



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

**RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSOLIDACIÓN SISMO-RESISTENTE DE
EDIFICACIONES COLONIALES EN LA ANTIGUA GUATEMALA**

Edgar Fernando López Hernández

Asesorado por el Ing. Francisco Quiñónez de la Cruz

Guatemala, febrero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSOLIDACIÓN SISMO-RESISTENTE DE
EDIFICACIONES COLONIALES EN LA ANTIGUA GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR FERNANDO LÓPEZ HERNÁNDEZ

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO QUIÑÓNEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

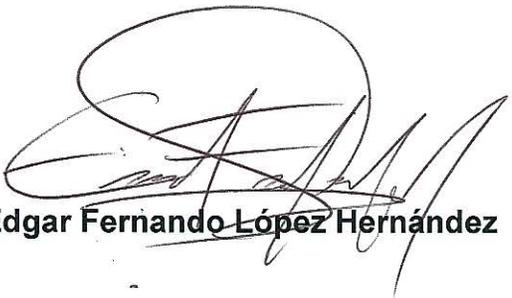
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSOLIDACIÓN SISMO-RESISTENTE DE EDIFICACIONES COLONIALES EN LA ANTIGUA GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha noviembre de 2011.



Edgar Fernando López Hernández



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



Guatemala, 16 de noviembre de 2012

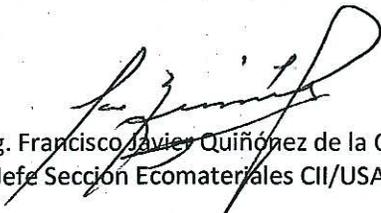
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he concluido con la revisión del trabajo de graduación del estudiante universitario **Edgar Fernando López Hernández**, titulado **"Recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente de edificaciones coloniales en la Antigua Guatemala"**, del cual fui nombrado asesor.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **López Hernández** cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Jefe Sección Ecomateriales CII/USAC





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala, 16 de noviembre de 2012

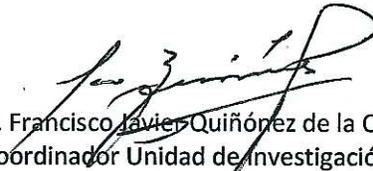
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he concluido con la revisión del trabajo de graduación titulado **"Recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente de edificaciones coloniales en la Antigua Guatemala"**, realizado por el estudiante universitario **Edgar Fernando López Hernández**, quien contó con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante **López Hernández** cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz
Coordinador Unidad de Investigación
Escuela de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador de la Unidad de Investigación, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Edgar Fernando López Hernández, titulado RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSOLIDACIÓN SISMO-RESISTENTE DE EDIFICACIONES COLONIALES EN LA ANTIGUA GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, febrero de 2013.

/bbdeb.



El Decano 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: **RECOMENDACIONES GENERALES PARA LA CONSOLIDACIÓN SISMO-RESISTENTE DE EDIFICACIONES COLONIALES EN LA ANTIGUA GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Edgar Fernando López Hernández**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, febrero de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|-------------------|---|
| Mis padres | Por el apoyo incondicional brindado durante toda mi carrera. |
| Mi hermano | Por ser la inspiración de mi superación profesional. |
| Mi novia | Por acompañarme en todo momento y ser la motivación de mis esfuerzos. |
| Mi hijo | Por ser la razón de mis esfuerzos. |

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por la fortaleza que me brinda en cada momento de mi vida.
- Mi asesor** Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, por toda la ayuda brindada durante la realización de este trabajo.
- CNPAG** Consejo Nacional para la Protección de la Antigua Guatemala, por brindar parte de la información bibliográfica necesaria para los procedimientos de investigación realizados.
- Conservador de la Antigua Guatemala** Arq. Norman Muñoz, por brindar los permisos necesarios para la búsqueda de información en el CNPAG.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ASPECTOS GENERALES	1
1.1. Tipos de sismos y las escalas de medición.....	1
1.2. Descripción de la zona sísmica de Guatemala	6
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ANTIGUA GUATEMALA	9
2.1. Ubicación y datos geográficos	9
2.2. Descripción general de la población	10
2.3. Breve descripción de la historia de la ciudad de Antigua Guatemala	11
2.4. Antigua Guatemala en una zona sísmica.....	12
2.4.1. Zona sísmica de Antigua Guatemala	12
2.4.2. Registro histórico de la actividad sísmica en Antigua Guatemala	14
3. EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA ÉPOCA COLONIAL	17
3.1. Historia del sistema constructivo de la época colonial de Antigua Guatemala	17
3.2. Materiales más utilizados en la época colonial	21

3.3.	Descripción de los tipos de elementos estructurales de la época	23
3.3.1.	Cimentaciones.....	23
3.3.2.	Muros	25
3.3.3.	Columnas	27
3.3.4.	Arcos	29
3.3.5.	Cubiertas y entrepisos	30
3.3.6.	Vanos de puertas y ventanas.	31
3.3.7.	Bóvedas.	32
3.3.8.	Otros elementos importantes.....	33
	3.3.8.1. Fachadas	33
	3.3.8.2. Acabados	34
3.4.	Análisis cualitativo de los daños ocasionados por los sismos a las edificaciones de la época colonial.....	35
3.4.1.	Real Palacio de Antigua Guatemala	36
3.4.2.	La Catedral de Antigua Guatemala.....	39
3.4.3.	Convento de Santa Clara	42
3.4.4.	Similitudes entre las edificaciones	47
4.	INTERVENCIONES REALIZADAS A LOS MONUMENTOS HASTA LA FECHA	51
4.1.	Tipos de intervenciones	51
4.1.1.	Restauración	51
4.1.2.	Inyección de aglomerantes en grietas	52
4.1.3.	Construcción de elementos de amarre	53
4.1.4.	Anastilosis	56
4.2.	Intervenciones en el Real Palacio de Antigua Guatemala	57
4.3.	Intervenciones en la Catedral de Antigua Guatemala.....	59

4.4.	Intervenciones en el Convento de Santa Clara de Antigua Guatemala.....	61
5.	COMPARACIÓN ENTRE LA LÓGICA UTILIZADA EN EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA ÉPOCA COLONIAL Y LA INGENIERÍA SISMO-RESISTENTE CONTEMPORANEA PARA LA CONSERVACIÓN DE MONUMENTOS	63
5.1.	Importancia de la consolidación de las edificaciones históricas de Antigua Guatemala.	63
5.2.	Descripción de las características que permitieron el colapso de edificaciones de la época colonial desde un punto de vista contemporáneo.....	64
6.	RECOMENDACIONES SISMO-RESISTENTES GENERALES PARA LA INTERVENCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS DE LA ÉPOCA COLONIAL.....	71
6.1.	Antecedentes y consideraciones generales	71
6.2.	Tipos de Intervención y restauración	74
6.2.1.	Anastilosis.....	75
6.2.2.	Reforzamiento de arcos y bóvedas	76
6.2.3.	Reforzamiento de columnas.....	77
6.2.4.	Reforzamiento de muros	78
6.2.5.	Elementos superiores de amarre	79
6.2.6.	Refuerzo sísmico	80
	CONCLUSIONES.....	83
	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Escala de Mercalli Modificada (MM).....	3
2.	Zona sísmica de Guatemala.....	6
3.	Tipos de fallas de Guatemala.....	7
4.	Ubicación geográfica de Antigua Guatemala.....	9
5.	Productos de artesanía textil.....	11
6.	Mapa de zonificación sísmica en Antigua Guatemala.	13
7.	Grabados de iglesia San Francisco y la Compañía de Jesús.....	15
8.	Diseño de espesor de muros para soporte de bóvedas.....	19
9.	Vista de bóvedas de cimentación.....	23
10.	Muros de piedra.....	25
11.	Columnas.....	28
12.	Arcos.....	29
13.	Entrepiso de madera artesonada.....	30
14.	Vano de una ventana.....	31
15.	Bóveda cubierta en capilla central.....	32
16.	Fachada de ataurique.....	33
17.	Acabados originales.....	34
18.	Fachada principal.....	37
19.	Daños ocasionados por sismos en lado sur.....	37
20.	Colapso de elemento estructural.....	39
21.	Fachada principal.....	40
22.	Daños ocasionados por sismos en lado oriente.....	41
23.	Fachada principal.....	42

24.	Fachada de entrada secundaria	43
25.	Vano de ventana	43
26.	Muros largos	44
27.	Final de arco sostenido por el vano de una puerta	45
28.	Muro vencido en segundo nivel	46
29.	Fallo de viga por flexión	46
30.	Sistema constructivo de muros de la época colonial	47
31.	Columnas de ladrillo y estuco	48
32.	Arcos de ladrillo y estuco	49
33.	Vanos de puertas y ventanas	50
34.	Restauración de un arco	52
35.	Muro días después de la inyección de aglomerante	53
36.	Solera corona de amarre	54
37.	Tensores de acero	55
38.	Proceso de Anastilosis	56
39.	Cable tensor ajustable de acero	57
40.	Inyección de material aglomerante	58
41.	Restauración de arcos	59
42.	Columna restaurada	60
43.	Detalle de solera de amarre	61
44.	Cubierta del coro restaurada	62
45.	Antigua Guatemala	63
46.	Articulaciones plásticas generadas en elementos superiores	67
47.	Tipos de agrietamiento en muros por acciones externas	68

TABLAS

I.	Escala de medición de Richter	2
II.	Resistencias a compresión según tipo de piedras	22

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°	Indicador de cantidad de grados
°C	Unidad de medida de la temperatura en grados centígrados
%	Proporción de una cantidad respecto de otra, evaluada sobre cien
gal	Unidad de medida de gravedad
km	Unidad de medida lineal para indicar kilómetros
km/h	Unidad de medida para velocidad, kilómetros por hora

GLOSARIO

Aglomerante	Material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias.
Álamo	Tipo de árbol propio de ambientes húmedos.
Ánfora	Recipiente cerámico de largo cuello con dos asas, vasija.
Apisonar	Procedimiento mediante el cual se unifican las partículas del suelo, compactación.
Apuntalar	Colocar columnas provisionales para sostener una estructura o elemento superior.
Arcada	Conjunto de arcos en serie.
Argamasa	Mezcla compuesta de cal, arena y agua.
Barroco	Período histórico que va del siglo XVII al siglo XVIII.
Búcaro	Mitad de fuente instalada en el respaldo de un muro.
Capitel	Elemento arquitectónico que se dispone en el extremo superior de la columna que sirve para soportar cargas horizontales.

CNPAG	Consejo Nacional Para la Protección de la Antigua Guatemala.
Colapsar	Pérdida de funcionalidad o destrucción total de una edificación.
Cóncavo	Forma semicircular elevada en la parte central como en forma de arco.
Consolidar	Proveer firmeza, solidez y estabilidad.
Cubierta	Elemento constructivo que protege a los edificios en la parte superior.
Cuña	Pieza de metal o madera en forma de ángulo usada para asegurar un cuerpo.
Dintel	Elemento horizontal que salva un espacio libre entre dos apoyos, límite superior de puertas y ventanas.
Eclesiástico	De la iglesia o relativo a ella.
Epóxico	Pegamento utilizado para el enlace de unidades estructurales.
Escombro	Conjunto de desechos de una obra derribada.
Estribo	Elemento estructural transversal que actúa ante fuerzas axiales.

Estuco	Pasta formada principalmente de cal, reacciona con el agua endureciéndose hasta lograr la unión de los elementos estructurales.
Fachaleta	Material de acabados sobrepuestos.
Frágil	Material quebradizo, de poca deformación.
Fraguar	Procedimiento de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón.
Hormigón	Mejor conocido como concreto, mezcla de cemento y agregados.
Inherente	Que por su naturaleza esta inseparablemente unido a algo.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Intervenir	Aporte a una estructura dañada.
Monumento	Edificación de valor histórico.
Mortero	Mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción
Mudéjares	Techos domésticos de madera suave.

Nicho	Concavidad en el espesor de un muro para colocar un objeto decorativo.
Patrimonio	Herencia cultural propia del pasado de una comunidad.
Pechina	Cada uno de los elementos estructurales y constructivos que resuelve el encuentro entre la base circular de una cúpula y un espacio inferior cuadrado o poligonal.
Pilastra	Pilar o columna adosado a un muro o pared.
Resanar	Restaurar o reparar los daños de una superficie lisa de elementos estructurales.
Sabieta	Mezcla de arena, cemento y agua.
Saharrar	Término de la época colonial utilizado para mejorar las condiciones de la tierra.
Sismo	Vibración de la tierra ocasionada por el movimiento de las placas tectónicas.
Sismograma	Dispositivo que se utiliza para medir la intensidad de un sismo.
Solera	Elemento horizontal construido en los muros.

Subducción	Proceso de hundimiento de una placa tectónica bajo otra en un límite convergente.
Tañar	Nombre con el que en la antigüedad se le conocía al sonar de las campanas.
Torsión	Dos extremos sobre un eje central que giran en direcciones opuestas.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
Vano	Límite de una abertura en un muro generalmente utilizado para puertas y ventanas.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis cualitativo de las edificaciones monumentales de Antigua Guatemala construidas en la época colonial, las cuales han sido afectadas a lo largo de los años por los acontecimientos sísmicos en esta región.

El trabajo se desglosa empezando por una explicación de los sismos y la influencia de los mismos en la zona que corresponde al país de Guatemala ubicado en América Central.

