

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**Evaluación de la seguridad sísmica de las fachadas de la catedral de Lima bajo el enfoque
de mecanismos de colapso**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR

Gustavo Adolfo Castro Aroni

ASESOR:

Sabino Nicola Tarque Ruiz

Lima, Abril, 2019

RESUMEN

Existe necesidad de conocer el comportamiento sísmico de estructuras históricas que alberguen personas y sean atractivos turísticos, con la finalidad de preservar vidas y conservar el patrimonio cultural. Tal es el caso de la catedral de Lima, que hasta la actualidad sigue en funcionamiento y afora gran cantidad de personas. Por otro lado, en Perú no existe una guía o lista de criterios que ayuden a realizar un correcto análisis y diseñar intervenciones que mejoren la respuesta estructural de construcciones históricas; por esto, es necesario iniciar una investigación que sirva como base para futuros estudios.

En primer lugar, el documento propone una discusión sobre los principales retos que representa el analizar estructuras históricas; así como las condiciones deseables que los enfoques orientados al modelado y análisis de este tipo de estructuras deben lograr. En segundo lugar, se hace una revisión de métodos disponibles que se utilizan para analizar las estructuras históricas de mampostería sin refuerzo y finalmente se aplica uno de estos a la fachada de la catedral de Lima.

Para el análisis de la seguridad sísmica de las fachadas de la catedral se decidió usar el método propuesto en el código italiano, Norma Técnica de Construcción 2008, debido a su simplicidad y buena aproximación, según estudios antecedentes como el de Criber y Brando (2015). Esta norma italiana propone distintas formas de analizar una construcción histórica, de acuerdo a los resultados que queremos obtener. En primer lugar se realizó una evaluación cualitativa de la catedral de Lima, analizando la vulnerabilidad de sus macro elementos o elementos independientes; luego se identificó los mecanismos de colapso que tienen mayor probabilidad de activarse en un sismo y se realizó un análisis cinemático. La metodología sugiere hacer una verificación lineal y no lineal para analizar la seguridad sísmica de las edificaciones históricas. Estas verificaciones comparan el espectro de capacidad del macro elemento examinado, con el espectro de demanda propuesto en la norma peruana; para esto, se usaron las fórmulas propuestas en el código italiano con los parámetros sísmicos propuestos en la Norma Sismo Resistente E030 de Perú. Los resultados de estas verificaciones nos darán una idea de cómo será la respuesta estructural de las fachadas de la Catedral ante un sismo de gran magnitud. La fachada Principal, que da hacia la Plaza de Armas de Lima, resultó ser la más vulnerable, teniendo como mecanismo de colapso más probable a ocurrir, el volteo simple de muro tipo doble cortina. Se puso en evidencia que las fachadas tendrán una mejor respuesta estructural ante sismos, si es que se garantiza un comportamiento monolítico de los muros de mampostería.

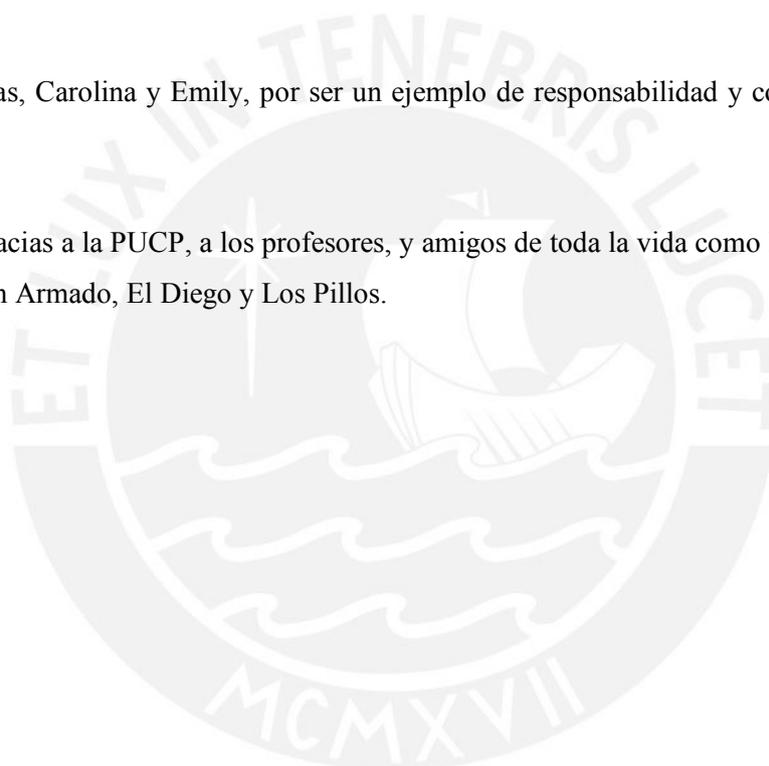
DEDICATORIA

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de un gran número de personas. En especial agradezco a mi asesor de tesis, PhD. Nicola Tarque, por las orientaciones y recomendaciones para el desarrollo de este proyecto. Agradezco también al Mg. Dennis Apaza y al Dr. Edoardo Rossi, por absolver consultas que iba teniendo durante el avance de esta tesis.

Esta investigación va para mis padres, José y Mary, quienes me dieron la facilidad de poder dedicarme exclusivamente a estudiar, y siempre tuvieron las palabras correctas que me motivaron a continuar.

A mis hermanas, Carolina y Emily, por ser un ejemplo de responsabilidad y constancia en sus profesiones.

Finalmente, gracias a la PUCP, a los profesores, y amigos de toda la vida como los que encontré en el Hormigón Armado, El Diego y Los Pillos.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problemática	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Hipótesis.....	2
1.5 Antecedentes	2
1.6 Metodología	6
2. CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE	7
2.1 Mecanismos de colapso y problemas que presenta el análisis sísmico de estructuras históricas	7
2.2 Características deseables de los métodos aplicados a las estructuras históricas.....	7
2.3 Revisión de métodos clásicos	9
2.4 Métodos modernos	10
2.5 Principio de trabajo virtual y volteo incipiente	10
2.6 Casos de análisis: mecanismos de colapso fuera del plano	13
2.7 Ejemplos de aplicación:.....	22
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍAS DISPONIBLES PARA ANALIZAR ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA	25
3.1 Método revisado en Ayala y Speranza (2003).....	25
3.2 Método revisado en Restrepo (2004).....	32
3.3 Guía del código italiano para estructuras de mampostería no reforzadas.....	40
3.3.1. Procedimiento para una evaluación de nivel de concientización 1 (LV1).....	41
3.3.2. Procedimiento para una evaluación de nivel de concientización 2 (LV2).....	44
3.4 Selección de metodología a aplicar	51
4. CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DE LA CATEDRAL DE LIMA	53
4.1 Tipos de intervención durante su historia	53
4.2 Descripción de la estructura en la actualidad	56
5. CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL CÓDIGO ITALIANO A LAS FACHADAS DE LA CATEDRAL DE LIMA	65
5.1 Cálculo del índice de vulnerabilidad.....	65
5.2 Cálculo del factor de activación – análisis cinemático.....	66
5.2.1 Fachada Principal	67
5.2.2 Fachada Los Judíos.....	73
5.2.3 Fachada Santa Apolonia	77
5.3 Verificación lineal:.....	80
5.4 Cálculo del espectro de capacidad y verificación no lineal:.....	82
6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87

6.1	Conclusiones	87
6.2	Recomendaciones	94
7.	REFERENCIAS	96
8.	ANEXOS	98



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de cargas y puntos de aplicación.....	12
Figura 2.2. Identificación del mecanismo de volteo simple – esquemas y fotos (ReLUIS; s/f) ..	14
Figura 2.3. Esquemas de cargas aplicadas en un muro monolítico y muro cortina (ITC et al; 2007).....	14
Figura 2.4. Identificación del mecanismo de volteo compuesto – esquemas y fotos (ReLUIS; s/f).....	15
Figura 2.5. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismo de volteo compuesto. (ITC et al; 2007).....	16
Figura 2.6. Identificación de mecanismos de flexión vertical – esquema y fotos. (ReLUIS; s/f)	17
Figura 2.7. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismos de flexión vertical. (ITC et al; 2007).....	18
Figura 2.8. Identificación de mecanismos de flexión horizontal – esquemas y fotos. (ReLUIS; s/f).....	20
Figura 2.9. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismos de flexión horizontal. (ITC et al; 2007).....	21
Figura 2.10. Esquema de ejemplo de volteo simple	22
Figura 2.11. Esquema de ejemplo de flexión vertical.....	23
Figura 3.1. 6 Mecanismos de colapso fuera del plano (Ayala; 2003).....	26
Figura 3.2 2 posibles mecanismos considerando el efecto de arco. (Ayala; 2003).....	27
Figura 3.3. Diagrama de flujo para identificación de mecanismos posibles. (L. Restrepo; 2010).....	34
Figura 3.4. Mecanismo de colapso A. (Restrepo; 2004).....	35
Figura 3.5. Mecanismo de colapso B1 y B2. (Restrepo; 2004)	37
Figura 3.6. Mecanismo de colapso C. (Restrepo; 2004).....	38
Figura 3.7. Ficha de evaluación de vulnerabilidad en iglesias. (NTC Italiana; 2008).....	42
Figura 3.8. (a) Espectro de la norma y estructura en análisis (Aguilar; 2015).....	47
Figura 3.9. Espectros de capacidad de la norma y la estructura (Lorenzo; s/f).....	48
Figura 3.10. Puntos notables de espectro de capacidad (Criber, 2015).....	49
Figura 4.1. Planta de la estructura de la catedral. (a) Plata original. (b) Planta 2005. (Adaptado del CISMID, 2005).....	53
Figura 4.2. Concepción estructural de la catedral de Lima. CISMID (2005).....	55
Figura 4.3. Vistas aéreas de la Plaza Mayor de Lima después de 1920. Adaptado del CISMID (2005).....	56
Figura 4.4. Planta de la estructura de la catedral de Lima. CISMID (2005)	58
Figura 4.5. Elevación – Elementos de la estructura. CISMID (2005).....	59
Figura 4.6. Elevación de pilar y sistema de techo sobre el pilar. CISMID (2005)	60
Figura 4.7. Cortes longitudinales de la catedral de Lima.....	61
Figura 4.8. Cortes transversales de la catedral de Lima.....	61
Figura 4.9. Geometría de las bóvedas nervadas en la catedral. CISMID (2005).....	62
Figura 5.1. Distribución de cargas del techo. CISMID (2005)	67
Figura 5.2. Geometría simplificada de la fachada principal de la catedral de Lima.....	68
Figura 5.3. Fuerzas externas que actúan en la fachada principal.	68
Figura 5.4. Puntos de aplicación de fuerzas externas	70
Figura 5.5. Geometría simplificada de la fachada Los Judíos de la catedral de Lima.....	73
Figura 5.6. Geometría simplificada de la fachada Santa Apolonia de la catedral de Lima.	77
Figura 5.7. Movimiento progresivo hasta llegar al colapso. (Aguilar, 2015).....	82
Figura 5.8. Curvas de capacidad de la fachada Principal para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Flexión horizontal confinada.....	84

Figura 5.9. Curvas de capacidad de la fachada Los Judíos para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Vuelco compuesto – cuña. e) Flexión horizontal confinada.	85
Figura 5.10 Curvas de capacidad de la fachada Santa Apolonia para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Vuelco compuesto – cuña.....	86
Figura 6.1. Comparación entre índices de vulnerabilidad de las fachadas de la catedral de Lima.	88
Figura 6.2. Comparación entre aporte de cada mecanismo al índice de vulnerabilidad en la fachada Los Judíos.	89
Figura 6.3. Verificación lineal de las fachadas de la catedral.	90
Figura 6.4. Factor de activación vs a^*/a_{g0}	91
Figura 6.5. Relación entre d^*/d^*_d en: a) Fachada principal. b) Fachada Los Judíos. c) Fachada Santa Apolonia.	93



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Ecuaciones para cálculo del factor de activación λ , para 5 mecanismos de colapso sin considerar el efecto de arco, según Ayala (2003)	31
Tabla 3.2. Factores de carga que activan los mecanismos de colapso considerando el efecto de arco, según Ayala (2003)	32
Tabla 3.3. Tabla de puntuación de acuerdo a la ficha de evaluación para cada mecanismo. (NTC Italiana; 2008)	42
Tabla 5.1. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Principal	65
Tabla 5.2. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Los Judíos	66
Tabla 5.3. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Santa Apolonia	66
Tabla 5.4. Pesos específicos asumidos, para los materiales presentes en la catedral de Lima	67
Tabla 5.5. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Principal.....	71
Tabla 5.6. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Los Judíos.....	74
Tabla 5.7. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Santa Apolonia	78
Tabla 5.8. Resultados de la verificación lineal. a) De la fachada principal. b) De la fachada de los Judíos. c) De la fachada Santa Apolonia.....	81



CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los estudios orientados a la conservación y restauración de las estructuras históricas recurren al análisis estructural como una forma de comprender mejor las características estructurales del edificio, de definir su condición actual y de analizar su seguridad ante sismos; por ejemplo, Ayala y Speranza (2003), Restrepo (2004), Criber y Brando (2015) son algunos autores que han hecho investigaciones que sirven como guía para el análisis estructural de este tipo de edificaciones. De estas investigaciones se deduce que es necesario realizar un análisis estructural preciso para evitar conclusiones erróneas que lleven a reforzar excesivamente la estructura, causando pérdidas innecesarias, y daños del material original y valor cultural; o intervenir insuficientemente en él y, por lo tanto, generar riesgos inadmisibles para los usuarios y el patrimonio cultural. En esta investigación el análisis estructural se hará basándose en los mecanismos de colapso, que son las formas o tipos de falla que se producen cuando se forma un número de rótulas plásticas que originan un sistema lábil.

En Perú existe una cantidad de iglesias y edificaciones históricas que datan de la época del virreinato, construidas enfocadas principalmente en la arquitectura y acabados, mas no en un sistema estructural antisísmico. En la actualidad, existe incertidumbre en cómo estas construcciones históricas responderán ante un sismo de gran magnitud.

Según Roca. P, Cervera. M, Gariup, Giuseppe y Pela. L (2010), los problemas en el análisis de las construcciones antiguas van desde su geometría irregular, materiales con propiedades mecánicas no definidas, arreglos estructurales en su tiempo de vida y condiciones reales de conservación. Debido a todas estas dificultades, se acepta generalmente que el estudio de una estructura histórica no sólo debe basarse en cálculos, sino que debe integrar también una variedad de actividades complementarias que impliquen una investigación histórica detallada, una inspección profunda por medio de métodos no destructivos (NDT) y monitoreo, entre otros. El análisis estructural de las estructuras históricas constituye, de hecho, una actividad multidisciplinaria y multifacética que requiere una inteligente integración de diferentes enfoques y fuentes de evidencia.

