colonial.

Generar, bajo un formato físico o digital, un documento que incluya la investigación histórica, estructural y arquitectónica y los datos recabados durante las fases de observación e identificación de los aspectos estructurales e ingenieriles de la edificación (fotografías, planos arquitectónicos y el formato de evaluación antes mencionado).

El formato físico o digital en el que se anoten los datos de la inspección visual estará sujeto a las disposiciones propias del profesional, o la entidad encargada. El dictamen del análisis también se agregará y quedará a criterio del profesional la extensión y la forma de presentar los resultados.

#### **4.5.6. Análisis ingenieril de la edificación colonial**

Partiendo de los datos anteriores, es a través del análisis que se determinarán los aspectos ingenieriles relevantes en relación al estado actual de una edificación colonial en Guatemala y considerar así una posible intervención para su consolidación sismo-resistente.

Deberán estar identificados los sistemas constructivos, materiales, daños y establecer las causas de las fallas en los elementos y sistemas estructurales observados en la edificación colonial.

Agregar el análisis a la documentación recopilada con anterioridad siguiendo el mismo formato para dicho documento.



## CONCLUSIONES

1. Los sistemas constructivos de la época colonial usaron la tecnología de los materiales y elementos estructurales propios de la época, la mayoría estuvieron limitados, en cuanto a su resistencia y estabilidad, por sus propiedades mecánicas y las respuestas dinámicas de los mismos ante sismos.
2. La construcción y el diseño estructural de las edificaciones coloniales basaban su método en conceptos filosóficos que relacionaban aspectos geométricos y proporcionaron parámetros de simetría, forma y proporción que se observan, incluso hoy por hoy, en las edificaciones de la época.
3. Los criterios, métodos y recursos utilizados para efectuar una inspección estructural varían entre los diferentes profesionales e instituciones a cargo de la conservación del patrimonio colonial en Guatemala, no existe un estándar, pero la lógica ingenieril delimita los aspectos esenciales y específicos a considerar para analizar una estructura a partir de una inspección visual.
4. La inspección visual desde el punto de vista ingenieril permite determinar las características de los sistemas constructivos, las consideraciones en relación al comportamiento de las edificaciones, la falla y los efectos en conjunto que pueden evitarla formando un estudio previo a la conservación de monumentos.



## RECOMENDACIONES

1. El presente trabajo es una continuación de la línea de investigación concerniente a los procesos de consolidación sismo-resistente de edificaciones coloniales en Guatemala, por lo que se recomienda profundizar en el método y las experiencias para lograr propiciar la conservación del patrimonio colonial del país.
2. La metodología de análisis visual está sujeta a distintos criterios y fines, esta investigación no pretende agotar el tema sino presentar un punto de vista ingenieril y se recomienda no obviar es aspecto estructural en ningún proceso de inspección y análisis.





## BIBLIOGRAFÍA

1. ARNOLD, Christopher. y REITHERMAN, Robert. *Configuración y diseño sísmico de edificios*. 1a. ed. México: Limusa, 1987. 299 p.
2. CATALÀ, Claudi Alsina. *Los secretos geométricos en diseño y arquitectura*. Cataluña, España: sctm05, 2005. 10 p.
3. CEBALLOS, Mario. *La restauración de adobe en los edificios coloniales de Antigua Guatemala*. 6a. Conferencia internacional sobre la conservación de la arquitectura de la tierra. Las Cruces, Nuevo México, EE. UU: Review Committee, 1990. 162 p.
4. LÓPEZ HERNÁNDEZ, Edgar Fernando. *Recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente de edificaciones coloniales en La Antigua Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 87 p.
5. MARKMAN, Sidney David. *Colonial architecture of Antigua Guatemala*. Philadelphia, USA: American Philosophical Society, 1966. 335 p.