Se describen datos relevantes en cuanto a la ubicación, la población, historia y actividad sísmica de la ciudad de Antigua Guatemala.

A partir de documentos bibliográficos proporcionados por el Consejo Nacional para la Protección de Antigua Guatemala (CNPAG) se describió acerca de la historia del sistema constructivo de la época colonial, haciendo énfasis en los materiales utilizados, datos que fueron obtenidos en su mayoría del documento Colonial Architecture Of Antigua Guatemala del autor Sidney David Markman.

Los monumentos afectados por acciones externas han sido intervenidos; con base en visitas técnicas e información de gabinete se hace la descripción de las intervenciones y trabajos de restauración que han sido realizados hasta la fecha.

La filosofía del diseño estructural de la época colonial diverge con el sistema constructivo sismo-resistente contemporáneo, es por ello que se describe la importancia de la consolidación sismo-resistente y las características desfavorables para las edificaciones ante los sismos.

El texto incluye la información de algunos precedentes de diseño de elementos estructurales, influencia de sismos y tipos de falla, así como también intervenciones básicas necesarias para la consolidación de edificaciones históricas, contenido que fue obtenido del documento bibliográfico *Ingeniería estructural de los edificios históricos* del autor Roberto Meli que fue proporcionado por la Universidad Autónoma de México (UNAM).

La parte final, se refiere a los aspectos generales que se sugiere tomar en cuenta antes de realizar un proceso de intervención o restauración como también los tipos de intervención básicos que se deben llevar a cabo para la conservación de monumentos de la época colonial.

OBJETIVOS

General

Establecer recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente en edificaciones coloniales en Antigua Guatemala.

Específicos

1. Exponer la importancia de proveer a una edificación de la época colonial una consolidación sismo-resistente en Guatemala.
2. Analizar y comprender el sistema constructivo de la época colonial en la ciudad de Antigua Guatemala.
3. Describir técnicas básicas que actualmente son utilizadas para la restauración de edificios históricos en la ciudad de Antigua Guatemala.
4. Enlazar la lógica utilizada en la época colonial con la ingeniería sismo-resistente en la actualidad.
5. Redactar las recomendaciones generales para la consolidación sismo-resistente de las edificaciones de la época colonial.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se desarrolló la investigación y evaluación de los daños ocasionados por los fenómenos sísmicos a las edificaciones de la época colonial, con una delimitación geográfica ubicada en la ciudad de Antigua Guatemala, para analizar y comprender la estructura de estas edificaciones.

En un marco general, la búsqueda de las causas destructivas e inspección de estos monumentos, fue la base para desarrollar estrategias o mejor llamadas consideraciones generales para la consolidación estructural de los monumentos, tomando en cuenta que uno de los fenómenos naturales que tienen mayor influencia en cuanto a los daños estructurales de las edificaciones se refiere, son los sismos, por lo que se debe tomar como punto principal la aplicación de sistemas sismo-resistentes para garantizar un futuro comportamiento mejorado y prolongar la vida de los monumentos, conservando así, la historia.

Este trabajo de graduación forma parte del Proyecto de investigación registrado con el número FODECYT 023-2010, el cual se desarrolla en el Centro de Investigaciones de Ingeniería y en la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad San Carlos de Guatemala, con el cofinanciamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Guatemala.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Tipos de sismos y las escalas de medición

Por su origen, los sismos se clasifican en naturales o artificiales. Los sismos naturales son los producidos por fallas geológicas (tectónicas), los cuales presentan el mayor peligro o amenaza para el hombre, la actividad volcánica y en menor importancia, por agentes meteorológicos tales como el oleaje del mar. Los sismos artificiales son todos aquellos producidos por la actividad del hombre, entre las principales están las explosiones para la exploración minera, explosiones nucleares, micro sismicidad producida por fábricas y el tráfico de vehículos pesados.

La magnitud de un temblor está directamente relacionada con la cantidad de energía liberada durante el movimiento en la falla, esta energía se puede medir, indirectamente, de la amplitud máxima observada en el sismograma. La magnitud Richter es un número que indica el tamaño de dicha amplitud y por lo tanto mide la cantidad de energía liberada. La magnitud Richter es única para cada temblor y no depende del lugar en que se mida, esta es una de las formas cuantitativas de medir el tamaño de un temblor, sin embargo existen otras escalas de magnitud, pero en principio miden lo mismo.

Tabla I. **Escala de medición de Richter**

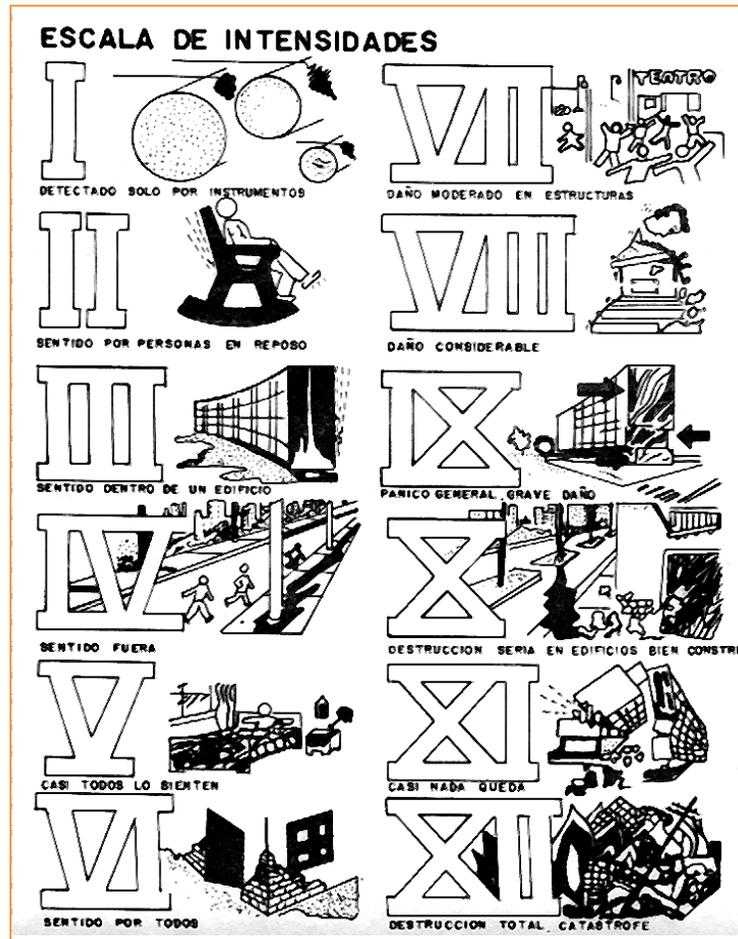
Magnitud	Energía liberada (ergios)	Equivalente a
-2	0,0e+00	Una bombilla de 100 Watts encendida por una semana
-1	2,0e+05	
0	6,0e+06	Ondas sísmicas provocadas por una libra de explosivos
1	2,0e+08	Un camión de 2 toneladas viajando a 120,7 Km/h
2	6,0e+09	
3	2,0e+11	Los sismos más pequeños comúnmente sentidos
4	6,0e+12	1,000 toneladas de explosivos
5	2,0e+14	Terremoto de Pochuta en 1991 (magnitud 5,3)
6	6,0e+15	
7	2,0e+17	Terremoto de 1976 (magnitud 7,5)
8	6,0e+18	Terremoto de 1942 (magnitud 8,3)
9	2,0e+20	Terremoto más grande registrado (magnitud 9,1)

Fuente: INSIVUMEH, folleto de sismología actualizado, 2001. p.7.

La forma más antigua de estimar el tamaño de un sismo es a partir de los daños o efectos que produce, dependiendo del tipo y extensión de los daños se asigna un valor de intensidad sísmica, en la actualidad existen varias escalas de medición de la intensidad sísmica, y una de las más utilizadas es la Escala de Mercalli Modificada (MM).

Los grados de intensidad de la escala Mercalli se presentan en números Romanos de acuerdo a los efectos observados o percibidos (ver figura 1).

Figura 1. Escala de Mercalli Modificada (MM)



Fuente: INSIVUMEH, folleto de sismología actualizado, 2001. p.9.

I grado Mercalli: aceleración menor a 0,5 galones; detectado sólo por instrumentos, sacudida sentida por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.

II grado Mercalli: aceleración entre 0,5 y 2,5 galones; sacudida sentida por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios.

III grado Mercalli: aceleración entre 2,5 y 6,0 galones; sacudida sentida claramente, especialmente en los pisos altos, muchas personas no la asocian con un temblor. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración asociado con paso de un carro pesado.

IV grado Mercalli: aceleración entre 6,0 y 10 galones; sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas personas se despiertan. Vibración de las vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.

V grado Mercalli: aceleración entre 10 y 20 galones; sacudida sentida casi por todos; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios, etc, se rompen; pocos casos de agrietamiento; objetos inestables caen; se observan perturbaciones en los árboles, postes y algunos elementos altos; detención de relojes de péndulo.

VI grado Mercalli: 20 y 35 galones; sacudida sentida por todos; muchas personas atemorizadas huyen hacia afuera. Algunos muebles pesados cambian de sitio, pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas.

VII grado Mercalli: aceleración entre 35 y 60 galones; advertida por todos. La gente huye hacia el exterior. Daño moderado sin importancia en estructuras de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas, daños considerables en las débiles o mal planeadas; ruptura de algunas chimeneas. Estimado por las personas conduciendo vehículos en movimiento.

VIII grado Mercalli: aceleración entre 60 y 100 galones; daños ligeros en estructuras de buen diseño; considerable en edificios ordinarios con derrumbe parcial; gran daño en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, estantes en los almacenes, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados vuelcan. El nivel de agua cambia en los pozos. Pérdida de control de los autos en movimiento.

IX grado Mercalli: aceleración entre 100 y 250 galones; daño considerable en estructuras de buen diseño; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen. Pánico general.

X grado Mercalli: aceleración entre 250 y 500 galones; destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen con todo y cimientos; agrietamiento considerable del terreno. Las vías del ferrocarril se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.

XI grado Mercalli: aceleración mayor a 500 galones; casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimientos y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.

XII grado Mercalli: destrucción total, ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel. Objetos lanzados al aire hacia arriba. Catástrofe.

1.2. Descripción de la zona sísmica de Guatemala

Guatemala se encuentra ubicada en una zona sísmica de alto riesgo debido a que su territorio está repartido en tres placas tectónicas: Norteamérica, Caribe y Cocos (ver figura 2). Los movimientos relativos entre ellas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de terremotos y volcanes.

Figura 2. Zona sísmica de Guatemala

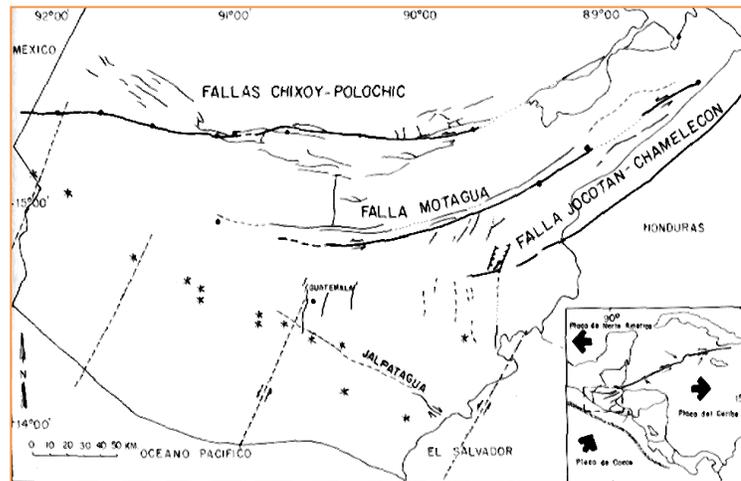


Fuente: <<http://defensacivilmaimon.files.wordpress.com/2009/03/placasuh6.jpg>>

[Consulta: octubre de 2011]

El contacto entre las placas de Norteamérica y Caribe es de tipo transcurrente, lo cual se puede determinar como un tipo de rose en sentido contrario entre los bordes de las dos placas, su manifestación en la superficie son las fallas de Chixoy-Polochic y Motagua (ver figura 3).

Figura 3. Tipos de fallas de Guatemala



Fuente: INSIVUMEH, folleto de sismología actualizado, 2001. p.4.

El contacto entre las placas de Cocos y del Caribe es de tipo convergente, en el cual la Placa de Cocos se mete por debajo de la Placa del Caribe generando el fenómeno conocido como subducción. Este proceso da origen a una gran cantidad de temblores y formación de volcanes. El contacto entre estas dos placas está aproximadamente a 50 kilómetros frente a las costas del Océano Pacífico.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE ANTIGUA GUATEMALA

2.1. Ubicación y datos geográficos

Antigua Guatemala está a 1530 metros sobre el nivel del mar, el clima regularmente templado varía, de día 23 grados Celsius y de noche 14 grados Celsius, se encuentra rodeada en todo su perímetro por una región montañosa, en el departamento de Sacatepéquez, el cual forma parte de los 22 departamentos de la república de Guatemala, ubicada en América Central.

Figura 4. Ubicación geográfica de Antigua Guatemala



Fuente: <<http://sociapostol3.blogspot.com/2012/09/t1-los-continentes>>.
[Consulta: octubre de 2011].