1.2 Problemática

Existe necesidad de conocer el comportamiento sísmico de estructuras históricas, con la finalidad de preservar vidas y conservar el patrimonio. Tal es el caso de la Catedral de Lima, que hasta la actualidad sigue en funcionamiento y afora gran cantidad de personas. Por otro lado, en Perú no existe una base informática o estudios previos que sirvan como guía para realizar un análisis estructural y diseñar intervenciones para mejorar la respuesta estructural de construcciones históricas; por esto, es necesario iniciar una investigación que sirva como base para futuros estudios.

1.3 Objetivos

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar la metodología propicia para analizar la seguridad sísmica de estructuras históricas peruanas. En los objetivos específicos está realizar una evaluación preliminar de la seguridad sísmica de las fachadas de la catedral de Lima

1.4 Hipótesis

La metodología propuesta por la NTC 2008 de Italia, con el que se hace la evaluación, sirve para analizar preliminarmente la seguridad sísmica de la catedral de Lima.

1.5 Antecedentes

Existen muchos estudios que se han realizado con el objetivo de entender el comportamiento de las estructura de mampostería no reforzada (EMNR), pero por más esfuerzos computacionales, ensayos en laboratorios y pruebas in –situ, etc.; no se ha llegado a describir totalmente su comportamiento. Muchos métodos basados en los mecanismos de colapso tienen como objetivo calcular cual es la fuerza horizontal que activa un tipo de mecanismo y la capacidad sísmica del elemento que se analiza. De acuerdo con Ayala et al. (2003), existen 2 tipos de falla en una pared de mampostería no reforzada: falla en el plano y falla fuera del plano. Las fallas fuera del plano son las que tienen más probabilidad a ocurrir y las más peligrosas para la integridad física de los usuarios. Generalmente se dan en los muros externos de las EMNR. Esta investigación está centrada en este tipo de fallas.

Ayala y Speranza (2003) proponen ecuaciones simples para calcular los factores de activación asociados con diversos mecanismos de colapso, y funciones de vulnerabilidad que se derivan de estos. Describen tanto las fallas dentro del plano como las que ocurren fuera del plano (como ya se describió anteriormente, nos centraremos en las fallas que ocurren fuera del

plano). La forma en la que los mecanismos de colapso se desarrollan dependen de la calidad y fuerza de las conexiones del elemento en análisis con otros elementos de la estructura, tales como: paredes, tabiques portantes, vigas y estructuras de techo. Dependiendo de las características de los elementos antes mencionados, reforzamientos de la estructura y de la fricción de la superficie en contacto se pueden producir 8 posibles mecanismos de colapso fuera del plano para EMNR.

Restrepo (2004) publica una tesis dedicada al estudio del riesgo sísmico de una EMNR, siendo el objetivo principal de esta investigación el diseño, desarrollo y aplicación de un nuevo procedimiento analítico para la evaluación del riesgo sísmico de una EMNR a escala urbana. Le dio una consideración especial al comportamiento estático y dinámico de la falla fuera del plano, además de la descripción de mecanismos de falla en el plano. Para el desarrollo de la nueva metodología realizó una serie de pruebas en laboratorio con un modelo a escala 1:5 de una EMNR, y los resultados obtenidos se compararon con los que resultaron del uso de las ecuaciones propuestas por Ayala y Speranza (2003) para mecanismos de colapso. A partir de la comparación, se realizó un conjunto de ecuaciones analíticas que describen el comportamiento estático y dinámico de los mecanismos de falla comunes fuera del plano; en otros términos, mejoró las ecuaciones propuestas por Ayala y Speranza. Para la estimación del riesgo sísmico, formula un procedimiento con un enfoque totalmente probabilístico al que denomina MeBASE. Finalmente, presenta algunos ejemplos numéricos y dos evaluaciones completas a escala urbana de una EMNR existentes en Italia y Colombia, mostrando la eficiencia y ex portabilidad del procedimiento, y su aplicabilidad en casos reales.

Mientras han pasado los años, la investigación sobre las fallas que ocurren en estructuras históricas se hace más necesaria con el fin de preservar el patrimonio cultural. Roca et al. (2010), presenta una revisión total de los métodos aplicables al estudio de la construcción histórica de albañilería. En primer lugar, el artículo propone una discusión sobre los principales retos planteados por las estructuras históricas y las condiciones deseables que los enfoques orientados al modelado y análisis de este tipo de estructuras deben lograr. En segundo lugar, se hace referencia a los principales métodos disponibles que se utilizan realmente para estudiar las EMNR. Se consideran las principales estrategias disponibles, incluyendo el análisis de límites, métodos simplificados, macro y micro-modelado de FEM y métodos de elementos discretos (DEM) con respecto a su realismo, eficiencia informática, disponibilidad de datos y aplicación real a grandes estructuras. Se ofrece un conjunto de consideraciones finales sobre la posibilidad real de llevar a cabo un análisis realístico de estructuras complejas de albañilería no confinada.

El Ministerio del Patrimonio Cultural de Italia (2008) presentó una guía de evaluación sísmica para construcciones históricas. Existen 3 tipos de evaluación en esta guía, dependiendo del nivel de concientización de la EMNR, que se refiere a los datos que se pueden recolectar, solvencia económica y al objetivo que tiene el análisis que se realice.

Ante la necesidad de saber el comportamiento de estas estructuras; Peña (2010) propone una estrategia integral de análisis complementarios en la cual describe una serie de pasos y puntos que deben ser tomados en cuenta en el análisis de una estructura histórica. En primer lugar, la adquisición de datos es el primer paso, tanto de dimensiones, como propiedades mecánicas. Propone una idealización de la geometría de la estructura si es que un elemento no se puede describir con un software. Con respecto a los materiales que conforman la estructura, se refiere a la homogenización de este, tomando al elemento en análisis como un cuerpo homogéneo que describa el comportamiento heterogéneo mediante la toma de propiedades medias de los materiales. Para lograr la homogenización se pueden realizar pruebas experimentales en laboratorio o in situ con el fin de obtener las propiedades mecánicas el elemento. Para el modelo computacional sugiere la calibración con la vibración ambiental de la estructura obtenida de ensayos in situ. Luego de obtener los datos necesarios se procede a seleccionar la herramienta de análisis; entre los disponibles tenemos: el método de elementos finitos (MEF), el método de elementos discretos o discontinuos (MED), el método de elementos rígidos o macro elementos, el análisis límite y el análisis elástico lineal. Dependiendo de la información disponible, objetivo, disponibilidad de la herramienta, compatibilidad entre la herramienta y manejo de la teoría necesaria para su uso y costos, se escogerá un método o herramienta de análisis. En caso sea necesario, puede usarse más de un análisis, si es que no se consigue completamente el objetivo, se puede usar un tipo de método que complemente el anterior en cuanto a objetivos, a estos se les llama análisis complementarios. Como tercer paso propuso calibrar y validar los modelos; la calibración consiste en que el comportamiento del sistema estructural del edificio en análisis coincida con el modelo computacional o numérico que se elaboró. Finalmente, el tipo de análisis a usar puede ser lineal o no lineal. Generalmente, el primero se usa para hacer una evaluación preliminar, mientras que el segundo es el más recomendado para entender con más precisión el comportamiento de una EMNR.

Recientemente se han hecho trabajos a iglesias que tienen un carácter histórico importante, tal es el caso de la Iglesia de Santa Gemma, en el centro histórico Goriano Socoli, en la región de Abruzos, Italia; que fue golpeada por el terremoto de L'Aquila en el 2009. Criber, Brando y De Matteis (2015) presentan un estudio detallado de los daños provocados por el terremoto

en el interior de la iglesia y sus principales macro-elementos, usando el análisis límite lineal y no lineal. En el artículo, usaron la metodología propuesta por el código italiano para patrimonio cultural (Norma Técnica de Construcción Italiana, 2008); que consistió en lo siguiente: En primer lugar, se calculó el índice de daño post sismo, resultado de realizar una evaluación cualitativa de 28 mecanismos probables de ocurrir en una iglesia histórica. Como resultado se obtuvo que se activaron 22 mecanismos de colapso. Con el fin de interpretar el estado de daños de cada macro-elemento, se realizó un análisis límite cinemático con el objetivo principal de determinar el factor de activación de los mecanismos identificados. Este factor de activación se obtiene con las ecuaciones que derivan de usar el Principio de Trabajo Virtual (PTV). Luego de esto, se hizo un análisis lineal en el que vinculó cada factor de activación a una aceleración espectral y la comparó con la aceleración máxima del suelo. Además, se hizo un análisis no lineal, para lo cual obtuvo las curvas de capacidad para cada mecanismo de colapso, identificando así los desplazamientos máximos para cada mecanismo y comparándolos con los desplazamientos de demanda de la zona. Finalmente, de los resultados obtenidos del análisis se obtuvo que las principales debilidades de la iglesia se relacionan con los mecanismos que ocurren fuera del plano de las paredes externas, así como el vuelco de los sistemas arcos – muelles. La iglesia de Santa Gemma es un ejemplo típico de las construcciones de la región de Abruzos, por lo cual, el análisis realizado se puede utilizar para llevar a cabo un análisis de evaluación de la vulnerabilidad a escala regional.

Con el fin de complementar el estudio descrito anteriormente, Brando, Criber y De Matteis (2015) publicaron un documento en el que presentan un modelo numérico de la iglesia de Santa Gemma, usando el Método de Elementos Finitos (MEF) para analizar el sistema estructural. Este modelo ha sido montado en referencia a las condiciones reales de la estructura, en tanto a la geometría y los patrones de agrietamiento revelados en su estado dañado, usando el software ABAQUS 6.7. Se tomó en cuenta el efecto de la cubierta de hormigón armado existente, el cual se consideró en términos de carga sobre las vigas y el diafragma del techo; por otro lado, a fin de tener en cuenta el efecto que proporciona los lazos de la barra de hierro, insertada para fortalecer la iglesia, se ha insertado un conector tipo cable al modelo al que se le aplicó una fuerza de precarga de 60% su rendimiento. Con esto se deja en claro que el modelo numérico debe abarcar todas las características reales del edificio, y si es que alguna es muy sofisticada de plasmar en el programa, optar por simular el efecto que ese elemento causa al sistema estructural. El modelo fue calibrado por medio de pruebas de vibración ambiental, usando sismómetros ubicados estratégicamente en puntos clave de la iglesia y con ayuda del software ARTEMIS. Este análisis permitió detectar las partes de la iglesia que fueron más frágiles, caracterizadas por las concentraciones de esfuerzos, los bordes de las aberturas, los puntos de irregularidades geométricas, la base de la torre de

campana y las columnas. Según el artículo tales resultados parecen estar de acuerdo con el daño sufrido por la iglesia real bajo cargas sísmicas. También, se ha señalado que algunas vulnerabilidades de la iglesia se han agudizado más por la aplicación errónea de algunas intervenciones después de los terremotos del pasado, como los techos de hormigón armado colocados en la parte superior de las naves laterales y por la mala colocación de los lazos de hierro.

Mendes (2017) formula una metodología de evaluación visual propuesta y desarrollada para iglesias coloniales en Cusco. Consiste en el desarrollo y la adaptación de parámetros de rápida aplicación con el objetivo de lograr un índice de vulnerabilidad y, de esa forma, hallar el daño esperado frente a diferentes periodos de retorno.

1.6 Metodología

- Recopilación y revisión de bibliografía y antecedentes: En esta etapa se hará un estado del arte de mecanismos de colapso, las metodologías y aplicativos que ayuden a evaluar una estructura histórica.
- Seleccionar una herramienta de análisis: Se describen 3 metodologías propuestas por otros autores, de las cuales se escogerá una. La elección de esta metodología será de acuerdo a la información disponible que debe ser recaudada para su uso, el alcance de los objetivos que hemos planteado anteriormente, manejo de la teoría necesaria y los costos económicos que demanda.
- Aplicación de la metodología seleccionada a la fachada de la catedral de Lima: En esta etapa se hará la evaluación a las fachadas laterales del edificio en mención.
- Evaluación de los resultados: Se definirá la seguridad sísmica de la catedral de Lima, poniendo en primer plano los mecanismos más probables a ocurrir y la importancia que tienen en la respuesta sísmica de la catedral de Lima si es que se llega a activar.

2. CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 Mecanismos de colapso y problemas que presenta el análisis sísmico de estructuras históricas

Un mecanismo de colapso es la forma en la que falla una estructura, producto de la formación de un número suficiente de rótulas plásticas en posiciones que originan un sistema lábil, donde el equilibrio ya no es posible bajo ninguna circunstancia. Es un estado en el que las deformaciones de la estructura pueden seguir aumentando sin necesidad que la carga actuante aumente. Este mecanismo puede, o no, ser el que realmente lleve al colapso total a una estructura.

El análisis del comportamiento estructural de una estructura histórica se puede realizar mediante el enfoque de mecanismos de colapso, que permite conocer las zonas o elementos más vulnerables del edificio y las formas en la que puede fallar ante un sismo. Para analizar edificaciones históricas, Roca et al. (2010) identifica los siguientes problemas:

- a. **Materiales:** La albañilería de tierra, ladrillo o piedra y la madera se caracterizan por fenómenos mecánicos muy complejos que siguen desafiando las aplicaciones de modelado de estas estructuras. Existen métodos y programas que aproximan dichas características pero no son exactas (FEM, XFEM, DEM, etc.). La albañilería tiene las siguientes características principales: respuesta casi nula a la tracción, fricción en cizallamiento y anisotropía (respuesta sensible a la orientación de cargas).
- b. **Geometría:** La mayoría de estructuras históricas tienen una geometría muy complicada: arcos, bóvedas y relleno. El análisis y modelado de estos representan un problema para programas analíticos comunes.
- c. **Morfología:** En estructuras históricas los miembros estructurales son no homogéneos y muestran estructuras internas complejas que incluyen varias capas (relleno, material, cavidades e inserciones metálicas). Es difícil computarizar la morfología de las estructuras históricas de manera que este problema es uno de los más importantes.