6. MATALLA, Elizabeth Acero. *Aproximación al comportamiento estructural de edificaciones en tierra de la arquitectura colonial. Consideraciones para el inventario de bienes del Ministerio de Cultura y la Norma de Sismo Resistencia Colombiana*. Maestría en Conservación del Patrimonio Cultural Inmueble. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Artes, 2012. 258 p.
7. MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. 2a. ed. Ciudad de México : Fundacion ICA, 1998. 255 p.
8. MENDOZA OCHOA, Nestor Leonardo. *Elaboración de ladrillos de barro cocido estabilizados con arena cuarzo-feldespática*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2018. 141 p.
9. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA. *Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sacatepéquez, Guatemala*. Guatemala : Don Quijote S.A., 2013. 884 p.
10. MINKE, Gernot. *Manual de construcción en tierra*. 2a ed. Uruguay: Fin de Siglo, 2005. 224 p.
11. LUJAN MUÑOZ, Luis. *Informe sobre el estado de conservación de las iglesias de Antigua Guatemala y algunas medidas para su preservación*. Informe inédito. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1968. 54 p.

12. PÁEZ MORENO, Diego Fernando., PARRA ROJAS, Sonia Ximena; MONTAÑA GUTIÉRREZ, Carlos Andrés. *Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería*. s.l.: Revista Ingenierías, Universidad de Medellín, 2009. 69 p.
13. RAMÍREZ, Mario Raúl. *La influencia de la meccanica problemata en la arquitectura de Joseph de Porres*. Guatemala: s.n., 2013. 6 p.
14. RODRÍGUEZ NAVARRO, Pablo., GIL PIQUERAS, Teresa; VERDIANI, Giorgio. *Drones para el levantamiento arquitectónico. Aplicación para la documentación de las torres del litoral valenciano*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación. Universidad Politécnica de Valencia. España: Departamento de Arquitectura, 2016. 9 p.
15. SÁNCHEZ, María Inés. *Vulnerabilidad sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile*. Valdivia, Chile : Universidad Austral de Chile, 2013. 133 p.
16. STRAUB, Hans. *A history of civil engineering: An outline from ancient to modern times volume 18 of MIT paperback series*. London: Leonard Hill, 1952. 258 p.
17. VERLE LINCOLN, Annis. *La arquitectura de la Antigua Guatemala 1543-1773*. Ed bilingüe. Guatemala: Editorial Universitaria, 1968. 532 p.

18. WEVER, Edgar Alfredo. *Edificaciones de la época colonial en Guatemala, análisis y restauración*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1991. 131 p.
  
19. ZEPEDA, Carlos. *Proyecto para la restauración y puesta en valor del monumento nacional: Convento e Iglesia de la Recolectión Antigua Guatemala*. Trabajo de graduación de Arquitectura. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura, 1986. 74 p.

## APÉNDICE

### Apéndice 1. **Ficha para inspección y análisis visual ingenieril de edificaciones coloniales**

La ficha presentada en este apéndice tiene como finalidad la de orientar a la persona encargada de la inspección visual de la edificación colonial para que pueda llevar un orden en cuanto a la misma.

Como se mencionó en el capítulo 3 de esta investigación, en la sección de Anotación de datos, comentarios y hallazgos de la inspección visual, varias instituciones en Guatemala poseen formatos para resumir el análisis o inspección y quedará a criterio del inspector o de la institución encargada el utilizar dichos formatos si así aplica o si desean guiarse con ellos.

La ficha para inspección y análisis visual ingenieril que se provee en este apéndice tomó en cuenta aspectos estructurales y técnicos tratados a lo largo de los primeros tres capítulos de esta investigación, de la información recopilada de entrevistas con profesionales, del formato utilizado por el Consejo Nacional para la Protección de la Antigua Guatemala CNPAG en su Ficha de evaluación estructural de inmuebles patrimoniales y también de la ficha de evaluación presentada en el Anexo B y C de la Norma de Seguridad Estructural NSE 6 2018, denominada: Evaluación y Rehabilitación De Obras Existentes, publicada por la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica AGIES.

# Continuación del apéndice 1.

## FICHA PARA INSPECCIÓN Y ANÁLISIS VISUAL INGENIERIL DE EDIFICACIONES COLONIALES

INFORMACIÓN GENERAL DE INMUEBLE	
Nombre de la edificación:	
Fecha de inspección	
Dirección:	
Encargado(s) de la inspección:	
Contactos/Propietarios:	