Antigua Guatemala es una ciudad histórica, reconocida por su bien preservada arquitectura renacentista española, en ella sobrevive la tercera universidad de América, la Universidad de San Carlos de Borromeo; fue designada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1979; es una de las ciudades con mayor demanda turística en Guatemala.

La ciudad está conformada por un conjunto de monumentos entrelazados por calles empedradas que brindan un paisaje único y excepcional, entre los monumentos se puede mencionar entre los más importantes: El Arco de Santa Catarina, Nuestra Señora de las Mercedes, San José de Catedral, El Portal de las Panaderas, El Palacio del Ayuntamiento, El Palacio de los Capitanes, El Convento de las Capuchinas, entre otros.

2.2. Descripción general de la población

Antigua Guatemala tiene una población (según estimaciones para el 2012) de 45393 habitantes (22076 son hombres y 23318 son mujeres), de los cuales un 45 por ciento son de origen maya-quiché, 45 por ciento son considerados mestizos o también llamados ladinos, y un 10 por ciento de habitantes blancos origen europeo, negros y asiáticos.

En Antigua Guatemala el idioma predominante es el Español, sin embargo, algunos de los pobladores indígenas de ciertas aldeas aledañas al casco urbano de la ciudad habla el idioma Kaqchikel.

En cuanto al comercio, la actividad predominante y de mayor relevancia es la artesanal, razón por la que se encuentra una gran cantidad de locales comerciales de artesanías en su mayoría artísticas.

Figura 5. **Productos de artesanía textil**



Fuente: mercado de artesanías, Antigua Guatemala.

2.3. Breve descripción de la historia de la ciudad de Antigua Guatemala

La ciudad de Antigua Guatemala fue la tercera sede de la capital del reino de Guatemala que comprendía los actuales Estados de Guatemala, Belice, Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Chiapas. Luego de la destrucción por inundación del segundo sitio, ubicado en el valle de Almolonga (tras abandonar el asentamiento de Iximché en 1527), fue construida a partir de 1543 por el ingeniero Juan Bautista Antonelli en el valle de Panchoy a las faldas del volcán de Agua, y establecida como cabecera de la Real Audiencia de Guatemala en 1549. Durante su desarrollo y esplendor fue conocida como una de las tres ciudades más hermosas de las Indias Españolas.

Debido a las circunstancias especiales de los terremotos ocurridos el 29 de julio de 1773, en el florecimiento del barroco, el proceso de crecimiento de la ciudad fue interrumpido.

Sin embargo, Antigua Guatemala ha permanecido detenida en el tiempo, conservando aún edificaciones que fueron afectadas por los acontecimientos sísmicos las cuales son conocidas en la actualidad como “ruinas”, debido al estado crítico de las mismas; es una ciudad que es conocida como “Ciudad de las perpetuas rosas” y a sus habitantes se les conoce como “panzas verdes”.

A causa de los dos graves terremotos, conocidos como terremotos de Santa Marta, que destruyeron gran parte de la ciudad, el presidente de la Audiencia de Guatemala, Martín de Mayorga, decidió que era pertinente la reconstrucción de la ciudad en un lugar más seguro. La nueva ciudad se llamó Nueva Guatemala de la Asunción, lo que hoy es la Ciudad de Guatemala.

2.4. Antigua Guatemala en una zona sísmica

En los numerales anteriores se generalizó acerca de la influencia de las placas tectónicas en Guatemala, sin embargo, existen diferentes rangos de valores de comportamientos sísmicos en cada uno de los departamentos de Guatemala, los cuales se grafican en la figura 6.

2.4.1. Zona sísmica de Antigua Guatemala

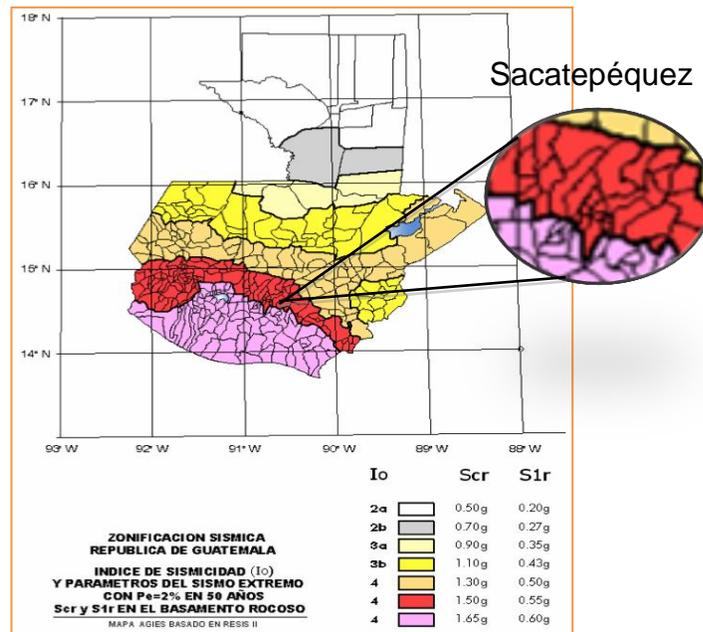
De acuerdo a la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), para la ciudad de Antigua Guatemala los parámetros de comportamiento sísmico son: $I_0 = 4$, $S_{cr} = 1,65$ grados y $S_{1r} = 0,60$ grados

El índice de sismicidad (I_0) es una medida relativa de la severidad esperada del sismo en una localidad e incide sobre el nivel de protección sísmica que se hace necesario para diseñar determinada obra o edificación.

Los parámetros S_{cr} y S_{1r} son respectivamente la ordenada espectral de período corto y la ordenada espectral con período de un segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés, en teoría, sin la influencia del suelo que cubre el basamento. Los parámetros combinados y los rangos de todos los factores en Guatemala se grafican en la figura 6.

Por medio de estos parámetros y la utilización de fórmulas se obtienen los datos necesarios para el diseño de las edificaciones de acuerdo al lugar en donde sean construidas como por ejemplo, la aceleración máxima de un sismo.

Figura 6. **Mapa de zonificación sísmica en Antigua Guatemala**



Fuente: AGIES NSE 2-10, condiciones de sitio y niveles de protección, 2002 p.63.

2.4.2. Registro histórico de la actividad sísmica en Antigua Guatemala

Durante el asentamiento de la ciudad en el siglo XVI se presentaron movimientos sísmicos de gran importancia, uno de ellos casi destruyó por completo la ciudad en 1586, muchas de las edificaciones que se encontraban en procesos constructivos sufrieron daños considerables, de manera que para continuar la construcción se debían reparar los daños provocados.

En el siglo XVII la cantidad de edificaciones seguía aumentando mientras la población crecía, muchos de los trabajos de albañilería estaban centralizados en la reconstrucción de las edificaciones que habían sido dañadas, sin embargo, el 9 de octubre de 1607 un terremoto de gran magnitud azotó la ciudad nuevamente, razón por la cual se emitió una orden a todos los pobladores indios de las afueras de la ciudad para la contribución en la remoción de escombros y la reconstrucción de las edificaciones dañadas.

Entre los siglos XVI y XVII la ciudad sufrió de muchos acontecimientos sísmicos desde 1590 a 1659, sumando 69 años de condiciones desfavorables para el desarrollo de la ciudad. En el siglo XVIII, el 29 de julio de 1773, día de la festividad de Marta de Betania, ocurrió un fuerte sismo en la localidad a eso de las tres de la tarde. Una hora después fue seguido de un violento terremoto (en esta época no se contaba con aparatos de mediciones sísmicas), que duró alrededor de un minuto en medio de una tenaz lluvia que azotaba el lugar.

La sacudida ocasionó el destrozo de las edificaciones religiosas, gubernamentales y privadas, así como rompió acueductos y provocó la escasez de alimentos, pues los nativos, que abastecían a la población, habían huido a los montes.

Para el siglo XIX se comenzó con los procesos de restauración de los monumentos, en la figura 7 se puede observar grabados de los estados de los templos en el año de 1859.

Figura 7. **Grabados de iglesia San Francisco y la Compañía de Jesús**



Fuente: MELI, R. Ingeniería estructural de los edificios históricos, p.9.

En el siglo XX, en la madrugada del 4 de febrero de 1976, Antigua Guatemala despertó sobresaltada por un fuerte sismo. Eran las 3:03:33 horas. La fase de destrucción duró solamente 49 segundos, y la intensidad fue de 7,6 grados en la escala de Richter, aproximadamente la energía equivalente a la explosión de dos mil toneladas de dinamita.

La ciudad histórica ha sufrido varios sismos a través del tiempo ocasionando daños severos en las edificaciones importantes de la ciudad, las cuales a lo largo del tiempo se han intervenido en varias ocasiones tratando de evitar el deterioro de las mismas no solamente ante las fuerzas sísmicas sino también factores externos como el clima, la población, vibraciones de autos, los insectos y la vegetación.

3. EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA ÉPOCA COLONIAL

3.1. Historia del sistema constructivo de la época colonial de Antigua Guatemala

Es importante resaltar que sorprendentemente a pesar de los grandes avances de las matemáticas y la física de muchas civilizaciones de la antigüedad, no haya llevado a la aplicación de estas ciencias al cálculo estructural, no existe evidencia cuantitativa de las leyes de las matemáticas y la física para determinar dimensiones y la forma de las estructuras, más bien se obtenían con lo que podría llamarse intuición educada, la ciudad de Antigua Guatemala no fue una excepción de la ausencia de el cálculo estructural.

La complejidad de las formas constructivas que se emplearon en las edificaciones de gran magnitud, fueron diseñadas y realizadas recurriendo a conceptos geométricos relativamente elementales, se utilizó principalmente la llamada geometría constructiva basada en la manipulación de cuadrados, círculos y triángulos, para definir los puntos y trazos necesarios.

Antes de enfatizar en el tema, es preciso un conocimiento previo de una variedad de condiciones propias de este lugar, el fondo de sitio, economía y eventos sísmicos, cada uno de estos elementos tuvo un papel importante en la arquitectura de esta ciudad, sin embargo, las influencias de españoles e indígenas involucrados en la construcción de las edificaciones eran secundarias ante las condiciones físicas locales.

No existe una manera directa para señalar el carácter constructivo único de esta capital colonial, aunque con frecuencia se hablaba de los diseñadores y constructores como ingenieros de fortificaciones, no hay evidencia alguna de fabricas como las utilizadas en México, sin embargo vinieron a la colonia constructores y artesanos para dirigir la construcción de los edificios.

Los Españoles eran inherentemente constructores 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 muros y cimentaciones seguían un mismo patrón constructivo con solo una tentativa tosca de ajustar las piedras en argamasa. El espesor de dichos elementos variaba según la altura de la edificación, en los muros se usaban hileras de ladrillos grandes para nivelar y luego se continuaba la construcción con piedras.

En la parte superior de los muros sobre todo cuando había una transición a bóvedas de medio cañón o cúpulas hechas de ladrillo, se usaban solamente ladrillos. Este tipo de construcción exigía que se cubrieran las paredes por dentro y por fuera con estuco o yeso. Aún la mezcla de los primeros edificios endureció de tal manera que hizo una unión fuerte.

Se encontraba disponible madera y hasta mediados del siglo XVII las iglesias y las piezas mas grandes de los monasterios fueron techadas con tejas por encima de una armazón de madera. En los edificios mas primorosos se tallaron las vigas y se hicieron los techos de tableros. Hay descripciones de techos mudéjares y artesonados.

Los constructores del primer siglo de Antigua Guatemala tenían muy en cuenta los peligros de los terremotos, puesto que hubo al menos cinco entre 1565 y el muy grave de 1586, si hubiera existido una tendencia a construir campanarios altos o muros elevados hubieran servido de aviso a estos movimientos sísmicos periódicos antes de haberse acabado un número considerable de fabricas de importancia.

De cualquier manera, muros espesos y reparaciones continuas bastaron para conservar los primeros edificios formales por casi un siglo. Después de los terremotos de 1651 quedaron muy pocos edificios del siglo XVI. Muros debilitados y techos de madera roídos no pudieron resistir este terremoto mayor. Ya se trataba de reconstruir, mas bien de reparar. Si hubiera sido este el último desastre de tal categoría, es posible que hubieran quedado unos cuantos restos del siglo anterior, ya que sin duda rehabilitaron algunas partes de unos edificios sin cambiar los planos primitivos. Pero lo que quedó entonces no puede identificarse hoy como del siglo XVI.

Para 1717 todas las instituciones mayores construidas antes de 1651 se acercaban a su reconstrucción. A pesar de daños serios causados por el terremoto de 1689, se habían aumentado en tamaño y en número los conventos, monasterios, iglesias, edificios públicos y casas particulares.

Se había reemplazado con bóveda de madera en la mayor parte de los templos, se habían añadido contrafuertes para reforzar muros o para sostener arcos de piedra y se habían elaborado las fachadas de las iglesias incorporando una variedad de formas barrocas. Pero fue 1717 otro año de gran destrucción y por consiguiente la mayoría de los edificios que se habían construido antes de 1689 necesitaban reconstrucciones considerables.

De esto resulta que no es fácil estar seguro de cual parte de una fabrica o si alguna porción es totalmente del siglo XVII. Afortunadamente desde el punto de vista del historiador de la arquitectura no fueron completamente arrasados y reconstruidos los edificios mas viejos.