2.2 Características deseables de los métodos aplicados a las estructuras históricas

Debido a los desafíos mencionados, los intentos de modelar y simular la respuesta de una estructura histórica deben tratar de satisfacer algunos requisitos básicos. Roca et al. (2010)

propone características que debe cumplir una metodología dirigida al análisis de estructuras históricas:

- Cualquier técnica de modelado debe ser capaz de describir adecuadamente la geometría y la morfología de la construcción real, incluyendo la forma estructural, composición interna, conexiones y condiciones de soporte. Una descripción precisa de la distribución de la masa y de las fuerzas externas nos ayudará a ser más precisos.
- Deben adoptarse ecuaciones constitutivas que permitan una descripción adecuada de las características mecánicas y de resistencia de los diferentes materiales existentes en el edificio, pero esto es muy complejo, ya que es difícil describir las características de los materiales como adobe, quincha, piedra y albañilería que son los principales materiales con los que se han construido centros históricos.
- Un modelo preciso de la estructura también debe permitir la descripción de los daños y alteraciones existentes en la estructura, incluyendo grietas, desconexiones, aplastamiento, deformación y defectos de construcción. Algunos tipos de daños se pueden modelar indirectamente como una desconexión entre elementos o una reducción local de las propiedades del material. Con el fin de caracterizar la capacidad real en la presente condición de un edificio, el análisis debe llevarse a cabo en el modelo que explique su estado real dañado y deformado.
- Como el análisis de las estructuras históricas se orientará normalmente a identificar las necesidades de restauración y fortalecimiento. Los métodos de análisis deben ser capaces de incorporar y modelar posibles medidas de estabilización, reparación o fortalecimiento. En algunos casos, éstos pueden tenerse en cuenta de manera indirecta modificando adecuadamente las propiedades del material, las dimensiones o configuraciones seccionales, o añadiendo fuerzas para representar su efecto mecánico. También debe tenerse en cuenta la interacción de la estructura con el suelo, excepto en los casos en que se juzgue irrelevante.

En esta investigación se revisarán metodologías para realizar una evaluación preliminar sobre la seguridad sísmica de una estructura histórica por lo cual no se cubrirán todos los aspectos mencionados, pero se obtendrá una idea del comportamiento estructural de la catedral de Lima ante un sismo. Luego de haber realizado esta evaluación preliminar y una vez identificados los mecanismos de colapso más probables a ocurrir, se puede proceder a utilizar métodos más complejos para obtener resultados más precisos.

2.3 Revisión de métodos clásicos

Baker y Heyman (1969) consideran al análisis plástico (o límite) una poderosa y teóricamente sólida herramienta para el estudio de EMNR. De acuerdo con esta formulación, los teoremas del límite de plasticidad pueden aplicarse a las estructuras de albañilería, siempre que se verifiquen las siguientes condiciones: (1) La resistencia a la compresión del material es infinita; (2) El deslizamiento entre las partes es imposible; (3) La resistencia a la tracción de la albañilería es nula.

En particular, estas condiciones permiten que usemos el conocido teorema del límite inferior (o seguro) en el cual la estructura es segura, lo que significa que el colapso no ocurrirá si se puede encontrar un estado de equilibrio estáticamente admisible. Esto ocurre cuando se puede determinar una línea de empuje, en equilibrio con las cargas externas, que cae dentro de los límites de la estructura. La carga aplicada es un límite inferior de la carga final real (la que causa la falla). El teorema de límite inferior apoya el llamado enfoque estático (o análisis de límite estático) para la evaluación de la seguridad de las estructuras de albañilería no confinada. Para aplicar este teorema solo se necesita identificar las fuerzas externas y su punto de aplicación, el peso del muro en estudio y tomar momentos en un punto referencial donde se pueda producir el vuelco o falla, para luego hallar la fuerza horizontal que activa el mecanismo. El uso de este teorema se entenderá mejor en los ejemplos de aplicación propuestos en el capítulo 3.

Por otro lado, de acuerdo con el teorema del límite superior, se puede encontrar un mecanismo cinemática mente admisible, para el cual el trabajo desarrollado por las fuerzas internas y externas deben ser iguales al aplicar un giro unitario al elemento en análisis. La fuerza lateral obtenida será un límite superior de la que origina el colapso. Este teorema utiliza el Principio de trabajo virtual, que se explicará más adelante.

A pesar de su origen antiguo, el análisis de límites se considera hoy como una poderosa herramienta que describe de manera realista la seguridad del colapso de las estructuras compuestas por bloques (incluyendo no sólo arcos y estructuras compuestas de arcos, sino también torres, fachadas y edificios enteros). En sentido estricto, el análisis de límites sólo puede utilizarse para evaluar la estabilidad o la seguridad de las estructuras. Por esto, debe ser siempre considerado como una herramienta complementaria, o al menos como una intuición de guía, cuando se realizan análisis informáticos alternativos.

2.4 Métodos modernos

El método de elementos finitos (MEF) y el método de discretización de elementos (MDE), son metodologías de análisis con los cuales se logran resultados más precisos mediante procedimientos más sofisticados. Estos tipos de análisis son implementados en programas informáticos como SAP, ETABS, COMSOL, ABAQUS, entre otros. Las metodologías antes mencionadas tienen un alto grado de complejidad, ya que buscan valores reales para analizar la vulnerabilidad sísmica de una estructura. Esta investigación se limitará a hacer una evaluación preliminar usando el análisis límite plástico antes detallado.

2.5 Principio de trabajo virtual y volteo incipiente

El cálculo del factor de activación es una parte importante del análisis en EMNR, de acuerdo a los métodos clásicos podemos usar el teorema de límite superior o el de límite inferior. Para la aplicación de estos se requiere una naturaleza monolítica adecuada de las paredes de mampostería, de modo que se evita que ocurra un colapso debido a la desintegración localizada de la mampostería; es decir, los elementos que analicemos no deben presentar desgastes climatológicos ni daños de desprendimiento de carácter importante. El método es incompatible con mampostería de mala calidad, ya que es previsible que estos tipos de mampostería pueden presentar resistencia pobre a las acciones en el plano.

En el análisis se considera que una EMNR consta de macronutrientes no deformables o, usando una terminología más técnica, a partir de cuerpos rígidos. El análisis tiene el objetivo de evaluar las condiciones de límite del equilibrio de los macro elementos que son afectados por el terremoto; descuida la resistencia a la tracción de la mampostería, y en muchos casos incluso la compresión y la de cizallamiento. La EMNR debe ser estudiada para identificar, sobre la base de la organización estructural, sus deficiencias y su estado de funcionamiento actual.

Para obtener el multiplicador horizontal “ α_0 ” que conduce a la activación del mecanismo de daño local, es necesario aplicar a los bloques rígidos que componen la cadena cinemática las siguientes fuerzas: los pesos propios de los bloques, que se aplican en su centro de gravedad; las cargas verticales que soporta el elemento en análisis (pesos propios y sobrecargas de los pisos y el techo; también, otros elementos de mampostería no considerados en el modelo estructural); un sistema de fuerzas horizontales proporcionales a las cualesquiera fuerzas externas (tales como los transmitidos por cadenas metálicas) y cualesquiera fuerzas internas (por ejemplo, acciones relacionadas al engranamiento entre los segmentos del muro).

Luego de identificadas todas las fuerzas actuantes se procede a realizar el análisis cinemático usando cualquiera de los 2 teoremas mencionados anteriormente. El teorema de límite superior usa el Principio de trabajo virtual (PTV), donde se asigna una rotación virtual ϑ_k al bloque genérico k. Es posible determinar en función de esto y de la geometría de la estructura, los desplazamientos del punto de aplicación de las fuerzas, en sus respectivas direcciones. El multiplicador α_0 se obtiene igualando el trabajo total realizado por las fuerzas internas y externas aplicadas para actuar en correspondencia con un sistema móvil virtual, ver ecuación (2.1).

$$\alpha_0 \left[\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right] - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (2.1)$$

Donde:

- n: es el número de todas las fuerzas de peso aplicados a los diferentes bloques de la cadena cinemática.
- m: es el número de fuerzas de peso que no se imponen directamente sobre los bloques cuyas masas, debido de la acción sísmica, generan fuerzas horizontales en los elementos de la cadena cinemática, ya que no se transmiten eficazmente a otras partes del edificio.
- o es el número de fuerzas externas, no asociados con masas, aplicados a los diferentes bloques.
- P_i es la fuerza de peso general aplicada al bloque (peso del bloque, aplicado en su centro de gravedad u otro peso).
- P_j es la fuerza de peso genérica, no aplicada directamente a los bloques, cuya masa, debido a la acción sísmica, genera una fuerza horizontal sobre los elementos de la cadena cinemática, ya que no se transmite de manera efectiva a otras partes del edificio.
- $\delta_{x, i}$ es el desplazamiento horizontal virtual del punto de aplicación del i-ésimo peso P_i , asumiendo como dirección positiva la dirección asociada con la dirección según la cual actúa la acción sísmica que activa el mecanismo.
- $\delta_{x, j}$ es el desplazamiento horizontal virtual del punto de aplicación del j-ésimo peso P_j , asumiendo como dirección positiva la dirección asociada con la dirección según la cual actúa la acción sísmica que activa el mecanismo.
- $\delta_{y, i}$ es el desplazamiento virtual vertical del punto de aplicación del i-ésimo peso P_i , positivo si es hacia arriba.
- F_h la fuerza externa genérica (en valor absoluto) aplicada a un bloque.
- δ_h es el desplazamiento virtual del punto de aplicación de la fuerza externa h-ésima, en la dirección de la misma y del signo positivo si de dirección opuesta.
- L_{fi} es el trabajo de posibles fuerzas internas.

Más adelante se presentarán ejemplos aplicativos del Principio de Trabajo Virtual.

Por otro lado está el teorema de límite inferior el cual tiene las mismas consideraciones respecto a la rigidez del elemento, calidad del material y resistencia nula a la tracción. Este método consiste en tomar momentos en un punto donde se quiera evaluar la formación de una rótula plástica. El factor de activación α se halla como el resultado de dividir el momento estabilizador del elemento entre el momento que genera o está a favor del volteo. A continuación se presenta un ejemplo simple:

$$M_{S(A)} = W \cdot \frac{s}{2} + F_V \cdot d_V + P_S \cdot d + T \cdot h$$

$$M_{R(A)} = \alpha \cdot [W \cdot y_G + F_V \cdot h_V + P_S \cdot h] + F_H \cdot h_V + P_H \cdot h$$

Donde:

M_s = momento estabilizante o resistente

M_r = momento de volteo

Por lo tanto:

$$\alpha = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento de volteo}}$$

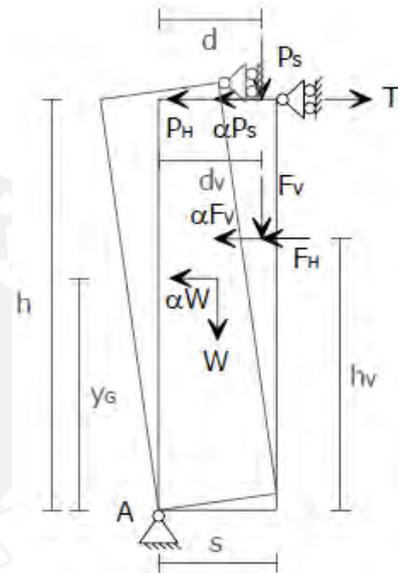


Figura 2.1. Esquema de cargas y puntos de aplicación

2.6 Casos de análisis: mecanismos de colapso fuera del plano

En el capítulo anterior se ha puesto en evidencia, según la bibliografía descrita, que los mecanismos de colapso que son más probables a activarse son los que ocurren fuera del plano, y también son los que representan un mayor peligro para estabilidad estructural de una EMNR.

Según ITC, REGIONE MARCHE y UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'AQUILA (2007), en el caso de colapsos fuera de plano, los casos más frecuentes en edificios históricos corresponden a la activación de los siguientes mecanismos:

- Vuelco simple
- Vuelco compuesto
- Flexión vertical
- Flexión horizontal

De acuerdo a lo planteado por el ITC et al. (2007) a continuación se presenta para cada tipo de mecanismo, las características y modalidades de colapso, los requisitos que deben verificarse en los edificios para que el mecanismo pueda manifestarse y los síntomas que informan la activación:

Volteo simple:

El volteo simple de muros externos de EMNR debido a la acción del terremoto representa una situación de daños entre los más frecuentes y peligrosos. Esto se esquematiza como una rotación rígida de partes de la pared alrededor de una bisagra cilíndrica horizontal en la base; la rotación es activada por fuerzas fuera del plano (Figura 2.2). Esta situación ocurre cuando la pared golpeada por la acción sísmica es libre en la parte superior y no unido a las paredes ortogonales.

Las condiciones de restricción que hacen posible este mecanismo son, por lo tanto, la ausencia de conexiones entre los elementos de mampostería y dispositivos de conexión, como bordillos o cadenas, en la parte superior del ala de vuelco. Si el edificio ha sufrido la acción de un terremoto, este tipo de mecanismo es fácilmente identificable desde lesiones verticales presentes en la intersección del ala volcada y las paredes ortogonales, hasta la extracción de los rayos de las losas de la pared.



Figura 2.2. Identificación del mecanismo de volteo simple – esquemas y fotos (ReLUIS; s/f)

El simple vuelco de porciones de mampostería puede referirse a diferentes geometrías de la pared examinada, en relación con un patrón de crack detectado o la presencia de aberturas en la pared (puertas y ventanas) que influyen en su progresión. Puede afectar uno o más pisos del edificio, con respecto a la conexión entre las losas y las paredes en los diversos niveles de la estructura. En estos casos es necesario considerar la posibilidad de que el vuelco pueda involucrar diferentes niveles del muro; por lo tanto, el multiplicador de colapso debe evaluarse para diferentes posiciones de la bisagra cilíndrica. También se observa que a veces los edificios de la construcción antigua tienen estructuras de mampostería compuesta por dos muros cortina separados (el caso límite está representado por las paredes de la bolsa); en estos casos el mecanismo de vuelco puede afectar la cortina externa solo con la presumible reducción del multiplicador de colapso, que por lo tanto debe ser evaluado apropiadamente. En la Figura 2.3 se observa el DCL para dos casos distintos de volteo simple.

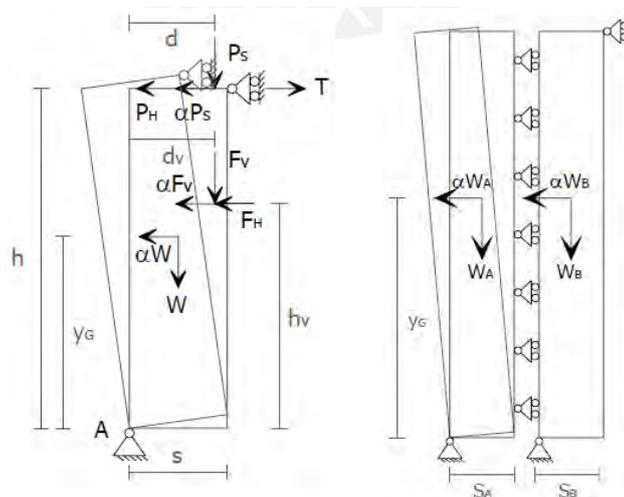


Figura 2.3. Esquemas de cargas aplicadas en un muro monolítico y muro cortina (ITC et al; 2007)

Vuelco compuesto:

Para el vuelco compuesto se indica un conjunto de situaciones en las que el vuelco de la pared ortogonal a la acción sísmica se produce arrastrando una parte de la pared ortogonal al muro examinado, que pertenece a un ángulo libre o para tapar las paredes (Figura 2.4)



Figura 2.4. Identificación del mecanismo de volteo compuesto – esquemas y fotos (ReLUIS; s/f).