### ¿QUÉ TIPO DE EDIFICACIÓN SE INSPECCIONARÁ?

USO	<input type="checkbox"/>	Vivienda	CLASIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN	<input type="checkbox"/>	Catedral	CLASIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN	<input type="checkbox"/>	Obra pública
	<input type="checkbox"/>	Religioso		<input type="checkbox"/>	Monasterio		<input type="checkbox"/>	Gubernamental
	<input type="checkbox"/>	Hospital/Asilo		<input type="checkbox"/>	Convento		<input type="checkbox"/>	Otra dependencia estatal
	<input type="checkbox"/>	Público		<input type="checkbox"/>	Iglesia/Templo		<input type="checkbox"/>	Alcantarillado
	<input type="checkbox"/>	Administrativo		<input type="checkbox"/>	Ermita		<input type="checkbox"/>	Acueducto
	<input type="checkbox"/>	Centro cultural/ Monumento		<input type="checkbox"/>	Universidad		<input type="checkbox"/>	Infraestructura Vial

OTRO USO DEL EDIFICIO Y/O CLASIFICACIÓN DE LA EDIFICACIÓN:

**OBJETO DE LA INSPECCIÓN:**

### DELIMITACIÓN DE LA EDIFICACIÓN COLONIAL

Especificar qué parte de la edificación se inspeccionará:

### OTRAS CONDICIONES DE USO DE LA EDIFICACIÓN

Habitada / en uso     
  Abandonada/ Desocupada     
  Sólo ruinas

### DATOS DEL ENTORNO

Topografía	Observaciones
<input type="checkbox"/> Planicie <input type="checkbox"/> Ladera de cerro <input type="checkbox"/> Rivera río /lago <input type="checkbox"/> Depósitos lacustres <input type="checkbox"/> Costa <input type="checkbox"/> Montaña	

### FACTORES GEOTÉCNICOS

**Suelo**

Asentamientos  
 Corrimientos  
 Grietas en el suelo  
 Deslizamiento  
 Derrumbes  
 Licuefacción

### FORMA DE LA ESTRUCTURA

<b>Características de la Planta</b> <input type="checkbox"/> Asimétrica <input type="checkbox"/> Simétrica <input type="checkbox"/> Circular <input type="checkbox"/> Planta Cruciforme <input type="checkbox"/> En "L" <input type="checkbox"/> Otras (Especifique): <input type="text"/>	<b>Irregularidades en elevación</b> <input type="checkbox"/> Marcos o muros no llegan a la cimentación <input type="checkbox"/> Columnas cortas <input type="checkbox"/> Reducción de planta en pisos superiores <input type="checkbox"/> Apoyos a diferente nivel (laderas) <input type="checkbox"/> Grandes masas en pisos superiores <input type="checkbox"/> Péndulo invertido <input type="checkbox"/> Columna Fuerte - Viga Débil <input type="checkbox"/> Arreglo irregular en ventanas en fachada
--	---

### SISTEMAS Y DAÑOS ESTRUCTURALES

### EVALUACIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

**PISOS** ¿APLICA INSPECCIÓN? **SI** **NO**

<b>Material de los pisos</b> <input type="checkbox"/> Baldosa <input type="checkbox"/> Cemento <input type="checkbox"/> Piedra <input type="checkbox"/> Ladrillo <input type="checkbox"/> Mixto <input type="checkbox"/> Otro (Especifique)	<b>Anotaciones y Fotografías</b> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>
---	--

## Continuación del apéndice 1.

**Otros elementos observados**

- Grietas y/o fisuras
- Humedad
- Asentamiento parcial
- Asentamiento total
- Vegetación
- Otro (Especifique)
- 
- 
- 

**CUBIERTAS Y ENTREPISOS**

¿APLICA INSPECCIÓN? **SI** **NO**

**Elementos portantes horizontales**

- Bóveda
- Dinteles
- Solera
- Arco
- Cúpula
- Vigas
- No aplica/Inexistente

**Cubiertas**

- Entrepiso (Especificar el tipo) \_\_\_\_\_
- Tipo de techo (especificar) \_\_\_\_\_

**Anotaciones y Fotografías**

**Tipología de arcos**

- Medio Punto
- Ojival
- Elíptico
- Rebajado

**Tipo de Bóvedas**

- Cañón Corrido
- Cañón Apuntalado
- Cañón con lunetos

**Tipo de Bóvedas**

- Vahida
- De arista
- Otra (Especificar):
- 
- 
- 

**Niveles y características**

- 1 Nivel
- 2 niveles
- Más de dos
- Coro Alto
- Nivel subterráneo

**Materiales de construcción**

- Calicanto (Piedra y ladrillo)
- Ladrillo
- Teja
- Madera
- Mixto/Otro (Especificar)
- 
- 
- 

**Fallas estructurales en general**

- Torsiones
- Colapso parcial/total
- Desfase en la alineación
- Asentamiento
- Erosiones
- Filtraciones
- Grietas y/o Fisuras



Continuación del apéndice 1.