3.2. Materiales más utilizados en la época colonial

La construcción en la época colonial se caracterizaba por sus edificaciones monumentales, que por su magnitud los materiales empleados y los elementos estructurales debían ser muy resistentes.

Para desarrollar el tema de los materiales utilizados es necesario mencionar que: después de una serie de inspecciones bibliográficas y visitas técnicas es muy notorio que los constructores de la época no parecen haber seguido normas que regularan el proceso constructivo, seguramente por la falta de recursos técnicos y humanos, ejemplo de ello, la utilización de diferentes sistemas constructivos en una misma edificación. Por tal conclusión se puede saber que los materiales empleados fueron variados tanto por la falta de recurso como la falta de diseño en la época colonial.

El material compuesto predominante en los principios de esta ciudad fue el adobe combinado con refuerzos de ladrillo de barro cocido o piedra, unidos por un mortero compuesto por arena y cal.

La piedra predominaba en la construcción, fue utilizada en todas las partes de las estructuras, con mayor frecuencia en muros, eran colocadas de diferentes tamaños y al quedar algún hueco era rellenado con ladrillo o pequeños pedazos de la misma piedra, los bloques de piedra utilizaban de aglomerante la argamasa.

Tabla II. **Resistencias a compresión según tipo de piedras**

Grupo	Tipo de rocas	Resist. mín. a compresión (kg/cm ²)
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, R. Ingeniería estructural de los edificios históricos, p.21.

En los muros de piedra se pueden apreciar hiladas de ladrillo de barro cocido lo cual a simple vista parecería una especie de solera, sin embargo, después de analizar varias piezas se puede observar que en todos los muros se presenta variación en las hiladas de ladrillo lo cual da la impresión que el constructor no seguía una norma, sino disponía el diseño a su gusto.

La piedra de río grande fue empleada para la cimentación de los monumentos, siendo la misma de origen volcánico según la tabla II con una resistencia a la compresión cerca de 200 kilogramos por centímetro cuadrado.

La piedra no se utilizó en elementos que tuvieran que soportar directamente la carga de arcos y bóvedas, debido a la dificultad que se encontraba en el amarre para la transición de fuerzas, por esta razón hubo una inclinación a utilizar ladrillo de barro cocido.

Otra de las utilidades fue la piedra tallada, aunque en la ciudad la piedra que existía no era favorable debido a que se quebraba con facilidad; la piedra tallada fue utilizada para la realización de bases para columna, como algunos otros detalles de molduras.

3.3. Descripción de los tipos de elementos estructurales de la época

Para poder describir cada uno de los elementos estructurales cabe mencionar que las investigaciones que han sido realizadas por arqueólogos e historiadores arrojan datos no precisos, debido a que las construcciones de los monumentos fueron realizadas a lo largo del tiempo por diferentes colaboradores de la época, no obstante conforman patrimonio, lo cual indica que unicamente pueden ser intervenidos con ensayos no destructivos en objeto de investigación.

3.3.1. Cimentaciones

En la figura 9 se observa la parte central del templo del convento de Santa Clara, en la actualidad es difícil poder acceder a muestras físicas de las cimentaciones de las edificaciones porque las áreas no pueden ser intervenidas fácilmente ya que conforman patrimonio cultural, por lo que solo se cuenta con información bibliográfica de las mismas la cual se describe como sigue.

Figura 9. **Vista de bóvedas de cimentación**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

Debido a la altura de las edificaciones y el grosor de sus muros las cimentaciones debían ser de gran magnitud, peso y dureza para poder soportar las cargas transmitidas de toda la edificación al suelo.

Los indígenas de la ciudad fueron empleados como esclavos para excavar y rellenar las enormes zanjas de cimentación, según escritos de la época las cimentaciones debían ser "...y los cimientos muy hondos, que tendrán dos estados, y de ancho diez pies, y estos los hinchen de piedra, cal y tierra que los yndios traen acuestas...".¹ Según Fray Lorenzo advertía que la profundidad de la zanja de cimentación debía ser, un tercio de el ancho de la edificación para iglesias y de un cuarto para viviendas privadas. En cualquiera de ambos casos el objetivo de realizar la zanja tan profunda era buscar el suelo sólido, lo que significaba que los cimientos descansarían sobre una base de suelo fuerte y resistente.

Si en la excavación no se encontraba suelo sólido entonces se lanzaban arcos sobre las partes débiles de la zanja e incluso se construían pilotes de cimentación compuestos de alamo negro, oliva, roble o sauce los cuales eran resistentes a la acción del agua. Estos pilotes debían de ser carbonizados y apisonados con martillos hasta que el suelo estuviera sólido.

Principalmente para el llenado de la zanja se utilizaban piedras grandes y pequeñas según el espacio a rellenar, inicialmente se colocaba la piedra seca formando una capa para luego aplicar cal sobre ellas antes de humectarlas buscando la función de la cal como aglomerante.

¹ Sagredo, Diego de, Medidas; see Sánchez Cantón, "Diego de Sagredo y sus medidas del Romano," Arquitectura, p.120. a. 1526

En algunos casos también se utilizaba arena para solidificar la cimentación, para estos casos se empleaba mayor cantidad de agua y la piedra colocada debía ser apisonada. En Antigua Guatemala en lugar de la piedra de cantera se utilizó piedra volcánica en forma de grumos grandes, esta piedra fue y es utilizada en la actualidad y es conocida como terrón.

3.3.2. Muros

En la figura 10 se observa uno de los muros de las naves secundarias del convento Santa Clara, fueron construidos a base de piedras y ladrillos de barro cocido.

Figura 10. **Muros de piedra**



Fuente: Convento Santa Clara Antigua Guatemala.

Los muros de tierra apisonada y reforzada con pilares de mampostería se realizaban aún en el siglo diecisiete XVII, como muestra de ello se puede encontrar las paredes de las iglesias de Santa Catalina y de Los Remedios.

El sistema antiguo, también conocido como “adobe”, utilizaba como aglomerante el barro, que por su baja resistencia solo se utilizó en muros de casas particulares y edificios de poca importancia a inicios del siglo XVIII.

El nuevo sistema implementado para la construcción de los muros fue principalmente a base de piedras no talladas o rocas colocadas en forma similar al antiguo sistema de levantado de muros de tierra apisonada, pero utilizando como aglomerante una mezcla de cal, arena y agua, dichos muros incluían filas de ladrillos que se asemejan a lo que comúnmente se conoce como soleras, las cuales se colocaban a criterio de los constructores de la época; entre las uniones de muros y entrepisos o bóvedas comúnmente se colocaban varias filas de ladrillos lo que se puede definir como una solera corona, que debía forzosamente ser cubierta por dentro con estuco y yeso, proporcionando una resistencia a la compresión de 5-20 kilogramo/centímetro cuadrado en uniones.

El grosor de los muros dependía de su altura, la proporción era a criterio de cada constructor, por ejemplo en el siglo diecisiete los muros eran frecuentemente gruesos, algunos de ellos llegaban a ser de dos metros o hasta incluso más, para el siglo dieciocho estos grosores fueron estandarizados, generalizando una medida de un metro con cincuenta centímetros de grosor.

Los muros en las fachadas fueron construidos con un sistema diferente, en la base de los muros justo por encima de la cimentación se utilizaban medidas grandes de grosor aproximadamente de tres metros, pero mientras al muro ganaba altitud el grosor reducía, generalmente las fachadas fueron construidas de tres niveles cada uno de ellos con diferente grosor, el último de ellos generalmente se construía únicamente con ladrillo, las fachadas de las edificaciones se comparan con un panal de abejas ya que se construyeron con una cantidad considerable de detalles los cuales principalmente eran nichos.

Otra práctica realizada en muros eran los contrafuertes, estos eran elementos estructurales contruidos en la parte exterior de la edificación accionando en forma de cuñas para soportar el peso de el muro, algunas veces se practicaba el relleno con mampostería entre dichos contrafuertes los cuales no solamente brindaban más soporte a los mismos si no que también evitaba que la humedad de el suelo pasara a los muros.

3.3.3. Columnas

Frecuentemente las columnas eran construidas en forma masiva, utilizadas para brindarle mayor soporte a los muros como era tan requerido en muros de adobe. En el caso de las estructuras de bóvedas, las columnas eran construidas únicamente en la parte exterior que daba a la calle, o la fachada, permitiendo de esa manera descansar los arcos sobre capiteles colocados en la parte superior de las columnas brindándole soporte y resistencia a la bóveda, los arcos finalizaban en algunas ocasiones sobre columnas incrustadas en el muro llamadas pilastras, ejemplo de ello se puede encontrar la fachada de el Real Palacio ubicada en el parque central de Antigua Guatemala.

La geometría de las columnas era variable, de sección generalmente circular o cuadrada, algunas cortas otras largas; en la época se fabricaron piezas de ladrillo cóncavas, las cuales podían ser colocadas para darle forma más definida a las columnas circulares. Las columnas fueron construidas principalmente de ladrillo (ver figura11), sin embargo, para columnas con funcionalidad de contrafuertes, y en columnas incrustadas en los muros (pilastras) su utilizó piedra.

Figura 11. **Columnas**



Fuente: nave central de La Catedral, Antigua Guatemala.

Cuando se colocaban las columnas dentro de las paredes, estas se recomendaba que fueran construidas a una distancia no mayor que el ancho total de la edificación, y que su anchura fuera de un sexto del mismo ancho de la edificación, de tal manera que pudiera completar junto con la pared un tercio de el ancho total de la edificación, dicha recomendación fue aplicada luego de los terremotos de 1717.

Los arcos eran construidos usualmente de ladrillos o en algunos casos de piedra; los arcos fueron unos de los elementos estructurales de la época de mayor importancia, no solo en su aplicación, ya que muchas de las edificaciones coloniales están básicamente diseñadas y construidas a base de arcos, si no también por el soporte estructural que brindó a la edificación.

3.3.4. Arcos

En la figura 12 se observa la utilización de los arcos que en su tiempo funcionaron como base para la construcción de la cubierta del templo, la cual fue conformada por techos en forma de bóvedas.

Figura 12. Arcos



Fuente: nave central de La Catedral, Antigua Guatemala.

Los arcos tenían diferentes funcionalidades, se pueden encontrar usualmente en soportes de entresijos de corredores, también fueron utilizados para vanos de portones en las fachadas o hasta incluso en vanos de puertas pequeñas.

3.3.5. Cubiertas y entrepisos

En las edificaciones de la época colonial, lo más común utilizado para los entrepisos fue el armado o artesonado de madera como se muestra en la figura 13, debido a su facilidad de instalación, prueba de ello se encuentran los muros de piedra que muestran una serie de hoyos en serie los cuales servían para instalar los canes de madera que soportaban el entrepiso o en algunos otros casos las cubiertas.

Figura 13. **Entrepiso de madera artesonada**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

Otro sistema utilizado para entrepisos y cubiertas fue el relleno sobre bóvedas que recostaban sobre arcos y a su vez en columnas, estos rellenos se realizaban de diferentes maneras, por ejemplo en algunos casos solo se colocaban estructuras de madera recostadas sobre grandes ánforas en las esquinas para disminuir la carga muerta del entrepiso sobre la bóveda. Otro sistema utilizado era el relleno con selecto para alcanzar un nivel plano y en colocando espacios vacíos utilizando las mismas ánforas.

Las cubiertas eran construidas de diferentes maneras, sin embargo cuando se trataba de edificaciones monumentales las cubiertas se construían sobre gigantescos arcos de ladrillo recostados sobre columnas independientes o incrustadas en los muros, formando así cubiertas en forma de cúpulas o bóvedas gigantes, llegando a cubrir un espacio de hasta cien metros cuadrados o incluso más.

3.3.6. Vanos de puertas y ventanas

Los vanos generalmente eran construidos en forma de arcos de ladrillo, para poder soportar las cargas de los muros superiores; la piedra no era tan utilizada debido a la dificultad de su colocación, sin embargo algunos de los arcos eran construidos de piedras cortadas con una sección en forma de triángulos truncados de manera que pudieran colocarse con menor dificultad.

Figura 14. **Vano de una ventana**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

En algunos casos por ejemplo sobre puertas o ventanas que tuvieran luz larga o que debían soportar cargas superiores, se colocaban vigas de madera incrustadas (ver figura 14) y recostadas sobre pilastras que permitían un mejor soporte que un arco en forma elipsoidal ya que el dintel no permitía la construcción de los mismos.

3.3.7. Bóvedas

Las bóvedas fueron uno de los elementos mas utilizados para la división de niveles o entrepisos, incluso en las edificaciones monumentales se utilizaron para cubiertas como se muestra en la figura 15; eran construidas de ladrillo colocado a manera de brindarle la forma cóncava, los ladrillos utilizaban argamasa como aglomerante y luego se aplicaba una capa de estuco por ambos lados para fortalecer y endurecer la estructura.

Figura 15. **Bóveda cubierta en capilla central**



Fuente: La Catedral, Antigua Guatemala.

En algunos casos las bóvedas eran construidas en sótanos para soportar el peso del suelo que funcionaba como entrepiso, su objetivo era cumplir con diferentes funcionalidades como era el caso de bodegas o cuartos fríos para alimentos, como también conexiones entre lugares y hasta para dar culto y enterrar a personas importantes de la época.