En muchos casos, de hecho, los muros analizados y los muros ortogonales tienen conexiones adecuadas entre ellos, que convergen en un nodo y permiten la participación de partes de ellos en el vuelco. Para proporcionar un mecanismo de vuelco compuesto en un edificio intacto, debe haber condiciones caracterizadas por la ausencia de restricciones en la parte superior de la pared vuelco y por la presencia de una conexión efectiva entre la pared golpeada por el terremoto y la que es ortogonal a ella. Generalmente se trata de mamposterías construidas al mismo tiempo (celdas originales) o que han sido sometidos a trabajos de consolidación que involucran la conexión de los paneles de pared ortogonal, pero a falta de una conexión efectiva en la parte superior de la pared puede volcar.

Además, en relación con la presencia de losas rígidas, puede haber una configuración diferente de la cuña de separación en la pared involucrada en volcar. En caso de que haya pisos tradicionales, sin losa armada, se acompaña el mecanismo de volteo de la fachada generalmente desde el desprendimiento de una cuña diagonal de la pared ortogonal. Si, en cambio, los pisos están equipados con losa rígida el mecanismo de inclinación compuesto determina el arrastre de una cuña doble diagonal en la pared de la abrazadera. Cuando el edificio en cuestión ya ha sufrido la acción de un terremoto, es posible observar el mecanismo de vuelco compuesto observando la perturbación detectada, descrita por las lesiones diagonal o doble diagonal en las paredes

conectadas, con diferente ángulo de separación dependiendo del tipo y calidad de la pared que caracteriza el edificio en sí. De hecho, este mecanismo, que es una variante del simple vuelco, es fuertemente también influenciado por el tipo de mampostería y por la presencia de aberturas en los muros de refuerzo o contrafuertes, de los cuales dependen en particular del tamaño y la configuración de la cuña de liberación. Para muros de refuerzo sin aberturas, se puede observar que, en general, el ángulo formado por la diagonal de la cuña con el eje vertical aumenta con el aumento de la calidad de la pared (en particular el ángulo es mayor cuando el sistema de construcción es mejor). En presencia de aberturas cerca de la intersección de las paredes, sin embargo, la forma y el tamaño de la cuña de desprendimiento están determinados por estas.

El mecanismo de volteo compuesto puede, por lo tanto, involucrar diferentes geometrías del macro elemento involucrado en la cinemática y diferentes pisos del edificio, en relación con la presencia de dispositivos de conexión en varios niveles, pero generalmente se relaciona con mampostería conductual monolítico ya que solo se puede activar en paredes de buena calidad y equipamiento. En la Figura 2.5 podemos ver el DCL para 3 casos distintos de volteo compuesto (2 Cuñas y 1 cantonal).

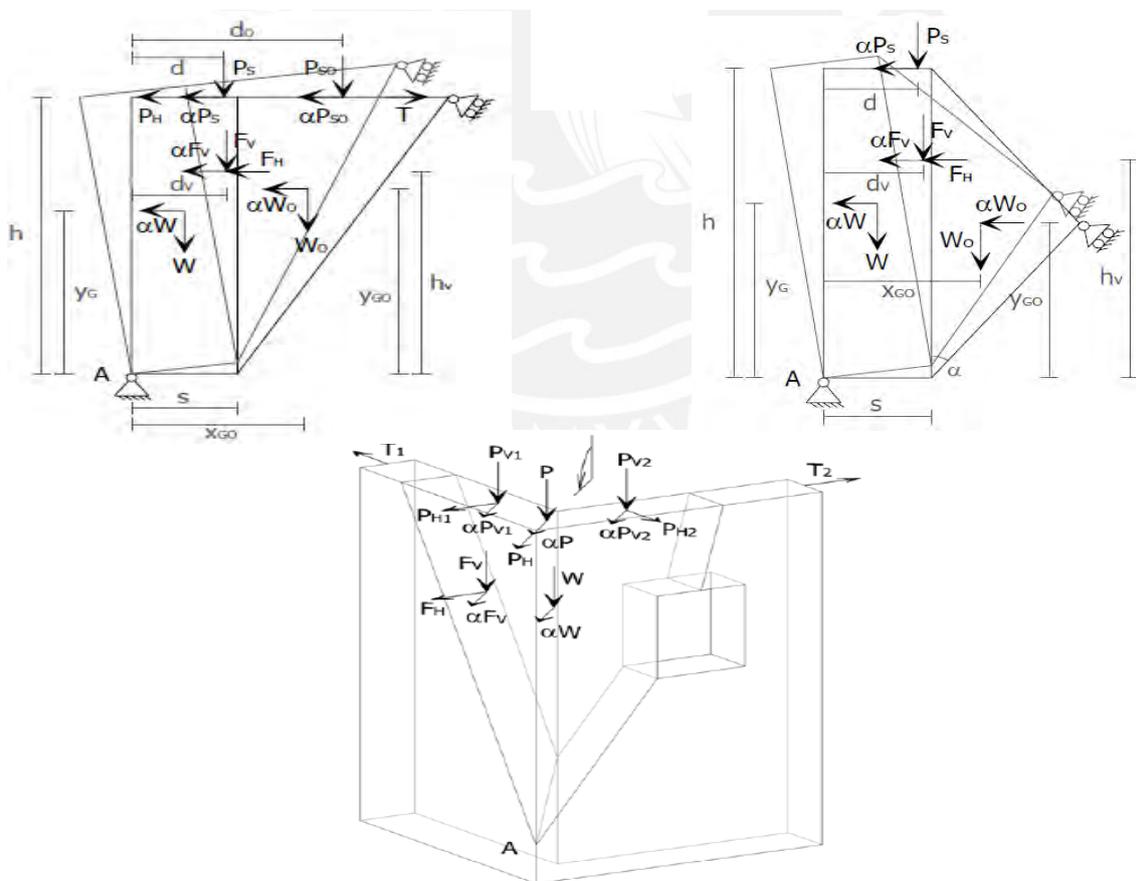


Figura 2.5. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismo de volteo compuesto. (ITC et al; 2007)

Flexión vertical:

Una situación bastante común en los edificios de mampostería está representada por una pared tensa, unida a los extremos y libre en el área central (Figura 2.6). Este es el caso, por ejemplo, de un edificio con un bordillo en la planta superior e intermedia sin conexión; una situación de este tipo también ocurre cuando se considera una porción de pared entre dos pisos bien conectados a ellas. En estas condiciones, la presencia en la parte superior de un dispositivo de conexión impide vuelco de la pared hacia el exterior. Sin embargo, esto, bajo el efecto de sacudidas horizontales, puede colapsar debido a la inestabilidad vertical.

De hecho, la estructura de la pared, construida por elementos de piedra superpuestos o ladrillos unidos por contacto simple o de un mortero con baja resistencia a la tracción, soporta las tensiones de flexión inducidas desde acciones ortogonales hasta su plano, solo si el esfuerzo normal mantiene la resultante dentro de la sección que cruza. De lo contrario, se forma una bisagra cilíndrica horizontal en ese punto alrededor del cual rotan mutuamente los dos bloques formados en la mampostería y se le permite activar el cinematismo para la flexión vertical de la pared.



Figura 2.6. Identificación de mecanismos de flexión vertical – esquema y fotos. (ReLUIS; s/f)

Este mecanismo puede por lo tanto ocurrir en presencia de una retención en la cabeza del ala de la pared, debido, por ejemplo, a tirantes metálicos, a anclajes a las cabezas de vigas de madera o a cuerdas y plantillas en concreto armado bien unido a la mampostería, y se ve favorecido por una mala calidad de la misma, así como las fuerzas horizontales localizadas por el presencia de arcos, bóvedas o pisos intermedios no retenidos. Los mecanismos de flexión vertical son caracterizados por valores del coeficiente de colapso “ α ” que en algunos casos son más altos que los de volteo simple.

En un edificio ya dañado por el terremoto, el mecanismo está señalado por protuberancias horizontales externas y a veces acompañadas por la extracción de las vigas del piso que se conectan en la pared. En cualquier caso, el establecimiento del arco vertical que precede a la activación del mecanismo requiere la presencia de restricciones horizontales efectivas por encima y por debajo de la sección de pared afectada.

El mecanismo de flexión vertical de una pared puede, por lo tanto, puede afectar una o más plantas del edificio, en relación con la presencia de restricciones horizontales, diferentes geometrías de la macro elementos, determinados por la presencia de aberturas localizadas o empujes, y uno o ambos vestimentas, en el caso de muros dobles. En particular en el caso de las paredes de bolsas, El material de relleno interno debido a la sobrepresión puede causar inestabilidad del revestimiento externo, especialmente cuando el único revestimiento interno está conectado a los pisos (por ejemplo, cuando en los bordillos se hicieron en concreto armado conectados a las losas). En la figura Figura 2.7 podemos observar el DCL para el caso de un muro monolítico y uno tipo doble cortina.

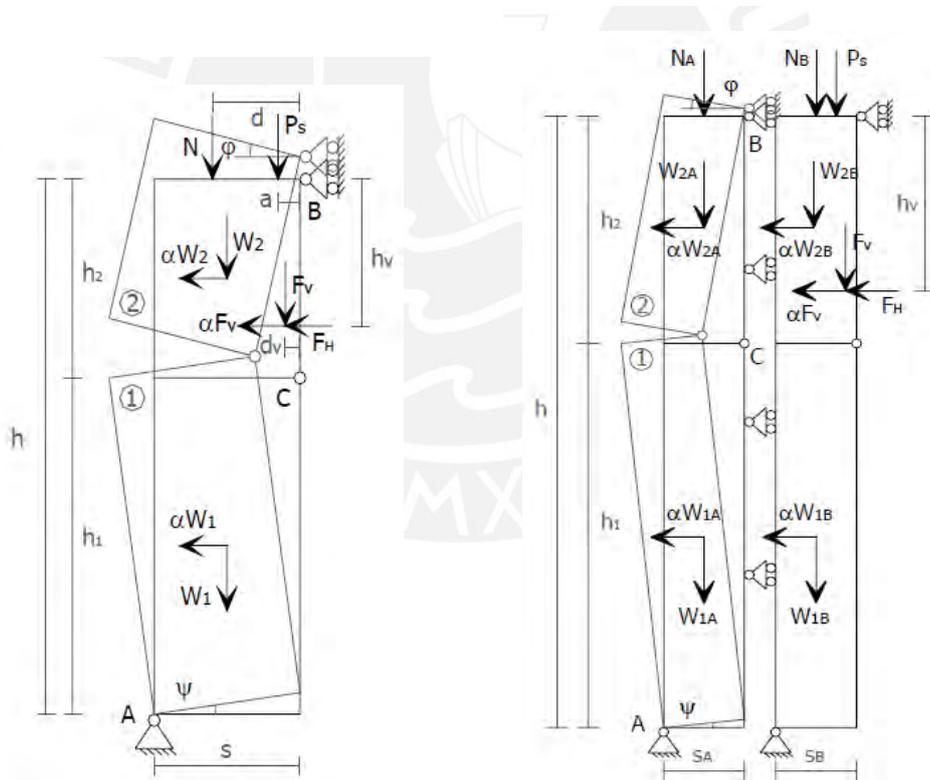


Figura 2.7. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismos de flexión vertical. (ITC et al; 2007)

Flexión horizontal:

En presencia de paneles de pared efectivamente unidos a las paredes ortogonales con el lado superior no retenido por ningún dispositivo, a menudo somos testigos de un tipo de crisis debido al comportamiento de flexión en el plano horizontal de la pared sólida. La respuesta estructural del panel se manifiesta en estos casos como un efecto de arco horizontal dentro de la pared debido a la acción sísmica ortogonal al mismo (Figura 2.8). En particular, el empuje transmitido por el piso o el techo en la parte superior de la estructura de la pared se descarga en la pared de la fachada hasta que llega a las paredes ortogonales (arco horizontal). Esta acción, en las intersecciones de las paredes, luego se divide en un componente T ortogonal a la pared golpeada por el terremoto, absorbida por las varillas de unión si presente, y un componente H paralelo a él.

La activación del mecanismo está precedida por la formación de un arco horizontal en el espesor de la pared; en la condición límite de equilibrio se forman tres bisagras, una en el medio, las otras en proximidad de la intersección entre la pared bajo examen y las paredes ortogonales a ella, en correspondencia con las paredes elementos que deben llevar el T ortogonal al muro analizado.

Del esquema de cálculo se observa que el colapso ocurre cuando el muro no encuentra elementos estructurales capaces de proporcionar reacciones H. En caso de que la pared encaje dentro una matriz y las porciones de mampostería adyacentes son de suficiente resistencia, el colapso de la cinemática no ocurre y la rotura puede ocurrir solo aplastando la parte interna de la pared.

En otras palabras, la evolución del mecanismo depende de la capacidad de las paredes laterales para soportar las presiones H de los arcos. Si la pared no encuentra elementos de contraste capaces de proporcionar una reacción pareja y opuesto al empuje H, entonces el patrón de arco isostático de tres bisagras se vuelve lábil cuando estos se alinean y se produce el colapso cinemático consecuente. Si, por otro lado, la mampostería en examen pertenece a una celda entrecruzada de un conjunto, luego el empuje H es generalmente absorbido por las paredes contiguas, por lo que es necesario un análisis de tensión para verificar la condición de aplastamiento de la parte interna de la pared sujeta a fuertes esfuerzos de compresión.

La situación descrita es típica de las paredes sostenidas por tirantes y se ve favorecida por el empuje en la cabeza de la pared, generalmente debido a la presencia de una cubierta de revestimiento o la acción de martilleo de los elementos de gran deformación del techo y una resistencia a la tracción reducida de la mampostería involucrada que presenta riesgos de expulsión del material que constituye la cara externa de la pared para tensiones de tracción que surgen en el área central debido al cinemático mismo. También la presencia de conductos obtenidos en el espesor de la pared o aberturas para el alojamiento de sistemas tecnológicos, reduciendo la sección resistente de la estructura de la pared, constituyen situaciones preferenciales

para la formación de las bisagras verticales y la iniciación del sistema cinemático y, por lo tanto, representan elementos de particular interés.

En el análisis del mecanismo de flexión horizontal, debemos distinguir entre la caja de la pared monolítica, para el cual el arco de descarga puede afectar todo el espesor de la pared, y el caso de doble pared de cortina para la que es posible exponer el material sin tener la participación de la cortina interna.