CIMENTACIÓN	¿APLICA INSPECCIÓN?	SÍ	NO
<p><b>Materiales de la cimentación</b></p> <p><input type="checkbox"/> Calicanto (Piedra y ladrillo)</p> <p><input type="checkbox"/> Piedra</p> <p><input type="checkbox"/> Ladrillo</p> <p><input type="checkbox"/> Tapial</p> <p><input type="checkbox"/> Adobe</p> <p><input type="checkbox"/> Otro (Especificar)</p> <hr style="width: 100%;"/>	<p><b>Presenta Daño/ No se puede verificar/ Especificar</b></p> <hr style="width: 100%;"/> <p><b>Anotaciones y Fotografías</b></p> <div style="border: 1px solid black; height: 180px; width: 100%;"></div>		

MUROS	¿APLICA INSPECCIÓN?	SÍ	NO				
<p><b>Material de construcción</b></p> <p><input type="checkbox"/> Calicanto (Piedra y ladrillo)</p> <p><input type="checkbox"/> Ladrillo</p> <p><input type="checkbox"/> Adobe</p> <p><input type="checkbox"/> Bahareque</p> <p><input type="checkbox"/> Tapial</p> <p><input type="checkbox"/> Piedra</p> <p><input type="checkbox"/> Madera/Ladrillo</p> <p><input type="checkbox"/> Otro (Especificar)</p> <hr style="width: 100%;"/> <p><b>Otras características observadas</b></p> <p><input type="checkbox"/> Erosión</p> <p><input type="checkbox"/> Humedad</p> <p><input type="checkbox"/> Deslizamiento</p> <p><input type="checkbox"/> Cambio de material</p> <p><input type="checkbox"/> Vegetación</p> <p><input type="checkbox"/> Vandalismo</p> <p><input type="checkbox"/> Remoción intencional</p> <p><b>Desplome observado</b></p> <p><input type="checkbox"/> Parcial</p> <p><input type="checkbox"/> Total</p> <p><b>Otras observaciones</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="height: 15px;"></td></tr> <tr><td style="height: 15px;"></td></tr> <tr><td style="height: 15px;"></td></tr> <tr><td style="height: 15px;"></td></tr> </table>					<p><b>Anotaciones y Fotografías</b></p> <div style="border: 1px solid black; height: 450px; width: 100%;"></div>		

## Continuación del apéndice 1.

COLUMNAS Y OTROS ELEMENTOS DE CARGA VERTICAL Y LATERAL		¿APLICA INSPECCIÓN?	SÍ	NO
<b>Elementos</b> <input type="checkbox"/> Columnas <input type="checkbox"/> Campanario <input type="checkbox"/> Torres <input type="checkbox"/> Contrafuertes <input type="checkbox"/> Otros (Especificar): <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/>	<b>Anotaciones y Fotografías</b> <div style="border: 1px solid black; height: 400px; width: 100%;"></div>			
<b>Material de construcción</b> <input type="checkbox"/> Calicanto (Piedra y ladrillo) <input type="checkbox"/> Ladrillo <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Bahareque <input type="checkbox"/> Tapial <input type="checkbox"/> Piedra <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Otro (Especificar) <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/>				

CONSERVACIÓN		¿APLICA INSPECCIÓN?	SÍ	NO
<b>Evidencias de conservación</b> <input type="checkbox"/> Restauración (reciclaje) <input type="checkbox"/> Inyección de aglomerantes en muros <input type="checkbox"/> Construcción de elementos de amarre <input type="checkbox"/> Anastilosis <input type="checkbox"/> Refuerzos especiales <input type="checkbox"/> Refuerzos antisísmicos	<b>Observaciones respecto al estado de conservación</b> <div style="border: 1px solid black; height: 80px; width: 100%;"></div>			

ANOTACIONES FINALES

Fuente: elaboración propia.