3.3.8. Otros elementos importantes

Los elementos básicos de las edificaciones fueron descritos con anterioridad, sin embargo, existen elementos que forman parte importante en las edificaciones históricas.

3.3.8.1. Fachadas

Las fachadas eran construidas como muros en forma de niveles, reduciendo su grosor conforme su altura, como fue explicado con anterioridad, las fachadas eran la representación de la edificación por lo que debía ser muy elaboradas porque que representaban ya sea a las autoridades de la ciudad o en su mayoría la creencia de el pueblo con iglesias católicas.

Figura 16. **Fachada de ataurique**



Fuente: Iglesia La Merced, Antigua Guatemala.

Las fachadas fueron construidas simulando la forma de los panales, incluyendo una cantidad considerable de nichos entre sus gruesas paredes, en los cuales se colocaban estatuas o replicas de personas importantes de la historia, la decoración de las fachadas era conocida como *ataurique* y consistía en la geometría abstracta basada en su mayoría en la flora, este tipo de acabados en fachada se encuentra en edificaciones como la iglesia de La Merced (figura 14), La Candelaria, San Sebastián entre otras.

3.3.8.2. Acabados

En la fotografía siguiente se observa el tipo de acabado original que fue aplicado a los muros en el Real Palacio de Antigua Guatemala, las partes mas oscuras son muestra de ello, mientras que la parte mas clara son acabados aplicados recientemente para proteger las partes caídas que permitían el deterioro de los muros.

Figura 17. Acabados originales



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

Los materiales con que se construían los diferentes elementos estructurales, en ninguna instancia se dejaron expuestos, si no que fueron cubiertos con el mismo estuco, lo cual a lo largo del tiempo aportó protección a estas edificaciones, incluso algunas veces las paredes exteriores e interiores solían ser cubiertas con una capa de piedras talladas formando una especie de cuadrícula como por ejemplo en Santa Clara, Las Capuchinas y el Palacio del Ayuntamiento.

Sin embargo, con el pasar de el tiempo se estableció un tipo de acabado general o estándar para las edificaciones de la manera "... de ser encalada a dos manos, la primera de cal y arena y tierra saharada, y la segunda de cal blanco, conforme el uso de encalado...", esto refleja que desde esa época ya se empezaban a establecer normas o métodos a seguir.

3.4. Análisis cualitativo de los daños ocasionados por los sismos a las edificaciones de la época colonial

Hasta la fecha, se sabe que los sismos son una amenaza para las obras estructurales, pero principalmente para edificaciones de gran magnitud como los son los monumentos de Antigua Guatemala.

Anteriormente se respetaban dos criterios, las edificaciones debían ser excesivamente esbeltas, y sus cimentaciones lo mas profundas posibles, para que fueran resistentes a los sismos; lo que actualmente se conoce como una edificación no resistente a los sismos.

Sin embargo, en el siglo XVII poco tiempo después de los terremotos, se hizo notar que la teoría era incierta, ya que edificaciones no esbeltas ni cimentadas con profundidad pudieron soportar los fuertes sismos que las grandes edificaciones no pudieron soportar, por ello las edificaciones del siglo XVII están construidas con un sistema que se podría llamar “sismo-resistente” determinado empíricamente por los constructores, ese sistema fue también ineficiente; después de analizar el sistema constructivo de la época colonial en los numerales anteriores, es relativamente fácil comprender los diferentes tipos de fallas que se presentaron en cada uno de los elementos estructurales.

Los monumentos de la época colonial, se entiende que fueron de grandes similitudes constructivas, por lo que vale la pena tomar de ejemplo tres de las edificaciones de mayor importancia en la historia colonial.

3.4.1. Real Palacio de Antigua Guatemala

El Real Palacio (figura 18) comprende una de las edificaciones mas importantes del patrimonio debido a que se encuentra en la plaza central de Antigua Guatemala, lo cual merece atención para evitar que pueda sufrir de mas daños la edificación.

El conjunto de elementos estructurales permitieron que la edificación fuera sumamente afectada por los movimientos sísmicos, la parte trasera o sur del palacio, fue afectada en su totalidad, quedando únicamente la parte inferior de muros y columnas que conformaban la estructura y los ambientes como se muestra en figura 19.

Figura 18. **Fachada principal**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

Figura 19. **Daños ocasionados por sismos en lado sur**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

El lado sur de esta edificación estaba conformada por la construcción de dos niveles de los cuales únicamente quedo en pie aproximadamente la mitad de la altura de los muros del primer nivel, en esta parte en especial se puede observar y ejemplificar la manera en que fueron construidos los diferentes elementos debido a que en los cortes naturales se aprecian los materiales y aglomerantes utilizados.

Los muros altos en su mayoría presentaron fallas irreparables las cuales al continuar los movimientos sísmicos a lo largo de los años llevaron al colapso de los mismos.

En el caso de los arcos en la parte de la fachada o lado norte, se observa una pequeña inclinación hacia adelante de un número considerable de arcos que al parecer presentan cierto amarre entre sus elementos, esto indica la falla de un grupo de arcos funcionando en conjunto que debido al movimiento sísmico alteraron su posición quedando deformados y en peligro de colapsar.

En vanos de puertas y ventanas que se mantienen en pie, y que pudieron sobreponerse ante los sismos, se puede observar rajaduras o fisuras en la parte central, las cuales en su mayoría pueden ser intervenidas y recuperadas, caso contrario de los vanos que colapsaron en su totalidad.

Un número considerable de columnas internas de la edificación presentaron fallas por deslizamiento en sus secciones lo cual hace parecer que la columna fue cortada por la parte central y corrida sobre la misma, esto contribuyó a que la estructura superior presentara fallos y rajaduras, algunas columnas colapsaron quedando únicamente en pie parte de ellas, sin embargo, se encontraron columnas que fueron capaces de resistir los movimientos sísmicos.

Figura 20. **Colapso de elemento estructural**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

En la figura 20 se puede apreciar con claridad la falla en un arco ubicado en la parte oriente de la edificación, esta falla fue típica en todas las estructuras al momento de presentarse movimientos sísmicos, en este caso se puede apreciar también la ausencia de cubierta la cual fue destruida en consecuencia de la falla de los arcos que la soportaban.

3.4.2. La Catedral de Antigua Guatemala

San José de Catedral, uno de los monumentos que conforman la plaza mayor de Antigua Guatemala, actualmente funciona como iglesia utilizando una de sus capillas que quedaron en pie después de los movimientos sísmicos presentados.

Figura 21. **Fachada principal**



Fuente: La Catedral, Antigua Guatemala.

Este monumento es una de las iglesias más extensas en su área de construcción, la fachada principal (figura 21) conserva su estado original, sin embargo en el lado oriente solamente quedan ruinas y restos de lo que fue un día la Catedral Metropolitana.

En la figura 22 se muestran tres tipos de falla que se presentaron con frecuencia dentro de toda la edificación, como por ejemplo, las columnas centrales y laterales presentaron grandes desfases entre la parte inferior y la parte superior de la columna, en la fotografía se aprecia una intervención realizada con anterioridad en la cual se restauró la parte inferior desfasada de la columna para evitar el colapso de la misma.

Figura 22. **Daños ocasionados por sismos en lado oriente**



Fuente: La Catedral, Antigua Guatemala.

En la figura 22 se puede observar una columna desfasada en su sección como también uno de los muros de doble altura que perdió una porción grande, incluso se aprecia el desprendimiento de los acabados en la parte inferior del muro; lo que se puede observar es solo una parte de lo que conformaba un muro de aproximadamente veinte metros de largo que fue totalmente destruido, así como también la cubierta que el mismo soportaba, se aprecia que este muro fue intervenido para evitar su futuro colapso.

En la tercer imagen de la figura 22 se observa cómo queda en pie una porción de cubierta tipo bóveda, por lo que se puede notar entonces que la secuencia de arcos que soportaba la cubierta fue derrumbada por los movimientos sísmicos y como consecuencia la cubierta colapso y con su caída contribuyó a que la estructura inferior también colapsara y se derrumbara.

3.4.3. Convento de Santa Clara

Esta edificación data del siglo XVII, fue sumamente afectada por los movimientos sísmicos en 1773 dejando en ruinas su totalidad; para poder describir lo ocurrido con la estructura fue necesario realizar un análisis en el sitio de lo cual se observaron los diferentes fallos estructurales que causaron el colapso total de la edificación.

Figura 23. Fachada principal



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

En la imagen (figura 24) se puede observar claramente una de las fallas más comunes que fueron ocasionados por los sismos en lo que corresponde a vanos de puertas y ventanas, o como en este caso en portones o entradas principales. Este problema se presenta en la mayor parte de edificaciones, principalmente en fachadas y en los cambios de ambientes en donde existen luces libres o muros altos con vanos de gran dimensión.

Figura 24. **Fachada de entrada secundaria**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

Figura 25. **Vano de ventana**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

La figura 25 muestra un vano que aparentemente finaliza en un nivel, sin embargo, lo que ocasionó la falla fue el peso de la estructura del segundo nivel de la cual no quedó absolutamente nada en pie, la parte central del dintel se mantiene allí simplemente por la fricción de los elementos fracturados.

A lo largo de la estructura del convento de Santa Clara se puede observar este mismo tipo de fallas en vanos de puertas y ventanas.

La mayor parte de las arcadas colapsaron dejando únicamente el rastro de los inicios de los arcos incrustados en los muros, sin embargo, las arcadas que aún permanecen en pie presentan una serie de grietas o rajaduras en las zonas más críticas de las mismas.

Figura 26. **Muros largos**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

La fotografía anterior muestra la evidencia del colapso del segundo nivel de el corredor, al fondo se observan los arcos del segundo nivel mientras que en la parte frontal se puede observar que no restó absolutamente nada de lo que fue en su tiempo la segunda planta de dicho corredor.

Figura 27. **Final de arco sostenido por el vano de una puerta**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

Mencionando un caso especial en esta edificación, se puede observar en la fotografía anterior como un arco fue construido con uno de sus apoyos sobre el vano de una puerta, probablemente un error de coordinación entre los desarrolladores del proyecto de ejecución de la obra, aquí se puede observar que fue agregada una columna para soportar la parte final del arco, la columna fue construida a base de ladrillo con estuco.

Figura 28. **Muro vencido en segundo nivel**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

En la figura 28 anterior se puede observar como un muro fue desfasado completamente de su eje central, lo cual permitió que en el lado donde estaba soportando la cubierta, la misma colapsara y se derrumbara en su totalidad, actualmente el muro esta en peligro de su colapso total por lo cual debe de ser intervenido para evitar esto.

Figura 29. **Fallo de viga por flexión**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

En la figura 29 se aprecia la falla de una viga en el centro justo en la parte débil la cual soportaba el peso de la estructura superior o la cubierta de la misma, este tipo de fallos es muy común a lo largo de toda la estructura como se mencionó con anterioridad cuando se refería a la fachada.

3.4.4. Similitudes entre las edificaciones

Los elementos estructurales que integran las diferentes estructuras o edificaciones de la época colonial presentan grandes similitudes en su forma, detalles, estilo y geometría; algunas de las similitudes son las siguientes:

El sistema de construcción de muros sigue el mismo patrón en la mayoría de ambientes analizados en todas las edificaciones, son muros gruesos desde noventa centímetros hasta dos metros de espesor, contruidos a base de piedras y estuco, utilizando el ladrillo como soleras o rafas (nombre con que se les llamaba en la época) y a la vez rellenos.

Figura 30. **Sistema constructivo de muros de la época colonial**



Fuente: Palacio del Ayuntamiento, Antigua Guatemala.

Las columnas presentan un patrón base, siendo proporcionales a la altura de cada una de las edificaciones, pero en su mayoría las columnas cuadradas son de sección entre ochenta centímetros hasta un metro por lado, y las columnas de sección circular promedian entre ochenta centímetros de diámetro, todas las columnas fueron construidas en su mayoría a base de ladrillo y estuco, en el caso de las circulares con ladrillos cóncavos.

Figura 31. **Columnas de ladrillo y estuco**



Fuente: Convento Santa Clara, La Catedral, Real Palacio, Antigua Guatemala.

Otra de las similitudes que se pueden observar son los arcos los cuales presentan diferentes tamaños en sus secciones, sin embargo, están construidos a base de ladrillo pegado a base de estuco, lo cual generó un comportamiento similar ya que la sección fue diseñada acorde a la altura de las columnas que lo soportaban y en base a la estructura que debían soportar en la parte superior ya que la mayoría de arcos limitan bóvedas que a su vez sirven de cubiertas o entresijos.

Figura 32. Arcos de ladrillo y estuco



Fuente: Convento Santa Clara, La Catedral, Real Palacio, Antigua Guatemala.

En cuanto a las cimentaciones no se puede tener mayor referencia debido a que no existen datos arqueológicos o estudios previos realizados, pero respecto a los documentos bibliográficos los cimientos presentan el mismo patrón en las edificaciones, contruidos de muros de piedra con ladrillo y estuco, y variando sus dimensiones de grosor respecto a las luces de los ambientes a los cuales pertenecían los muros cimentados.

En cuanto a vanos de puertas y ventanas se observa que fueron utilizados tres métodos para construirlos; los vanos eran contruidos a base de ladrillo con estuco colocado en forma diagonal formando un ángulo de cuarenta y cinco grados (ver figura 33), en otros casos en donde se requería que el vano soportara una carga superior se colocaba una viga de madera sobre el vano de la puerta para evitar que el vano flexionara y el tercer método utilizado fue a base de arcos contruidos de ladrillo y estuco.