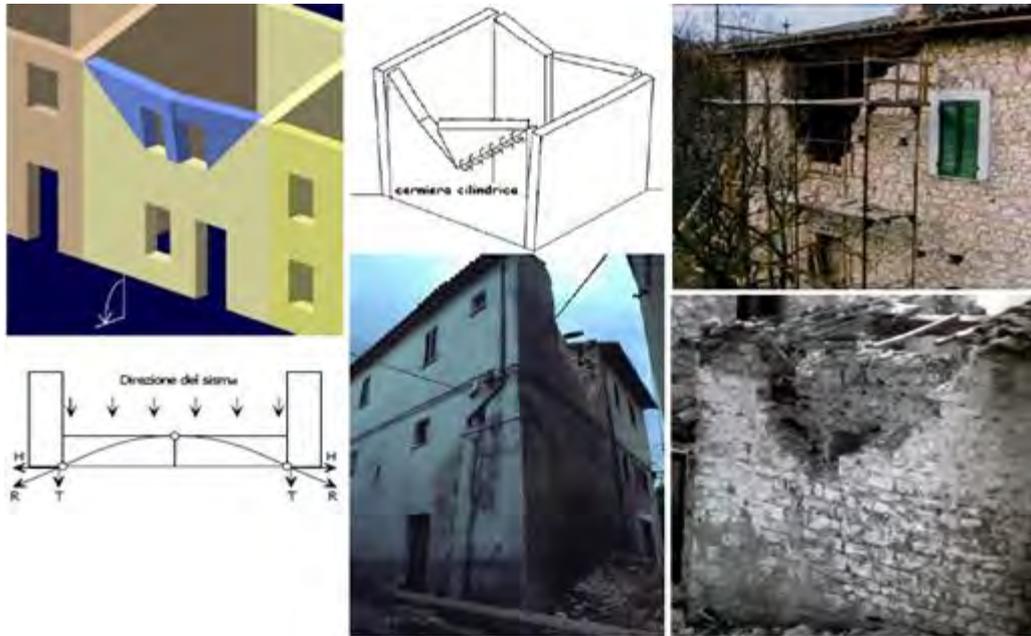


Figura 2.8. Identificación de mecanismos de flexión horizontal – esquemas y fotos. (ReLUIS; s/f)

El mecanismo de doblado horizontal también puede afectar geometrías diferentes en los macro elementos implicados en la cinemática, cuya definición está condicionada principalmente por presencia de aberturas alineadas en la banda del ático y la calidad de la mampostería que se observe la altura de la cuña de desprendimiento. En el caso de estructuras levemente dañadas, la identificación de mecanismos de flexión horizontal es facilitada por la lectura del patrón de craqueo que proporciona indicaciones importantes sobre macro elementos que se han formado. Mientras que en general en el caso de estructuras intactas de pared con cantones se realizó correctamente la posible cinemática de colapso fuera del plano que puede desarrollar con la participación de porciones más o menos grandes de mampostería y no es inmediato predecir que cinemático es más probable. En estos casos, para hacer una estimación de las condiciones más favorables para colapso, es oportuno evaluar diferentes multiplicadores α suponiendo geometrías diferentes de las porciones de mampostería afectada por el cinemático. En la Figura 2.9 se presenta el DCL para de flexión horizontal para muro monolítico, muro cortina y tímpano de fachada.

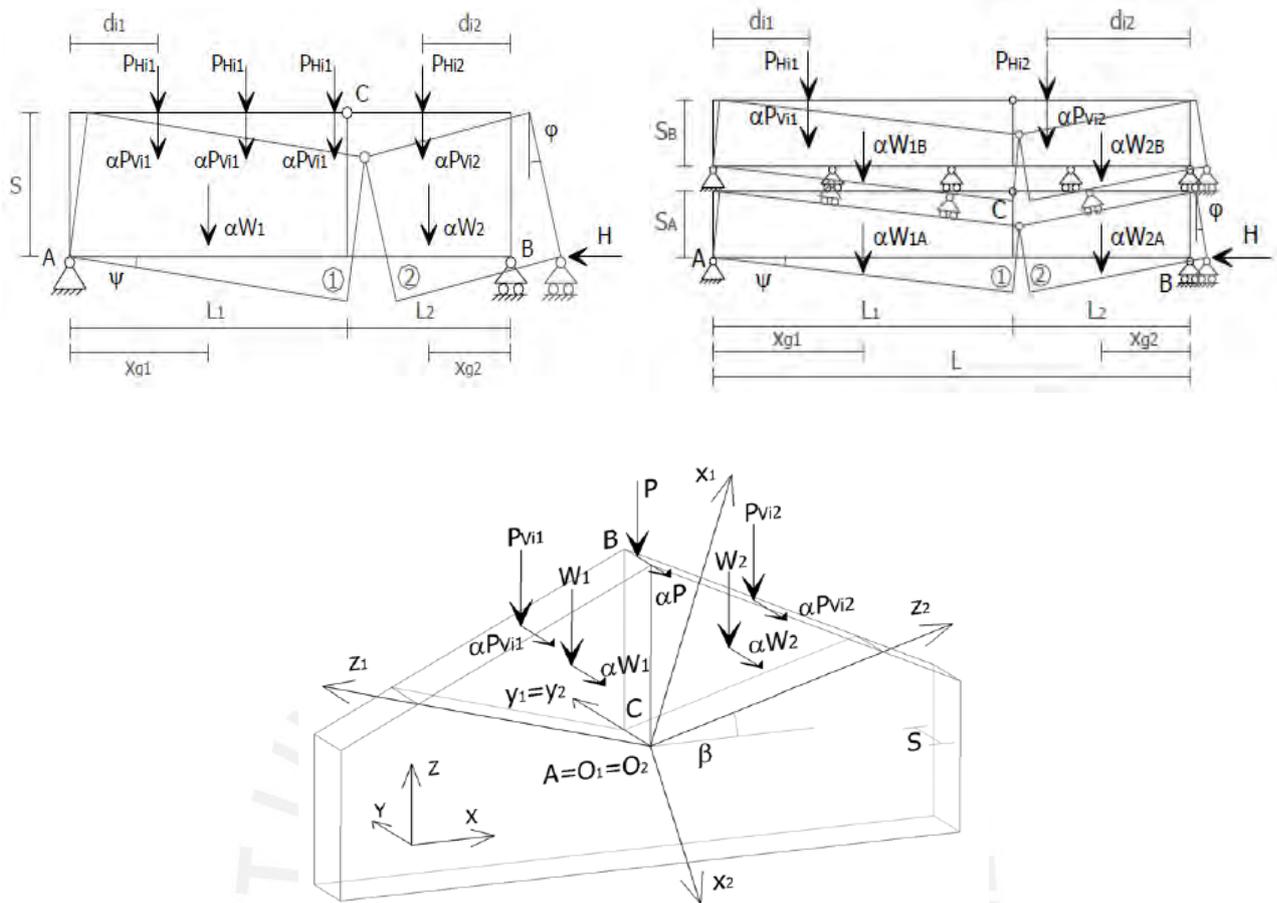


Figura 2.9. Esquemas de cargas aplicadas para mecanismos de flexión horizontal. (ITC et al; 2007)

Todos estos casos descritos se tendrán en cuenta para la aplicación de una de las metodologías en el capítulo 5, en el cual se evalúa todos los casos posibles o mecanismos probables a ocurrir, teniendo en cuenta el sistema estructural y geometría de la catedral de Lima.

2.7 Ejemplos de aplicación:

Vamos a definir la geometría del macro elemento involucrado en el vuelco; y el esquema de cálculo al que se hace referencia con todas las cargas actuantes. En condiciones sísmicas, a cada carga vertical corresponde a una carga horizontal calculada como el producto del primero por el coeficiente sísmico α .

1. Ejemplo de cálculo de factor α_0 que activa el mecanismo de colapso de volteo simple, utilizando el PTV.

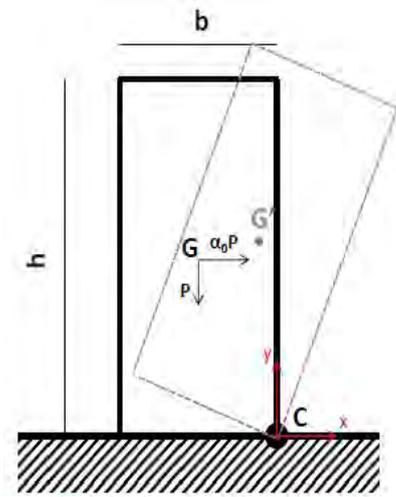


Figura 2.10. Esquema de ejemplo de volteo simple

Aplicamos la ecuación (2.1) propuesta anteriormente:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \cdot \delta_{x,j} \right) + \sum_{h=1}^v F_h \cdot \delta_h - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} = W_{int}$$

$$\alpha_0 \cdot P \cdot u_G - P \cdot v_G = 0$$

$$u_G = -\theta \cdot H/2; v_G = -\theta \cdot B/2;$$

$$\rightarrow -\alpha_0 P \cdot \theta \cdot H/2 - P \cdot (-\theta) \cdot B/2 = 0$$

$$\rightarrow \alpha_0 = B/H$$

El cálculo también se puede hallar utilizando un enfoque estático, igualando los momentos debido a las fuerzas que estabilicen el cuerpo con los momentos que están a favor del vuelco. Por ejemplo en este caso:

Momento que produce el vuelco:

$$-\alpha_0 \cdot P \cdot H/2$$

Momento estabilizante:

$$P \cdot B/2$$

Haciendo equilibrio:

$$\alpha_0 \cdot P \cdot H/2 = P \cdot B/2$$

$$\alpha_0 = B/H$$

Se verifica que por ambos métodos se llega a la misma solución o valor para el factor de activación.

2. Ejemplo de cálculo de factor de activación para el caso de una falla en una altura “h” en un bloque.

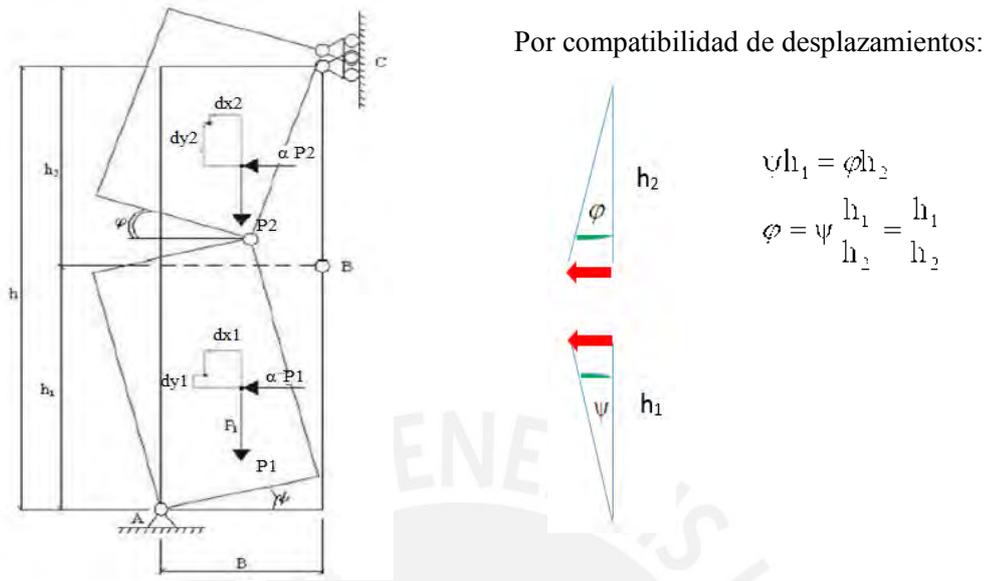


Figura 2.11. Esquema de ejemplo de flexión vertical

Dejando h1 y h2 en función de una única variable “x”

$$h_2 = \frac{1}{x} h \quad h_1 = \frac{x-1}{x} h$$

Recordando que Psi es igual a 1 (giro unitario para activar el sistema de movimiento virtual)

$$\phi = \frac{h_1}{h_2} = x - 1 \quad h_2 = \frac{1}{x} h \quad h_1 = \frac{x-1}{x} h$$

Luego:

$$d_{1Y} = \frac{B}{2} \psi = \frac{B}{2}$$

$$d_{1X} = \frac{h_1}{2} \psi = \frac{h}{2} \frac{x-1}{x}$$

$$d_{2Y} = B \psi + \frac{B}{2} \phi = B + \frac{B}{2} (x-1) = (1+x) \frac{B}{2}$$

$$d_{2X} = \frac{h_2}{2} \phi = \frac{h}{2} \frac{1}{x} \phi = \frac{h}{2} \frac{x-1}{x}$$

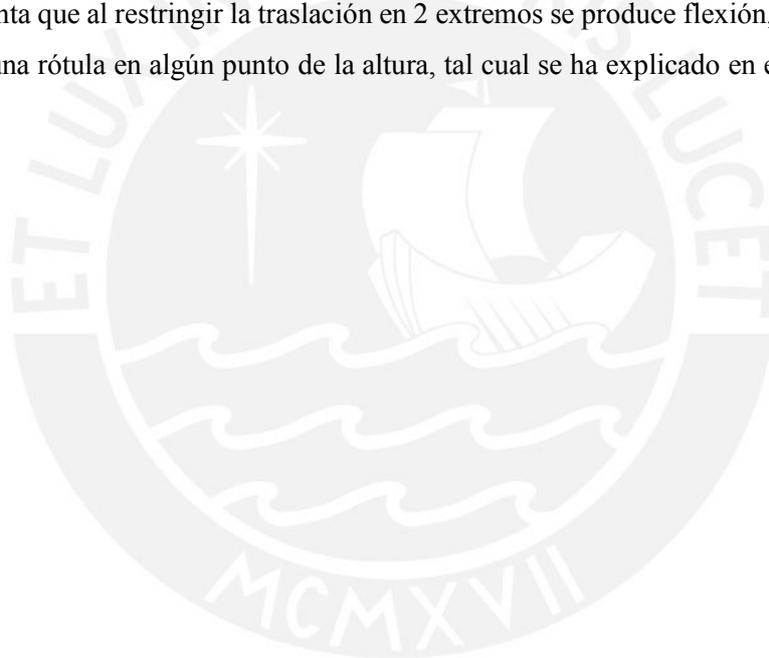
Aplicando la ecuación (2.1):

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \cdot \delta_{x,j} \right) + \sum_{h=1}^o F_h \cdot \delta_h - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} = W_{int}$$

$$\alpha(x) = \frac{B}{h} \frac{2x}{(x-1)}$$

Con esta última podemos deducir el factor de activación en función de “x”, que representa la posición de la rótula en cualquier punto de la altura del elemento en análisis.