Figura 33. **Vanos de puertas y ventanas**



Fuente: La Catedral, Real Palacio, Antigua Guatemala.

4. INTERVENCIONES REALIZADAS A LOS MONUMENTOS HASTA LA FECHA

4.1. Tipos de intervenciones

Debido a la necesidad de conservar las edificaciones históricas en Antigua Guatemala se han realizado diferentes tipos de intervenciones a las mismas las cuales son descritas a continuación:

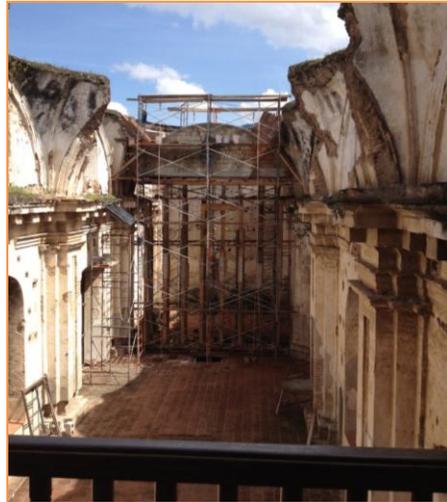
4.1.1. Restauración

Este tipo de intervención se podría llamar también intervención de reciclaje ya que su objetivo es analizar las edificaciones en las partes afectadas y descifrando las características geométricas de los elementos para luego intervenir construyendo una réplica de lo que fue destruido por los sismos tratando de seguir el sistema constructivo de la época colonial.

En este campo se puede encontrar la integración de arcadas para brindarle elementos de enlace a la estructura, para evitar la flexión de muros largos en la parte central; estos arcos son construidos a base de ladrillos pero utilizando reforzamiento de acero estructural (ver figura 34).

En el caso de los muros, estos también han sido restaurados utilizando el mismo sistema constructivo de la época, a base de piedras con hiladas de ladrillo con funcionalidad de solera, sin embargo, se utilizaron mallas de hierro para poder sostener todos los elementos que conforma el muro y como parrillas soleras.

Figura 34. **Restauración de un arco**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

4.1.2. Inyección de aglomerantes en grietas

Cuando un elemento estructural falla, se producen fracturas o grietas las cuales al pasar del tiempo pueden contribuir al deterioro de la edificación, por ello se empezó a utilizar mortero para rellenar las fallas.

Las grietas en los muros se deben a diferentes tipos de fallas que a su vez indican una pérdida de resistencia, por ello la inyección de aglomerantes es importante, en la mayor parte de grietas se ha empleado la misma técnica de intervención para evitar que las grietas siguieran creciendo, el procedimiento se realiza picando el muro en los espacio vacios y colocando un tubo PVC para realizar la inyección de aglomerantes por medio de una bomba, al llenarse la grieta el tubo fue tapado para después del tiempo de fraguado ser recortado el exceso del mismo.

Figura 35. **Muro días después de la inyección de aglomerante**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

En la figura 35 se observa como un muro fue intervenido por el método de inyección de aglomerante, se observan los tubos de pvc negros que salen del muro, siendo estos la vía de acceso de los aglomerantes.

4.1.3. Construcción de elementos de amarre

Entre los tipos de amarre de las edificaciones se mencionan dos:

- Solera de amarre: esta solera con refuerzo de acero fue construida con el objetivo de unificar toda la edificación en sus diferentes ambientes, la solera es construida y anclada sobre los muros existentes, en los espacios de las columnas antiguas se perforan agujeros de aproximadamente setenta centímetros de altura para poder anclar el refuerzo o varillas con material aglomerante y luego prever más daños por sismos.

Figura 36. **Solera corona de amarre**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

La figura 36 muestra los enlaces realizados sobre los muros del convento Santa Clara, la solera corona es la parte blanca que se aprecia sobre los muros del segundo nivel; se puede observar que dicha solera esta construida con hormigon armado, porque el acero esta a la vista, debido a que se piensa dar continuidad a la restauración de toda la arcada.

- Elementos tensores: en los lugares en que los muros o arcadas no fueron enlazadas adecuadamente los muros son susceptibles al movimiento del pandeo, es por ello que se decidió la construcción de tensores que puedan sostener los muros y evitar el flexionamiento de estos en las partes centrales de las luces que cubren.

Los tensores no son más que cables anclados a la parte superior de los muros por medio de platinas y pernos soldados que por su resistencia son capaces de soportar las cargas generadas por el peso de la estructura, estos tensores poseen únicamente la funcionalidad de resistir fuerzas tensoras.

Figura 37. **Tensores de acero**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

La imagen muestra uno de los tensores que se utilizan como elementos de soporte, que se instalan y funcionan soportando el peso de la estructura que en este caso en particular se encuentra en peligro de colapsar, es por ello que los tensores poseen una platina en la cual se empotra el cable tensor y se sujeta por medio de pernos anclados, diseñados de acuerdo a la necesidad de tensión acorde a la deformación de la edificación.

4.1.4. Anastilosis

La anastilosis es un proceso arqueológico complejo, el cual consiste en analizar los vestigios (partes de la edificación colapsadas que se encuentran en el lugar) para poder determinar a qué parte de la edificación corresponden, en otras palabras se puede comparar con el armado de un rompecabezas.

Para este proceso existen en la actualidad métodos avanzados de análisis como lo son la restauración y análisis digital por medio de software avanzado y aparatos especiales.

El proceso consiste en analizar la pieza, seguidamente determinar la posición y procedencia, luego por medio de gatos hidráulicos y poleas o en el caso de elementos pesados empleando grúas se levanta la pieza para ser colocada en su lugar, y por último la pieza es pegada con sabieta.

Figura 38. **Proceso de Anastilosis**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

4.2. Intervenciones en el Real Palacio de Antigua Guatemala

Las primeras intervenciones realizadas consistieron en la limpieza de escombros ocasionados por los terremotos, luego de realizar esto se pudo verificar el estado real de la edificación.

Se incluyeron tensores en el segundo nivel y en la cubierta del lado norte del Palacio, estos fueron instalados por medio de platinas pernadas las cuales atravesaron los muros pasando un cable de por medio para poder evitar que la parte frontal en donde se encuentra actualmente las arcadas colapsara, debido a que presenta una deformación crítica hacia la parte frontal.

Figura 39. **Cable tensor ajustable de acero**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

Se realizaron trabajos de anastilosis en los muros perimetrales de doble altura permitiendo así una visión mucho más clara de lo que fue en el Palacio en la época colonial, también fue realizada la anastilosis en el lado sur de la edificación, en dos de los cuatro marcos de los grandes ventanales que brindaban vista hacia el patio central a los ambientes traseros.

Se realizaron inyecciones de aglomerante en todos los muros que presentaban grietas y rajaduras así como en las piezas o elementos que presentaron fallas, luego de las inyecciones se realizó un resanado de paredes utilizando una técnica no muy diferente a la utilizada en la época.

Figura 40. **Inyección de material aglomerante**



Fuente: Real Palacio, Antigua Guatemala.

Los trabajos principales consistieron en la restauración de cuatro ambientes con finalidad de convertirlos en sanitarios de uso público, construidos a base de muros de piedra con el mismo sistema con la diferencia de la implementación de acero estructural, así como también las cubiertas de terraza española y artesonado de madera.

Por último cabe mencionar que se realizaron trabajos de restauración para detalles arquitectónicos como la restauración de un búcaro en el patio central, y el cambio de cubierta de piso.

4.3. Intervenciones en La Catedral de Antigua Guatemala

Básicamente en esta edificación se realizaron trabajos para la restauración de todas las arcadas de la nave central de la iglesia, las cuales fueron realizadas a base de ladrillos incluyendo refuerzo estructural.

Figura 41. Restauración de arcos



Fuente: La Catedral, Antigua Guatemala.

Adicionalmente se construyeron elementos de amarre o soleras para poder enlazar toda la edificación en la parte superior de la misma, esta solera fue construida de hormigón armado para poder brindarle mejor resistencia a la estructura, técnica que se utiliza en la mayor parte de edificaciones, el detalle general del armado de esta solera se encuentra en la figura 43.

Las arcadas en las cuales no existía soporte o columna porque las mismas habían colapsado, se procedió a la restauración completa de las mismas, siguiendo el mismo patrón los elementos colapsados existentes y realizando el mismo procedimiento constructivo, a base de ladrillo pero incluyendo una solera de amarre en la parte superior de los arcos de la que es sujetado el arco por medio de varillas que atraviesan el grosor del arco en ángulos de 45 grados, sin embargo, no existen detalles del diseño de las mismas.

Figura 42. **Columna restaurada**



Fuente: La Catedral, Antigua Guatemala.

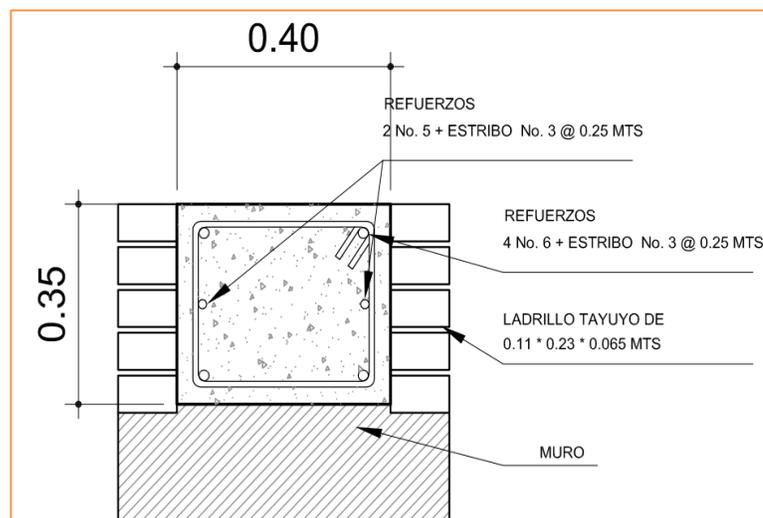
Por último se realizaron trabajos básicos como lo es la inyección de aglomerante entre los huecos de los muros, restauración de porciones caídas de columnas y vanos de puertas y ventanas, como también el resanado de paredes.

4.4. Intervenciones en El Convento de Santa Clara de Antigua Guatemala

Esta es una de las edificaciones con mayor número de intervenciones realizadas hasta la fecha ya que su estado después de ser sometida a los fuertes acontecimientos sísmicos fue crítico.

Se construyeron elementos de amarre o soleras de hormigón armado para unificar todos los elementos estructurales desde la parte superior de la misma, para proveer mayor estabilidad, amarre y soporte a los muros altos.

Figura 43. Detalle de solera de amarre



Fuente: CNPAG, Departamento de Infraestructura.

Se restauraron más de diez arcadas siguiendo el mismo patrón constructivo, a base de ladrillo pero incluyendo acero de refuerzo para las mismas, uno de estos arcos se encuentra en la nave central de la iglesia y es uno de los más grandes restaurados hasta la fecha.

Todos los muros fueron inyectados con aglomerantes para fortalecerlos y evitar mayor deterioro en los mismos, también fueron resanadas las paredes con acabados similares a los de la época.

Se rehabilitaron ambientes con detalles arquitectónicos como patios y ambientes, sin embargo, ninguno de ellos cuenta con cubierta, excepto algunos pasadizos entre ambientes comunales y el coro que se encuentra en el lado sur del convento justo detrás de la fachada principal, el cual fue restaurado debido al peligro de colapsar.

Figura 44. **Cubierta del coro restaurada**



Fuente: Convento Santa Clara, Antigua Guatemala.

Los vanos de puertas y ventanas fueron restaurados en el caso de los que colapsaron ante los sismos, y en el caso de los que no colapsaron fueron intervenidos por medio de inyecciones de aglomerantes para evitar el colapso de los mismos.

5. COMPARACIÓN ENTRE LA LÓGICA UTILIZADA EN EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA ÉPOCA COLONIAL Y LA INGENIERÍA SISMO-RESISTENTE CONTEMPORANEA PARA LA CONSERVACIÓN DE MONUMENTOS

5.1. Importancia de la consolidación de las edificaciones históricas de Antigua Guatemala

Las edificaciones históricas como su nombre lo dice, conforman parte de la historia de una comunidad, la ciudad de Antigua Guatemala (ver figura 45) es patrimonio cultural, lo cual significa que las construcciones son de gran valor histórico, por ello es de gran importancia la conservación de sus edificaciones históricas.

Figura 45. **Antigua Guatemala**



Fuente: parque central de Antigua Guatemala.

La conservación esta enlazada directamente con la intervención y restauración, labores que se realizan con fines de consolidación estructural, por tanto, la consolidación es la base de la preservación de las edificaciones históricas que conforman el patrimonio cultural de la humanidad en Antigua Guatemala.

Por ello la comparación entre los sistemas constructivos coloniales y contemporáneos se considera de suma importancia como un punto de partida para los procesos de análisis e intervenciones para la consolidación sismo-resistente de las edificaciones monumentales afectadas por los sismos.

5.2. Descripción de las características que permitieron el colapso de edificaciones de la época colonial desde un punto de vista contemporáneo

Para discutir sobre este tema se debe tomar a grandes rasgos las características principales de las edificaciones que permitieron que la estructura fuera incapaz de mantener su funcionalidad, debido a que no se cuenta con información técnica ni un estudio previo a las edificaciones en Antigua Guatemala.

La variedad de materiales utilizados en la construcción de edificaciones coloniales no permite establecer un sistema de construcción único, por lo que en cada edificación, sus elementos merecen análisis independientes para comprender su comportamiento, sin embargo de acuerdo a inspecciones de campo e investigación, tomando en cuenta que para tener certeza en este tema se deben seguir procedimientos de inspección y análisis, se puede enumerar una serie de características estructurales de influencia ante el colapso de las edificaciones coloniales:

Generalmente los cimientos siguen el mismo patrón de los muros, con la diferencia de la utilización de elementos de piedra de mayor magnitud, como también un mayor grosor, esto brindó una gran resistencia a los soportes de la edificación, sin embargo, las características del suelo o del subsuelo no fueron analizadas con precisión, por tal razón se presentaron hundimientos diferenciales en varios puntos de la edificación que generaron cambios constantes de los esfuerzos y reacciones de los elementos que por consiguiente crearon inestabilidad en la edificación.

Las columnas constituyen el elemento estructural más simple porque reciben cargas esencialmente en la dirección de su eje principal, la capacidad de carga de las mismas depende de la resistencia del material básico del que está constituida, sin embargo, hay factores que influyen en su resistencia, como lo son las excentricidades en la aplicación de la carga vertical que suelen aumentar en el tiempo por las deformaciones diferidas de los materiales, así como también los movimientos de la cimentación, lo cual crea concentraciones de esfuerzos permitiendo fallas por aplastamiento y el colapso de las mismas.

En algunos casos se presentan columnas dañadas que indican pérdida de capacidad de carga y que sin embargo no dieron lugar a un colapso, esto es atribuible en general a que las cargas aplicadas a la columna han sido redistribuidas a otros elementos próximos de soporte por un reacomodo de la estructura superior, o porque esta tiene suficiente rigidez para puentear las cargas hacia otros puntos de la estructura.

La mayoría de las columnas construidas son esbeltas, con una sección grande que brinda alta resistencia ante la compresión, sin embargo, la ausencia de confinamiento permitió fallas por corte y deslizamiento de sección.

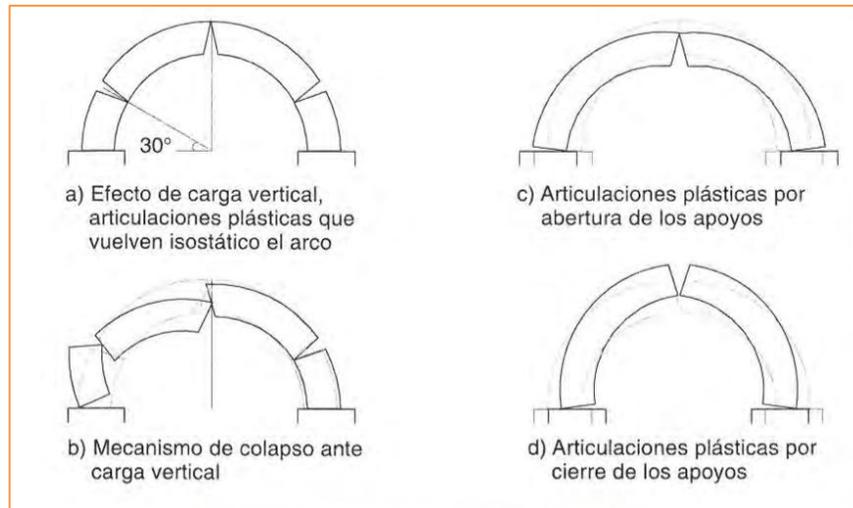
Las vigas de cantera fueron utilizadas mayormente para cubrir espacios pequeños debido a su baja resistencia ante la tensión, al igual que las cubiertas planas, es por ello que la mayoría de elementos superiores de conexión y cubierta evitan la posición horizontal, como lo son los arcos, las bóvedas, las cubiertas con cúpulas, etc.

Debido a que los materiales utilizados fueron incapaces de oponerse ante fuerzas de tracción, las vigas generalmente empleadas en los vanos de puertas y ventanas, o entradas principales, presentan debilidad en la parte central inferior de su sección, ya que en esta zona se genera la mayor concentración de esfuerzos a tensión, provocando así severos daños o hasta incluso el colapso de los elementos.

Los arcos, bóvedas y cúpulas por el contrario fueron la solución ante esta problemática permitiendo una redistribución de esfuerzos de compresión desde el punto medio de la estructura hasta los extremos en las uniones con los muros de apoyo o las columnas de apoyo, sin embargo, para estos casos existen situaciones críticas que contribuyeron al colapso de estas estructuras superiores.

Hasta las mínimas deformaciones diferenciales en las cimentaciones generaron un cambio en la distribución de esfuerzos, creando excentricidades en la fuerza axial provocada por el peso propio de los elementos superiores, lo cual permitió el coceo o empuje a los elementos de apoyo, ya sea hacia la parte interna o externa de los mismos; este fenómeno hace que el elemento genere articulaciones plásticas mostrando fallas en diferentes puntos de acuerdo a la necesidad del elemento de acomodarse ante las deformaciones (figura 46), sin embargo, al pasar del tiempo y debido a los sismos la mayoría de estos elementos llegaron a perder su funcionalidad y hasta incluso colapsaron.

Figura 46. **Articulaciones plásticas generadas en elementos superiores**

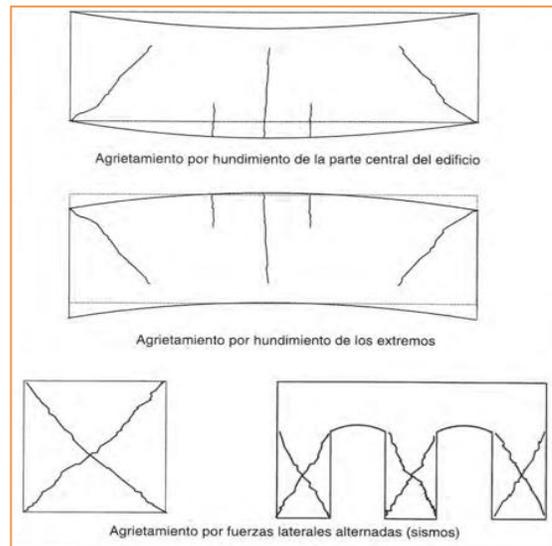


Fuente: MELI, R. Ingeniería estructural de los edificios históricos, p.78.

En el caso de las cubiertas que fueron construidas con ladrillo y estuco, al igual que los demás elementos, las limitó a adaptarse al movimiento sísmico. La mayoría de las estructuras que colapsaron o en caso contrario presentaron grandes fisuras o porciones colapsadas, fueron construidas para cubrir áreas extensas de hasta cien metros cuadrados, lo cual permitió la falla de estos elementos al no ser capaces de distribuir las cargas a sus elementos de apoyo.

Los muros aunque eran de piedra y de gran grosor fueron en su composición menos refinados que las columnas, lo cual los hacía menos resistentes; dependiendo a la situación desfavorable que se presentara para estos elementos estructurales, se observa un tipo diferente de falla cuando estos no colapsaron, se podría generalizar que las fallas se presentaron por hundimientos en la cimentación (figura 47) como también por las fuerzas generadas por los movimientos sísmicos.

Figura 47. **Tipos de agrietamiento en muros por acciones externas**



Fuente: MELI, R. Ingeniería estructural de los edificios históricos, p.48.

Los muros interiores en su mayoría soportan áreas de cubierta similares en ambos lados por lo que la carga soportada es vertical, mientras que en los muros de los límites o los muros que soportan arcos o bóvedas, presentan un empuje lateral en la parte superior permitiendo la separación de los muros al ancho del espacio libre (coceo), posibilitando el colapso de la cubierta, bóvedas y arcos, o la falla de los mismos.

La mezcla de cal y arena utilizada (argamasa) proporcionó a los elementos una fuerte adherencia mediante el proceso de carbonatación, proceso que ocurre lentamente desde las caras exteriores hacia el interior de los elementos, de hecho se requieren varios años para que la argamasa en el interior de un elemento masivo fragüe totalmente.

Esta característica permitió la capacidad de adaptación ante los cambios de forma, como por ejemplo los debidos a hundimientos de su cimentación, sin embargo, la argamasa fue afectada por el intemperismo debido a que su relativa porosidad permitió la penetración de humedad, con sales que atacaron el cementaje, lo cual permitió la pérdida de resistencia en las uniones de elementos y favoreció al colapso de los mismos.

Para finalizar con este subcapítulo cabe mencionar que el sistema constructivo de la época colonial se basó generalmente en el volumen y el peso de los elementos estructuras para que en conjunto los mismos fueran altamente resistentes; según la bibliografía esto fue debido a la lógica utilizada, sin embargo, este pensamiento es opuesto a un sistema constructivo sismo-resistente eficiente contemporáneo.

Como la estructura tenía demasiado volumen y peso, fue mayormente susceptible a la influencia del movimiento sísmico, ya que se sabe que la fuerza sísmica en una edificación se incrementa de acuerdo a la masa ($\text{masa} = \text{peso} * \text{gravedad}$) y la aceleración del sismo de acuerdo a la fórmula: $F = M * A$ en donde F es la fuerza de sismo, M es la masa de la edificación y A es la aceleración del sismo en este caso, esta es una de las principales causas del colapso de las edificaciones.

6. RECOMENDACIONES SISMO-RESISTENTES GENERALES PARA LA INTERVENCIÓN Y RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS DE LA ÉPOCA COLONIAL

6.1. Antecedentes y consideraciones generales

Es común pensar que una estructura debe ser segura en términos absolutos, lo que implica que sea imposible que vaya a fallar. Este concepto es erróneo ya que cualquier tipo de estructura esta destinada a colapsar a menos que sea demolida antes, o que se realicen intervenciones para preservarla.

El hecho que existan edificaciones que a lo largo del tiempo hayan subsistido, es prueba suficiente de que su seguridad estructural es adecuada, sin embargo, los daños que una edificación pueda sufrir no siempre se puede observar, en algunas ocasiones edificaciones grandes han colapsado sin presentar signos de fallas ni un agente externo actuante que lo provoque.

Es por ello que no basta con un análisis visual de los problemas estructurales que pueda tener una edificación, sino también se debe acudir a técnicas específicas de inspección y monitoreo del comportamiento estructural, para definir métodos o factores de seguridad para una protección adecuada de la estructura.

Para llevar a cabo la verificación de la seguridad estructural se debe comprobar que los efectos de las acciones más desfavorables que puedan afectar la estructura durante su vida no excedan la capacidad que ésta tiene para resistir dichos efectos.

El margen de seguridad que debe haber entre la resistencia “R” y las acciones “S” crece a medida que las incertidumbres son mayores, sin embargo, para tener un dato mas preciso de debe de agregar un factor de carga F_c a las acciones y un factor de resistencia F_r a la resistencia de la estructura, de esta manera la ecuación general para la revisión de la seguridad se plantea como: $F_s = F_c / F_r$.

Para Guatemala en todas sus regiones se debe utilizar un factor de carga $F_c \geq 1,5$ y el factor de resistencia F_r cuando los materiales tienen un buen control toma un valor de 0,6, para mampostería de adobe o de piedra natural, se especifica un factor de resistencia de 0,3.

El procedimiento de diseño descrito es llamado estados límite, y es el procedimiento ideal para la revisión de la seguridad de los edificios históricos, por ser el mas congruente con los procedimientos de análisis basados en equilibrio de fuerzas que han sido comunes durante años para estas estructuras.

Un elemento fundamental para la revisión de la seguridad de una estructura, es la determinación de las cargas a las que está sometida, así como de aquellas que puedan afectarla en el futuro. En un contexto más amplio, todos estas agentes externos que afectan una estructura se llaman “acciones”.

Las cargas muertas se determinan mediante el peso volumétrico y son las mas significativas ya que las edificaciones son consideradas masivas, las cargas vivas, los sismos, los cambios volumétricos y los hundimientos son acciones también importantes de analizar.

Para realizar un procedimiento de intervención se deben considerar aspectos importantes previo al diseño arquitectónico y estructural del método de intervención a realizar, tomando en cuenta que el objetivo se centra en la aproximación de las condiciones sismo-resistentes de los elementos estructurales, ya que el sistema constructivo de la época colonial se considera opuesto a un sistema constructivo sismo-resistente eficiente.

El primer paso consiste en el análisis visual del estado actual y de las características de los elementos estructurales de importancia para la estabilidad de la edificación y condiciones críticas de resistencia ante las fuerzas laterales provocadas por los sismos.

Teniendo un análisis cualitativo detallado se puede proceder a realizar un análisis de laboratorio e inspección de los materiales utilizados en los elementos, con el objetivo de determinar las características de la resistencia ante fuerzas aplicadas por factores propios y externos a la estructura, como también la determinación del peso volumétrico de los elementos.

Se debe tomar en cuenta que el análisis y la comprensión de una edificación enfrenta serias dificultades, como el reconocimiento de la estructura misma y de su geometría, debido a la complejidad de identificar qué elementos son parte de la estructura resistente y cuales son simplemente decorativos o cumplen otros propósitos constructivos. Las condiciones de continuidad entre los distintos elementos son también difíciles de establecer, en los edificios históricos los elementos suelen estar simplemente sobrepuestos y existe la posibilidad de rotaciones relativas en las zonas de contacto. El empleo de herramientas comunes de análisis esta limitado debido a la baja resistencia a tensión de los materiales empleados, lo que da lugar a agrietamientos y separación de elementos.