Como se ha podido apreciar, la variación de los mecanismos depende mucho de las condiciones de apoyo que tienen. En el primer ejemplo podemos apreciar un volteo simple de todo el bloque en análisis, ya que no existen restricciones en sus bordes. Sin embargo, en el segundo ejemplo nos damos cuenta que al restringir la traslación en 2 extremos se produce flexión, que ocasiona la formación de una rótula en algún punto de la altura, tal cual se ha explicado en el inciso anterior a este.

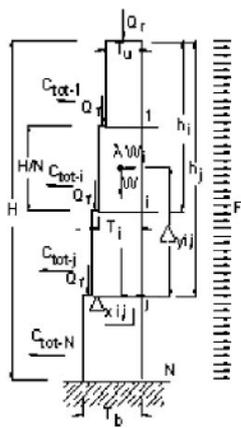


3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍAS DISPONIBLES PARA ANALIZAR ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA NO REFORZADA

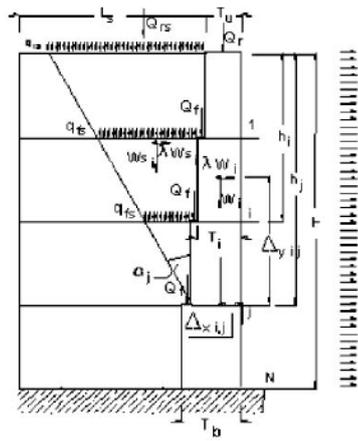
3.1 Método revisado en Ayala y Speranza (2003)

Desarrollaron un método analítico simple, para calcular los factores de carga asociados a varios mecanismos de colapso que pueden ocurrir en un muro de mampostería no reforzada.

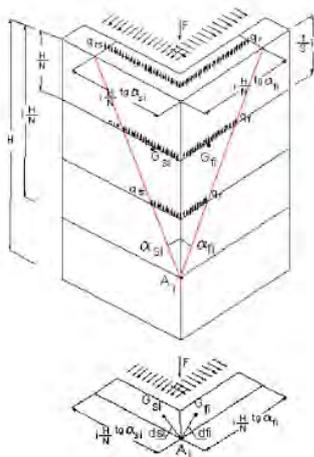
Según Ayala y Speranza (2003), las paredes de mampostería externa de una casa serán típicamente sometidas a mecanismos fuera del plano. Observación directa de los patrones de crack registrados en encuestas de daños posteriores a terremotos, junto con la literatura disponible sobre reconocimiento de mampostería de piedra en estructuras dañadas en terremotos, se llega a la conclusión de que el mecanismo de falla más frecuente es el vuelco de la fachada de la calle. La forma en que estos mecanismos se desarrollarán depende de la calidad y la fuerza de las conexiones del elemento que se analice con los otros elementos de la estructura, paredes cercanas o que pertenecen al mismo lugar al que se está analizando, particiones internas de carga, pisos y estructuras de techo. Si la estructura no tiene experimentado fortalecimiento, se supone que el único medio de restricción para volcar ejercida por otros elementos sobre una pared en particular se rige por la fricción del contacto con la superficie, y esto dará lugar a diferentes tipos de fallas. Esto, sin embargo, ocurre más comúnmente involucrando porciones de las paredes cercanas también. La extensión de la falla y el número de las paredes cercanas involucradas dependerá de la naturaleza de la conexión de estos con el muro analizado, dando lugar a seis posibles tipos diferentes de falla, como se muestra en la Figura 3.1.



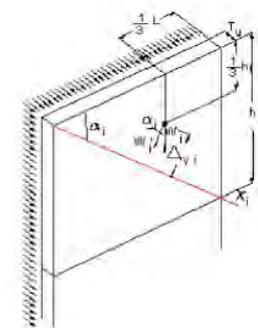
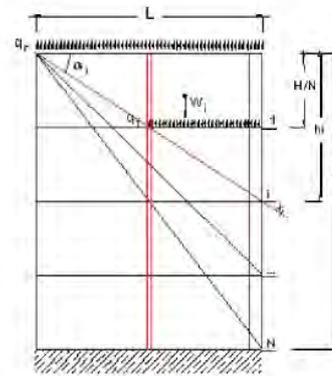
Mechanism A



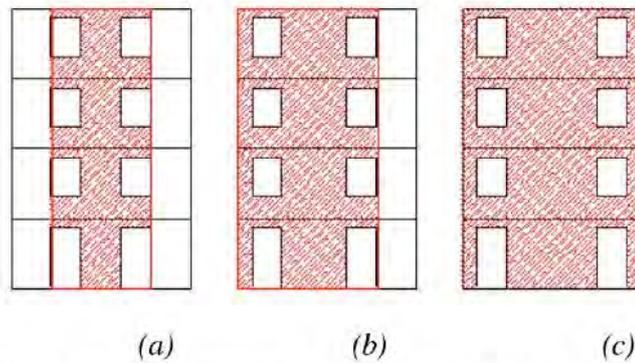
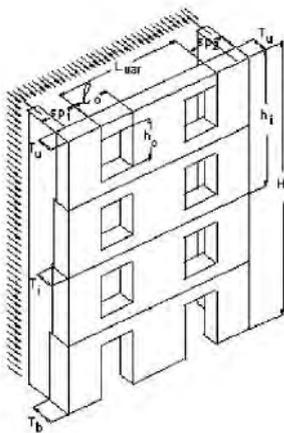
Mechanisms B1 and B2



Mechanism C



Mechanism D



Mechanism E: portions of façade involved in the collapse in relation to the pier width

Figura 3.1. 6 Mecanismos de colapso fuera del plano (Ayala; 2003)

de superposición entre elementos comunes. Estos mecanismos se desarrollan por la ocurrencia de una grieta diagonal a lo largo de las paredes adyacentes y una bisagra horizontal en la fachada.

En el caso de conexiones con solo una de las partes, el mecanismo de tipo D también es posible, para lo cual solo una parte de la fachada está sujeta a vuelcos y las paredes de las partes que están involucradas directamente en el mecanismo. Esto también puede ocurrir en el caso de dispositivos de fortalecimiento no uniformemente distribuidos en toda la fachada. Para el cálculo de este mecanismo, se supone que el ángulo de inclinación de la grieta se define por la diagonal a través de “i” pisos, el grosor es constante y es el promedio de todos los grosores a la altura de la porción involucrada, y esa fricción torsional a lo largo de la línea de grietas inclinadas no se considera.

El mecanismo tipo C es caracterizado por el vuelco de una esquina alrededor de una bisagra horizontal colocada en cualquier nivel de altura y ortogonal al plano bisector de esquina; solo ocurrirá cuando al menos una esquina del edificio sea libre, sin ninguna estructura adyacente, por lo tanto, es común para elementos aislados o ubicados al final de un bloque. Aquí se supone que los ángulos de grieta α_{fi} y α_{si} , respectivamente, afectan a la fachada y la pared ortogonal.

El mecanismo tipo E se considera cuando debido a la disposición de la ventana, y dependiendo del tipo de construcción, podría haber una disolución de integridad dentro del plano de la fachada llevando a fallas parciales. Se supone que la parte de la fachada sujeta al colapso es condicionada por el ancho de los pilares laterales, que definen la distancia entre la columna de aberturas y el borde vertical más cercano. Por lo tanto, si las ventanas están alineadas verticalmente y el ancho del muelle lateral es mayor que el ancho de la ventana y si el borde de la conexión está activa, la grieta vertical puede ocurrir dentro de la fachada misma. Esto puede ocurrir en uno o ambos lados de la fachada. Para todos los mecanismos se supone que hay unidades suficientes establecidas ortogonalmente en el plano de la fachada para asegurar la integridad dentro del espesor.

Los mecanismos F y G de la fachada han sido obtenidos al considerar la presencia de dispositivos de fortalecimiento: el mecanismo de arco vertical y el mecanismo de arco horizontal. El primero ocurre cuando debido a la presencia de vigas de lazo o vigas en forma de anillo, las tiras verticales de la fachada tienden a desviarse del plano, siendo restringidas en la parte inferior y superior. El modelo analítico simula la presencia de vínculos identificando a lo largo de la altura de los edificios dos lugares para los cuales

los movimientos laterales son constreñidos. Cuando se activa el mecanismo, se forma una tercera bisagra a lo largo de la fachada, en una posición intermedia a los dos primeros e identificada por una grieta horizontal. Como las bisagras cilíndricas simulan la acción de contención ejercida por los dispositivos de fortalecimiento, se supone que las dos bisagras extremas se colocan en pisos y niveles de techo solamente. El procedimiento itera para encontrar la posición de estos dos y el intermedio, correspondiente al factor de carga más bajo. En el caso de los haces de anillo, se supone que estos ejercerán una restricción rotacional para la sección transversal de la pared y, por lo tanto, una capacidad de flexión para la cruz. La sección se agrega a la capacidad del efecto de arco. La capacidad de flexión está representada por el segundo término en el segundo miembro de la ecuación presentada en la Tabla 3.1, en la cual, en presencia de lazos, los términos que contienen T_j serán iguales a 0.

El mecanismo G, que adquiere el efecto de arco horizontal se produce cuando el lapso de la fachada es bastante ancho; e internamente, las paredes de los cojinetes no ejercen ninguna o muy poca acción restrictiva. En este caso, el comportamiento de la pared sometida a acción lateral se puede asimilar a un arco horizontal. La falla se caracteriza por una porción trapezoidal central, que, bajo el efecto de la acción lateral del sismo, tiende a desplazarse hacia afuera desde el plano de la fachada, girando alrededor de los centros de rotación Ω_1 y Ω_2 (Figura 3.2, mecanismo G). En la Figura 3.2, se observan puntos definidos con una letra, cada una tiene el siguiente significado. Para que el mecanismo pueda ser activado, el mecanismo requiere de la formación de una bisagra cilíndrica (C) a lo largo del eje vertical de simetría de la fachada y dos rodillos deslizantes horizontales (A, B), asociados con las bisagras diagonales cilíndricas, colocadas en la parte inferior de la porción de la pared bajo análisis, al nivel de la grieta horizontal (ver Figura 3.2). Debido al desplazamiento hacia afuera de la bisagra central, los bordes A y B se ven obligados a moverse a lo largo de la horizontal. Para que se active, el mecanismo debe cumplir la condición de acuerdo con que la resistencia al desplazamiento hacia afuera, desarrollada por los bordes de la fachada, sea superada. Esta resistencia se ha asumido como la fuerza requerida para activar el deslizamiento de los bordes triangulares a lo largo de la capa horizontal inferior (Figura 3.2). Se asume que el espesor es constante a lo largo de la altura h_j y ese efecto de torsión de la fricción en las bisagras cilíndricas son insignificante.

Cada mecanismo puede involucrar cualquier cantidad de pisos, hasta la altura total, de ahí su formulación no asume una posición fija de la rótula plástica, pero se realiza para cada mecanismo una optimización a través de la minimización del factor de carga

asociado, por lo cual se adopta un enfoque de límite inferior (o límite estático) para calcular, para cada mecanismo, el factor de carga horizontal que originará el colapso. Ayala et al. (2003) denomina este factor con el símbolo landa “ λ ”:

$$\lambda = \frac{\Omega \delta x + C \delta y_1}{\Omega \delta y_2} \quad (3.1)$$

Donde Ω es el peso total de la porción de fachada, muros ortogonales y cargas vivas involucradas en el mecanismo, C es la resultante de la acción restrictiva causada por la fricción, y δx , δy_1 , δy_2 son las distancias del punto de aplicación de las fuerzas resultantes a la rótula plástica.

Las expresiones para calcular los factores landa “ λ ” que activan los diferentes tipos de mecanismos mencionados se muestran en la Tabla 3.1, mientras que los modelos adoptados para cada mecanismo con los parámetros geométricos pertinentes se mostraron en la Figura 3.1.

En las fórmulas, “ j ” es el número de pisos involucradas e “ i ” el nivel del piso en el cual la bisagra está posicionada; “ h_s ” es la altura de la historia que se supone constante para una determinada fachada; “ k ” es un parámetro que expresa la carga impuesta de techo y pisos en términos del peso propio de los muros; y “ r ” es el número de muros de mampostería dentro de la altura h_s .

Las ecuaciones en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2. Factores de carga que activan los mecanismos de colapso considerando el efecto de arco, según Ayala (2003) están escritas en un formato adimensional, usando el mismo simbolismo como la sección anterior y reducida a los parámetros geométricos esenciales.

Los factores de carga son una función de la esbeltez $T_{(h)} / H$ de las paredes, y de la acción de restricción debido a la fricción, a través de las dimensiones del muro que se analiza y el coeficiente de fricción con la superficie de apoyo. También se producirán diferentes comportamientos dependiendo de si las partes involucradas en los mecanismos son o no tienen paredes adyacentes.