Mientras más refinado sea el método que se emplea para el análisis sísmico, más elaborado será el modelo analítico que hay que construir de la estructura y mayor el número de propiedades estructurales que hay que hacer intervenir. Realizar una intervención es permitir la aproximación de las condiciones necesarias para garantizar una mejor resistencia en conjunto de la edificación ante las acciones desfavorables internas y externas.

La planificación de los trabajos de intervención y restauración y el desarrollo de dichas técnicas debe de realizarse de manera ordenada y utilizando métodos de prevención de daños a la edificación.

Por último se realiza la intervención ya sea de reforzamiento estructural o de restauración estructural ya que para distintos casos serán necesarios diferentes tipos de trabajos, para finalizar con la alteración y aporte de características favorables a la estructura, respetando siempre el normativo de la institución que responde al compromiso de la conservación del patrimonio en caso, para el Consejo Nacional para la Protección de Antigua Guatemala (CNPAG).

6.2. Tipos de intervención y restauración

La decisión sobre la conveniencia de una intervención y sobre la técnica que necesita emplearse, no debe basarse únicamente en consideraciones de tipo estructural, sino insertarse en el contexto más amplio de la conservación del edificio histórico y tomarse en forma conjunta con los expertos de las diversas disciplinas que intervienen en el problema, dando la debida importancia a los aspectos de carácter artístico, cultural, económico y de utilización del inmueble.

Se deben tomar en cuenta tres características de intervenciones de refuerzo estructural con materiales distintos a los originales:

La compatibilidad, entre el comportamiento de la nueva estructura y la vieja desde el punto de vista estructural sobre todo en cuanto a la rigidez. La durabilidad, se debe tomar en cuenta que el tipo de elemento que se vaya a concebir este diseñado para asegurar la estructura durante un largo tiempo. La reversibilidad, debe ser factible poder remover los nuevos elementos y modificar la solución, si en el futuro se encuentra otra mas eficiente o si da signo de ser inadecuada.

Las intervenciones realizadas requieren un seguimiento de análisis para comprobar su efectividad y su funcionamiento adecuado, y si en dado caso presentara posibles signos de funcionamiento diferente del previsto, realizar modificaciones necesarias.

6.2.1. Anastilosis

Este proceso es actualmente utilizado como método de restauración, como fue explicado en el subcapítulo 3.1.4, sin embargo, para obtener un mejor anclaje de las piezas se deben utilizar materiales aglomerantes de alta calidad incluyendo piezas dúctiles de acero como anclaje, barrenadas y aseguradas con pegamentos epóxicos en ambas piezas para prevenir el futuro colapso cambiando las características de resistencia del elemento.

6.2.2. Reforzamiento de arcos y bóvedas

La mayoría de los casos del problema de estabilidad de arcos y bóvedas no se relacionan con debilidad propia de los elementos, junto con el movimiento de sus apoyos, por ello la intervención debe basarse en eliminar dichos movimientos, proporcionando rigidez lateral a los apoyos.

La solución mas simple comprende en la construcción de contrafuertes a los muros de soporte, sin embargo, la dificultad de la cimentación de estos elementos lo hace una técnica complicada, entonces la solución mas adecuada podría ser la colocación de tirantes de amarre al nivel de arranque de los arcos.

Otra de las soluciones es la construcción de tímpanos de amarre, sin embargo, la construcción de los mismos presenta dificultades de anclaje, por ello esta técnica debe de aplicarse cuando la situación lo permita.

Un procedimiento propuesto para elementos superiores es el siguiente:

Los arcos rebajados o vigas deben de apuntalarse para evitar el colapso, para luego abrir dos ranuras con la profundidad de el recubrimiento mínimo para la sección de la viga analizada, luego se barrena la prolongación de la barra de acero a cuarenta y cinco grados de forma que la instalación de la barra de acero se realice a manera de proveer resistencia a flexión en la zona central con la barra de acero a lo largo de la zona crítica a tensión, luego la varilla doblada a cuarenta y cinco grados introducida en la viga para reforzar los esfuerzos cortantes que la viga soporta en las zonas críticas, después de introducido el acero se procede a la fundición con concreto de las ranuras aplicando adherentes para que el concreto pueda llegar a conformar parte de la estructura después de su fraguado.

El mismo procedimiento es aplicado para la parte superior de la viga pero en este caso se realiza en ambos extremos para reforzar los esfuerzos provocados por los momentos negativos que se presentan en estas zonas.

De esta manera se estará reforzando cada una de las vigas y elementos sometidos a la flexión lo cual proveerá un mejor comportamiento al conjunto de elementos superiores que conforma la edificación.

6.2.3. Reforzamiento de columnas

Este tipo de elementos estructurales es muy variado, sin embargo el volumen excesivo de las mismas crea un comportamiento similar permitiendo fallas frágiles por esfuerzos cortantes los cuales crean corrimiento de sección o el colapso de las mismas.

Una forma de mejorar las condiciones resistentes de las columnas, las cuales están sometidas a cargas axiales y de pandeo, es mediante el confinamiento que restrinja la expansión lateral producida por el efecto de Poisson.

Por la dificultad de intervenir estos elementos sin dañar el patrimonio una de las soluciones para evitar estas fallas a corte sería la perforación desde la parte superior de la columna en la parte central, colocando formaleta en toda la columna para evitar el colapso, luego se introduce una columna de acero estructural hasta cubrir la parte crítica superior de la columna para luego fundirla con mezclas compatibles al sistema antiguo, incluyendo aglomerantes que permitan una buena adherencia de los elementos internos de la columna intervenida.

Cuando este trabajo de intervención no pueda ser desarrollado por algún motivo, como una segunda alternativa se puede realizar la construcción de dos columnas o elementos verticales en los extremos opuestos de la columna central cuando la sección lo permita, en las columnas nuevas se incluirá anclajes de acero hacia la columna original amarrando una con otra en ángulos de 45 grados, simulando estribos y evitando el corte, también incluyendo zunchos horizontales para formar un “encamisado” de la columnas, para favorecer al confinamiento de la misma.

6.2.4. Reforzamiento de muros

El refuerzo de los muros debe de evitar el pandeo debido a que la mayoría fallan por la acción de fuerzas laterales perpendiculares al muro que generan volteo y a la vez su colapso.

Dependiendo de los casos en particular, los muros se pueden reforzar de diferentes maneras, el primer caso en muros de grosores excesivos se realizan aberturas del tamaño de una columna estándar a cada cierta distancia de un lado de la estructura, y a la misma distancia pero en los puntos medios del lado opuesto del muro, esto para proveer resistencia ante las fuerzas laterales.

Otra alternativa que se puede mencionar son los tensores, los cuales se pueden utilizar cuando no exista cubierta debido a que los mismos deben ser contruidos en la parte superior del muro, el tensor debe de ser capaz de soportar las fuerzas de tensión generadas por el peso de la estructura ante los movimientos sísmicos, estos tensores son utilizados actualmente sin embargo, para que los mismos sean funcionales debe de cumplir con ciertas condiciones partiendo desde el análisis de la estructura y respecto a su peso volumétrico, para que el mismo pueda resistir las sollicitaciones sísmicas.

Las piezas de madera o vigas metálicas de doble funcionalidad conforman una mejor solución ante las fuerzas sísmicas, sin embargo, se debe tomar en cuenta que para la utilización de estos elementos la edificación será afectada en su arquitectura y estética, lo cual debe de ser analizado por expertos en esta área.

Una de las técnicas para favorecer la resistencia de los muros es la inyección de aglomerantes, dicha práctica es realizada con frecuencia en muchas de las edificaciones históricas debido a que como fue explicado en numerales anteriores, la argamasa pierde su capacidad resistente, esta debe de ser removida con herramientas punzantes, para luego ser sustituida por material nuevo buscando siempre la compatibilidad con los elementos antiguos, generalmente este procedimiento suele ser suficiente para restablecer la resistencia original en los muros.

6.2.5. Elementos superiores de amarre

Estos elementos son conformados por la solera corona mencionada con anterioridad, sin embargo, para que pueda funcionar de una mejor manera el elemento por el cual pasa la solera debe de ser analizado por medio de las consideraciones planteadas con anterioridad, ya que dichos estudios no existen.

6.2.6. Refuerzo sísmico

Las acciones para el refuerzo sísmico de edificios históricos pueden dirigirse a diferentes objetivos: reducción del peso, sobre todo en las partes altas del edificio; eliminación de irregularidades o asimetrías entre los elementos resistentes; procuración de la continuidad entre los elementos por los que se transmiten y se resisten las fuerzas sísmicas, para que las fuerzas de inercia cuenten con una trayectoria que las lleve hacia los elementos más idóneos de resistirlas.

Además de esto también se requiere el refuerzo de elementos débiles o dañados, y la adición de nuevos elementos diseñados específicamente para resistir sismos.

En el caso que la edificación presente daños severos y la mejora de sus elementos sea imposible, se debe recurrir a la construcción de una nueva estructura con técnicas modernas que resistan a los sismos, mejorando la estructura original para que solamente resista ante su propio peso, tomando en cuenta la dificultad del adosamiento de los elementos y la pérdida de la originalidad de la arquitectura y estética de la edificación.

El principal objetivo de la corrección de irregularidades es la eliminación de asimetrías que inducen vibraciones de torsión del edificio. Esto se puede lograr con incluyendo elementos para aumentar la rigidez, o separando elementos que concentren la rigidez en algunas zonas.

La reducción del peso se puede realizar eliminando rellenos en los sistemas de piso, así como algunos recubrimientos pesados y sin especial valor arquitectónico; sobre todo, hay que tratar de eliminar las adiciones y modificaciones que se han realizado a lo largo de los años y que han agregado peso a la edificación.

Uno de los objetivos importantes es lograr la continuidad entre los elementos, como por ejemplo entre pisos y muros, así como entre muros transversales, esto con el fin de proporcionar amarre a las edificaciones permitiendo así una mejor resistencia ante las fuerzas sísmicas.

Todos estos conceptos fueron interpretados y analizados por el autor, sin embargo, provienen del documento ingeniería estructural de los edificios históricos del autor Roberto Melí y se incluyen en este trabajo por evidentes fundamentos, haciendo algunos aportes complementarios.

CONCLUSIONES

1. Antigua Guatemala se encuentra en una zona de alto riesgo sísmico, las acciones sísmicas tienen una influencia crítica ante la funcionalidad de una edificación por lo que deben ser considerados métodos de prevención para obras de construcción, remodelación o intervenciones de restauración.
2. Los monumentos o edificaciones de la época colonial son patrimonio, por lo tanto se deben preservar mediante intervenciones tomando en cuenta que hay que respetar una serie de normas en cuanto a intervención estructural se refiere, dependiendo de las instituciones que desarrollan estos procesos.
3. Cualquier tipo de estructura esta destina a colapsar a lo largo del tiempo, a menos que antes esta sea demolida, o sea preservada mediante procesos de intervención.
4. Todo método de intervención estructural para restauración debe de ser diseñado a partir de procedimientos de análisis aplicados a las edificaciones históricas, las cuales no presentan un patrón único de construcción por lo que cada una de ellas merece un análisis independiente.

5. En las edificaciones históricas o monumentos es imposible alcanzar condiciones sismo-resistentes óptimas mediante intervenciones, debido a que el sistema constructivo de la época colonial se considera opuesto a un sistema constructivo sismo-resistente contemporáneo, por lo que únicamente se pueden aplicar técnicas para mejorar las características estructurales y la aproximación de condiciones de sismo-resistencia de las edificaciones.

RECOMENDACIONES

1. El presente trabajo es una introducción al tema en Guatemala que trata de hacer su aportación a los edificios históricos, desde el punto de vista de la ingeniería, no pretende agotar el tema, por lo que se recomienda seguir con las investigaciones correspondientes al tema.
2. Para realizar una intervención en una edificación histórica es importante tomar en cuenta que no se pueden tomar decisiones sin un previo análisis de los métodos a aplicar, sin embargo, este documento presenta una serie de consideraciones para dar una visión amplia acerca de métodos que han sido utilizados, a manera de generar ideas como una base para realizar los respectivos análisis de campo y laboratorio para la determinación de las técnicas de intervención.

BIBLIOGRAFÍA

1. GUILLIONLI GUEVARA, Leopoldo. *Estructura y Materiales en la Arquitectura Religiosa de Antigua Guatemala*. Trabajo de graduación de Arquitecto. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Arquitectura, 1968. 35 p.
2. LUJAN MUÑOZ, Luis. *Informe sobre el estado de conservación de las iglesias de Antigua Guatemala y algunas medidas para su preservación*. Informe inédito. Centro de producción de materiales. Universidad de San Carlos de Guatemala, 1968. 54 p.
3. MARKMAN, Sidney David. *Colonial Architecture of Antigua Guatemala*. Estados Unidos: The American Philosophical Society, 1965. 335 p. Independence square- philadelphia-MCMLLXVI.
4. MELI, Roberto. *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. 2a ed. México: Fundación ICA, 1998. 255p. ISBN: 978-968-7508-46-7.