Tabla 3.1. Ecuaciones para cálculo del factor de activación λ , para 5 mecanismos de colapso sin considerar el efecto de arco, según Ayala (2003)

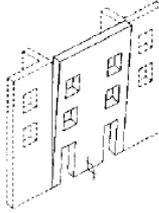
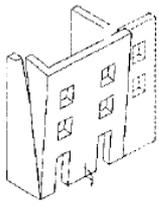
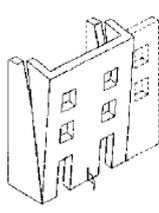
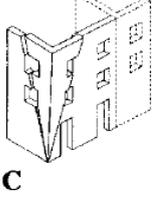
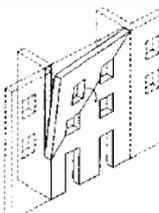
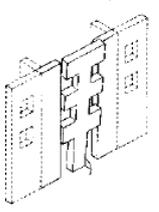
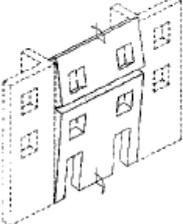
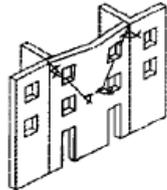
Mechanism	Load factor
 <p>A</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{T_i^2}{2} L + \beta \frac{h_s}{3} j^2 \mu s b \sum_{i=1}^j \frac{l}{r} + kL \left[\frac{T_N}{2} + \mu h_s j + \sum_{i=1}^j (T_i + \Delta T + \mu h_s (j-i)) \right]}{h_s \left[\sum_{i=1}^j LT_i \left(j-i + \frac{1}{2} \right) + kL \left(j + \sum_{i=1}^j (j-i) \right) \right]}$ <p>β is the number of internal bearing walls orthogonal to the façade, and effectively connected to it as to provide restraining action due to friction</p>
 <p>B1</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{T_i^2}{2} L + (\varepsilon + \beta) \frac{h_s}{2} j^2 \tan \alpha_j T_s \left(\frac{h_s}{3} \tan \alpha_j + T_i \right) + kL \left[\frac{T_N}{2} + \mu h_s j + \sum_{i=1}^j (T_i + \Delta T + \mu h_s (j-i)) \right]}{h_s \left[\sum_{i=1}^j LT_i \left(j-i + \frac{1}{2} \right) + (\varepsilon + \beta) \frac{h_s^2}{3} j^3 \tan \alpha_j + kL \left(j + \sum_{i=1}^j (j-i) \right) \right]}$ <p>ε is the number of edge party walls orthogonal to the façade under exam that can provide restraining action $\varepsilon = 1$ β as above T_i thickness of party walls and internal bearing walls</p>
 <p>B2</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{T_i^2}{2} L + (\varepsilon + \beta) \frac{h_s}{2} j^2 \tan \alpha_j T_s \left(\frac{h_s}{3} \tan \alpha_j + T_i \right) + kL \left[\frac{T_N}{2} + \mu h_s j + \sum_{i=1}^j (T_i + \Delta T + \mu h_s (j-i)) \right]}{h_s \left[\sum_{i=1}^j LT_i \left(j-i + \frac{1}{2} \right) + (\varepsilon + \beta) \frac{h_s^2}{3} j^3 \tan \alpha_j + kL \left(j + \sum_{i=1}^j (j-i) \right) \right]}$ <p>β as above ε as above $\varepsilon = 2$</p>
 <p>C</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\theta_{\beta} \left[\frac{T_N + T_j}{2} \frac{j^2}{2} + v k \sum_{i=0}^{j-1} (j-i) \right] \sqrt{\left(\frac{j h_h \theta_{\beta}}{3} \right)^2 + \left(\frac{T_j}{2} \right)^2} + \theta_{\mu} \left[\frac{T_N + T_j}{2} \frac{j^2}{2} + v k \sum_{i=0}^{j-1} (j-i) \right] \sqrt{\left(\frac{j h_h \theta_{\mu}}{3} \right)^2 + \left(\frac{T_j}{2} \right)^2}}{\frac{2}{3} j \left[j^2 \frac{T_N + T_j}{2} \frac{h_s}{2} (\theta_{\beta} + \theta_{\mu}) + k(v \theta_{\beta} + (1-v) \theta_{\mu}) \sum_{i=0}^{j-1} (j-i) \right]}$ <p>$\theta_{\beta} = \tan \alpha_{\beta}$ $\theta_{\mu} = \tan \alpha_{\mu}$ v integer identifies the load bearing wall $v = (0,1)$</p>
 <p>D</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\frac{T_{mj}}{2} \left[\frac{T_{mj}}{2} L_j + kL + k h_s \tan \alpha_j \sum_{i=1}^{j-1} (j-i) \right] + \left(1 + \sum_{\beta} \left(\frac{L_{\beta}}{L} \right)^2 \right) \frac{h_s}{3} j^2 \mu s b \sum_{i=1}^j \frac{l}{r} + \mu j k h_s \left[\frac{L}{2} + \frac{2}{3} h_s \tan \alpha_j \sum_{i=1}^{j-1} (j-i) \right]}{j \left[j \frac{L T_{mj}}{3} + kL \frac{h_s}{2} + \frac{2}{3} k h_s^2 \tan \alpha_j \sum_{i=1}^{j-1} (j-i) \right]}$ <p>β as above L_{β} width of facade in between party walls. T_{mj} average thickness of wall over height of overturning portion</p>
 <p>E</p>	$\lambda_{(0),j} = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{T_i^2}{2} L_{var} + [(v + \eta)(h_s - h_{op}) + \beta h_s] \frac{1}{3} j^2 \mu s b \sum_{i=1}^j \frac{l}{r} + kL_{var} \left[\frac{T_N}{2} + \mu h_s j + \sum_{i=1}^j (T_i + \Delta T + \mu h_s (j-i)) \right]}{h_s L_{var} \left[\sum_{i=1}^j T_i \left(j-i + \frac{1}{2} \right) + k \left(j + \sum_{i=1}^j (j-i) \right) \right]}$ <p>β as above ε as above $\varepsilon = (1,2)$ η is the number of vertical discontinuities within the façade noncoincident with the façade edges $\eta = (1,2)$ $v = \varepsilon - \eta$, integer $v = (0,1)$ provides the number of active side connections</p>

Tabla 3.2. Factores de carga que activan los mecanismos de colapso considerando el efecto de arco, según Ayala (2003)

Mechanism	Load factor
 <p>F</p>	$\lambda_{(v)} = \frac{\frac{T_u}{4}(T_u + T_i + k) + \frac{T_u v}{h_v} \left(\frac{T_u + T_i}{2} h_v + k h_i \right) + \frac{2sbh_v \mu (v-1)}{3lv^2} \left[\sum_{i=r_0}^r \frac{l}{r_i - r_0} + (v-1) \sum_{i=r_1}^r \frac{l}{r_2 - r_1} \right]}{\frac{h_v (v-1)}{4v^2} [T_u - T_i + v(T_u + T_i)] + \frac{k(v-1)}{v} [h_v + h_i - h_i]} + \frac{\frac{\sigma_c}{h_v 6\gamma} [T_u^2 + vT_i^2 + (v-1)T_i^2]}{\frac{h_v (v-1)}{4v^2} [T_u - T_i + v(T_u + T_i)] + \frac{k(v-1)}{v} [h_v + h_i - h_i]}$ <p>r_0, r_1, r_2, number of courses above upper hinge, middle hinge, lower hinge, respectively l/v real number (0,1) h_v, height of portion of wall subjected to mechanism</p>
 <p>G</p>	$\lambda_{\alpha,ht} = \frac{\mu \left[l_a \frac{T_u + T_i}{4} + \frac{kL}{2i} \right] \frac{l_a}{2} + \frac{(T_u + T_i)^2 (L - l_a)}{4} + sb(T_u + T_i) \sum_{i=1}^r \frac{l}{r} + s_{\beta} b_{\beta} l_{\alpha} \sum_{i_{\beta}=1}^{r_{\beta}} \frac{l_{\beta}}{r_{\beta}}}{\left[\frac{(l_a + L)(T_u + T_i)}{8} + \frac{kL}{2i} \right] \frac{5l_a^2 + 5Ll_a - L^2}{3(l_a + l)}}$ <p>$l_a = L - h, 2ig\alpha_i$, valid for $2l_a(l_a + L) > L^2$ The index β identifies quantities associated with internal bearing walls</p>

3.2 Método revisado en Restrepo (2004)

En su tesis se dedica al estudio del riesgo sísmico de edificios de mampostería no reforzada, siendo el principal objetivo de investigación, el diseño, desarrollo y aplicación de un nuevo procedimiento analítico de evaluación para este tipo de estructuras.

Se da una consideración especial al comportamiento estático y dinámico de mecanismos que se generan considerando la falla fuera del plano, además de la inclusión de mecanismos de falla en el plano, definiendo plenamente todos los componentes necesarios que intervienen para caracterizar el comportamiento de falla.

Para el desarrollo de la metodología propuesta se hizo una serie de pruebas a escala estática 1: 5 sobre modelos de mampostería no reforzada, a partir de las cuales se han propuesto un conjunto de ecuaciones analíticas para describir el comportamiento estático y dinámico de los mecanismos más comunes de falla fuera del plano. Con respecto a la variación de la respuesta estructural que demanda el desplazamiento conforme se analice diferentes puntos de la altura de la estructura, se lleva a cabo un análisis de las propuestas existentes, y se centra en las ecuaciones propuestas por Ayala y Speranza (2003). Estos ingredientes se incluyen en la formulación del nuevo procedimiento para la estimación

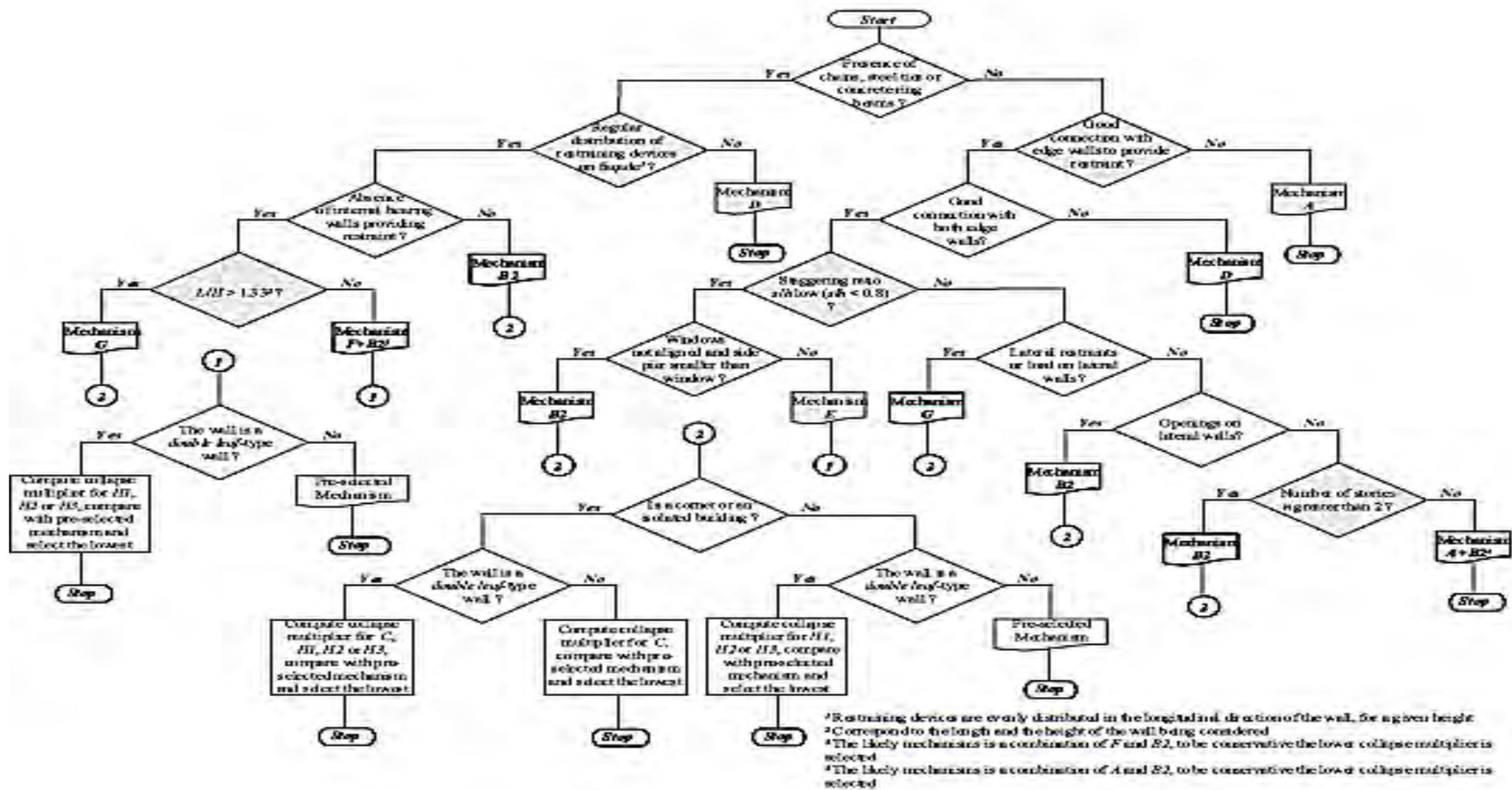


Figura 3.3. Diagrama de flujo para identificación de mecanismos posibles. (L. Restrepo; 2010)

del riesgo sísmico, en la que se incluye un enfoque totalmente probabilístico debido a las incertidumbres en la demanda del sismo, capacidad y respuesta estructural.

Según Restrepo (2004), el comportamiento fuera del plano rara vez ha sido el objetivo principal de estudios, y la mayoría de los resultados disponibles con respecto a este tipo han sido obtenidos como subproducto de otro tipo de ensayos. En las pocas ocasiones en que ha sido el centro de cualquier esfuerzo de investigación, las pruebas se han orientado a la fuerza de resistencia o multiplicador de colapso que originan los mecanismos.

Restrepo (2004) propone una nueva metodología para el análisis de mecanismos de colapso fuera del plano, a continuación se describe el procedimiento en 3 pasos resumidos:

- a) En primer lugar se debe reconocer los posibles mecanismos que se pueden activar. Para esto, Restrepo propone un diagrama de flujo, en el que de acuerdo a las características morfológicas, geométricas y ubicación del muro, se asigna un posible mecanismo de colapso. Se presente el diagrama de flujo en la figura 6.
- b) Una vez que se ha identificado los mecanismos que tienen probabilidad a ocurrir podemos usar las ecuaciones propuestas para cada una. Estas ecuaciones son derivadas de las ecuaciones propuestas por Ayala y Speranzaa, luego de los ensayos experimentales y análisis con las ecuaciones disponibles se reajustaron dichas expresiones para acercarse más a los resultados obtenidos en la experimentación con los modelos a escala reducida. Estas ecuaciones se presentan detalladamente más adelante.
- c) A partir de los resultados obtenidos, se realiza el análisis FORM que tiene como propósito aproximar, en el espacio estándar normalizado, el estado límite de una función “g”, que en este caso define el comportamiento del factor de activación de mecanismo, por medio de una función lineal tangente a la función “g”. El punto de intersección entre ambas será el que describa la falla más probable para el elemento en análisis.

En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo propuesto en su tesis.

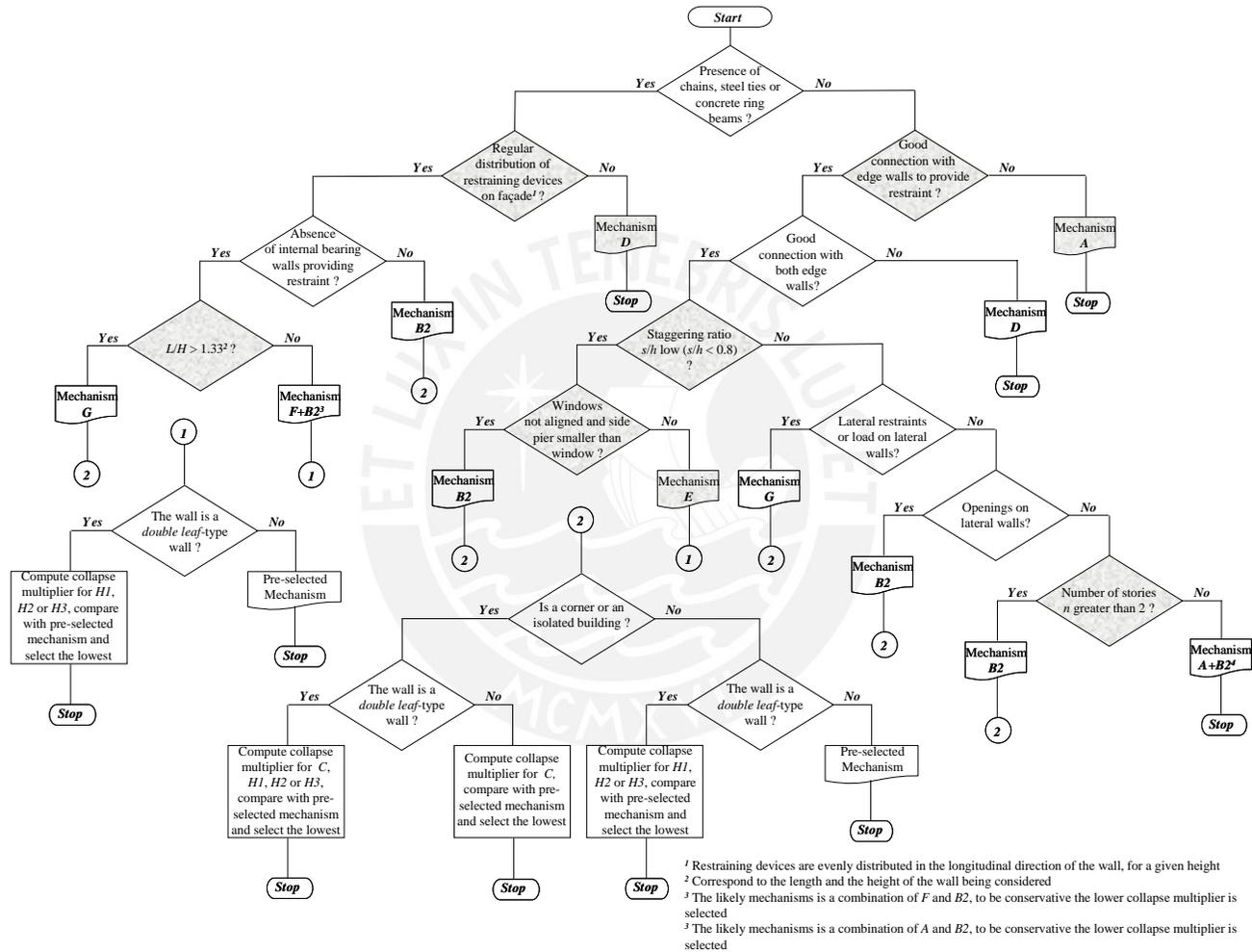


Figura 3.3. Diagrama de flujo para identificación de mecanismos posibles. (L. Restrepo 2010: 192)

A continuación se presenta los diferentes mecanismos de colapso y las ecuaciones, propuestas por L. Restrepo, para hallar el factor de activación respectivo:

Mecanismo A

Dado el Mecanismo A como se muestra en la Figura 3.4.a y 3.4.b, y recordando los resultados de las ecuaciones estudiadas en la metodología de Ayala y Esperanza, el multiplicador de colapso para estos mecanismos se calcula con la ecuación (3.2) :

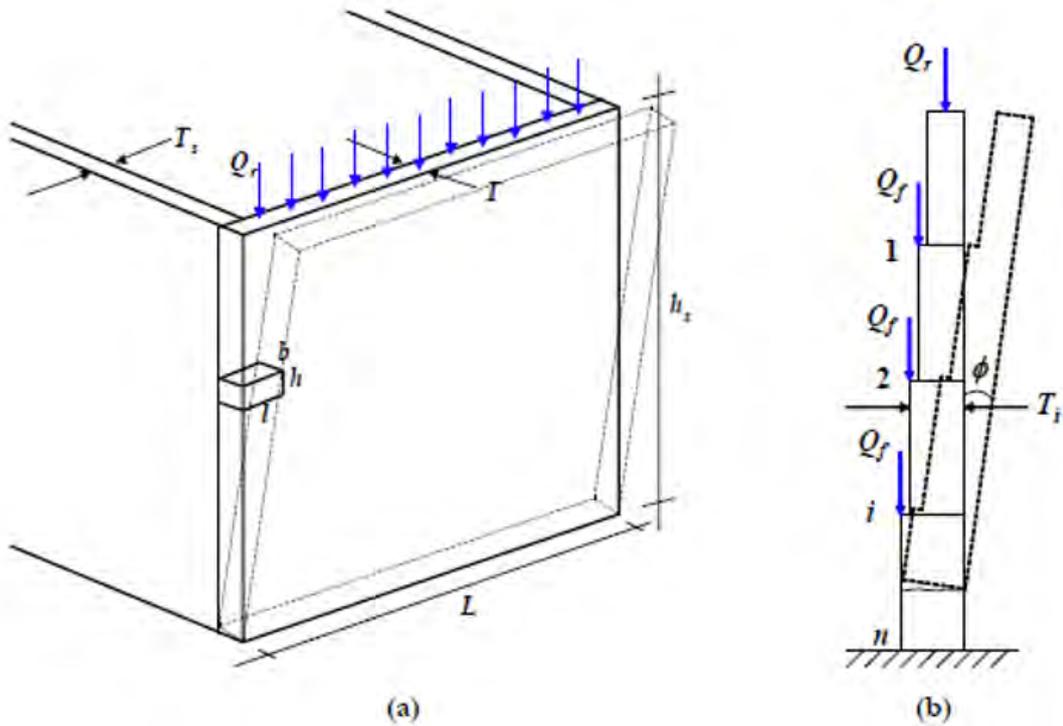


Figura 3.4. Mecanismo de colapso A. (Restrepo; 2004)

$$\lambda = \frac{\frac{T^2 L}{2} + \beta \Omega_{\text{pref}} \frac{h_s}{3} \mu s b \frac{(r+1)}{2} + \frac{K_r L T}{2}}{h_s \left(\frac{T L}{2} + K_r L \right)} \quad (3.2)$$

Ahora, generalizando la ecuación (3.2) para n número de historias o pisos y con el punto de pivote para el balanceo en cualquier nivel “i + 1” a lo largo de la altura, según la Figura 3.4(b), el multiplicador de colapso es ahora dada por la ecuación (3.3). En esta ecuación “r” es el número de cursos dentro del balanceo, “r_{hs}” es el número de cursos dentro de la altura del piso, n_s es el número de pisos completos en la parte oscilante dada por la ecuación (3.4) y d_s es el número de cursos en el piso incompleto calculado con la ecuación (3.5). El valor de “r” correcto es el que hace que el multiplicador de colapso λ sea el más pequeño.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \frac{T_i^2}{2} + \frac{d_s T_{n_s+1}^2}{2r_{h_s}} + K_r \frac{T_1}{2} + K_f \sum_{i=1}^{n_s} T_i + \frac{\beta \Omega_{pef} \mu T_s s h r (r^2 - 1)}{6r_{h_s} L}}{h \left\{ \sum_{i=1}^{n_s} T_i \left[r - \frac{r_{h_s}}{2} (2i - 1) \right] + \frac{d_s^2 T_{n_s+1}}{2r_{h_s}} + K_r r + K_f \sum_{i=1}^{n_s} (r - i r_{h_s}) \right\}} \quad (3.3)$$

$$n_s = \text{int} \left(\frac{r}{r_{h_s}} \right) \quad (3.4)$$

$$d_s = r - n_s r_{h_s} \quad (3.5)$$

En esta ecuación, la carga vertical procedente de las losas está representada por K, que es calculado con la ecuación (3.6), siendo r un subíndice que representa el techo, f un subíndice representando los niveles intermedios, m γ el peso específico de la mampostería y h_s el piso altura. Observe que K tiene unidades de longitud.

$$K = \frac{Q}{\gamma_m h r_{h_s}} \quad (3.6)$$

Mecanismos B1 y B2

La geometría para el mecanismo de fallo B se representa en la Figura 3.5(a), y la ecuación para calcular el multiplicador de colapso para un mecanismo de un piso se recuerda aquí como la ecuación (3.7). En esta ecuación, no hay parámetro K para explicar el efecto de la carga distribuida en el lado o las paredes delanteras. Esto se debe al hecho de que durante la fase experimental se comprobó que cuando la carga está aplicada sobre la pared frontal, el mecanismo tiende a ser del tipo A o F, para el caso en el que hay restricción al movimiento horizontal de las losas. Si la carga se aplica sobre las paredes laterales, el mecanismo tiende a ser del tipo G.

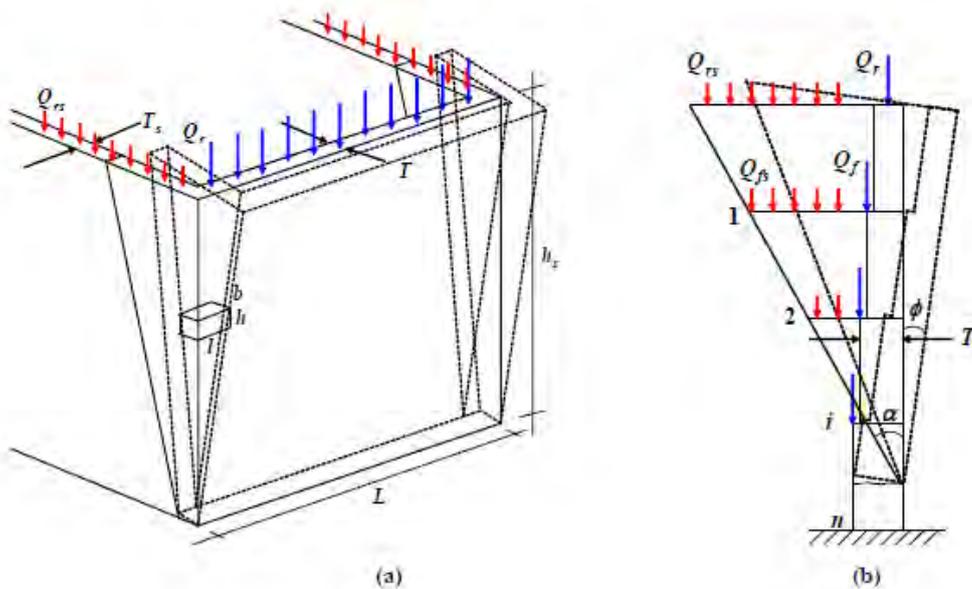


Figura 3.5. Mecanismo de colapso B1 y B2. (Restrepo; 2004)

$$\lambda = \frac{(\varepsilon + \beta)h_s^2 T_s + \frac{3LT^2}{\tan^2 \alpha}}{\frac{h_s}{\tan \alpha} \left[2h_s T_s (\varepsilon + \beta) + \frac{3LT}{\tan \alpha} \right]} \quad (3.7)$$

La extensión de la ecuación (3.7) a “n” número de historias y con el punto de pivote para oscilar en cualquier nivel “i + 1” a lo largo de la altura, según la Figura 3.5(b), está dado por la ecuación (3.8). En esta ecuación, β es el número de paredes laterales que participan en el mecanismo y “s” es un subíndice que indica las paredes laterales; n_s y d_s se calculan con las ecuaciones descritas en el mecanismo A. El valor “r” correcto es de nuevo el que hace que el multiplicador de colapso λ sea el menor.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \frac{T_i^2}{2} + \frac{d_s T_{n_s+1}^2}{2r_{h_s}} + \frac{\beta T_s h^2 \tan^2 \alpha}{2L} \sum_{i=1}^{n_s} \left[r - \frac{r_{h_s}}{2} (2i-1) \right]^2 + \frac{\beta h^2 d_s^3 T_s \tan^2 \alpha}{6Lr_{h_s}} + K_r \frac{T_1}{2} + K_f \sum_{i=1}^{n_s} T_i + \frac{\beta K_{rs} h^2 r^2 \tan^2 \alpha}{2L} + \beta K_{fs} \frac{h^2}{2L} \sum_{i=1}^{n_s} (r - ir_{h_s})^2 \tan^2 \alpha}{h \sum_{i=1}^{n_s} T_i \left[r - \frac{r_{h_s}}{2} (2i-1) \right] + \frac{hd_s^2 T_{n_s+1}}{2r_{h_s}} + \frac{\beta h^2 T_s \tan \alpha}{L} \sum_{i=1}^{n_s} \left[r - \frac{r_{h_s}}{2} (2i-1) \right]^2 + \frac{\beta h^2 d_s^3 T_s \tan \alpha}{3Lr_{h_s}} + K_r hr + K_f h \sum_{i=1}^{n_s} (r - ir_{h_s}) + \frac{\beta K_{rs} h^2 r^2 \tan \alpha}{L} + \beta K_{fs} \frac{h^2}{L} \tan \alpha \sum_{i=1}^{n_s} (r - ir_{h_s})^2} \quad (3.8)$$

Mecanismo C

El mecanismo C se representa en la Figura 3.6, y el multiplicador de colapso respectivo para este se recuerda aquí como la ecuación (3.9), que es un caso especial del Mecanismo D. La extensión de esta ecuación a n niveles está dada por la (3.10).

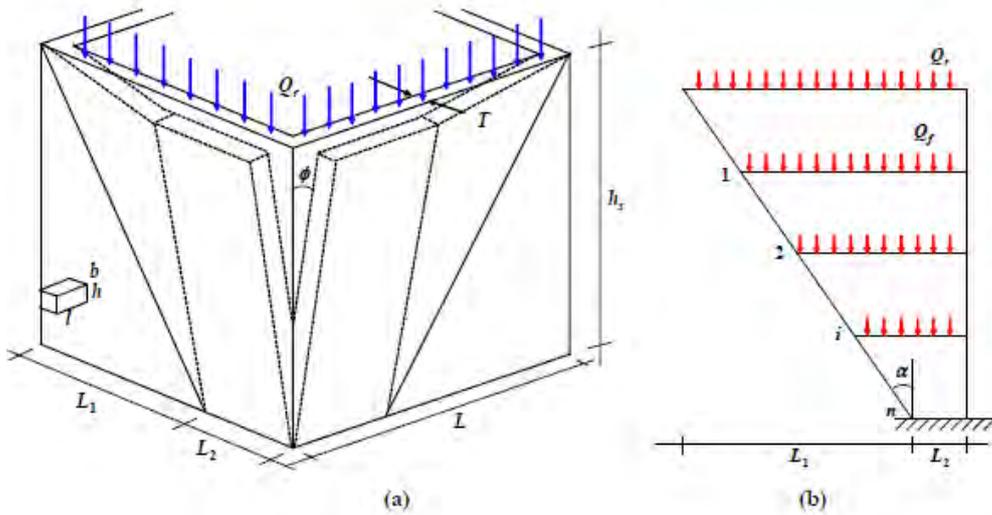


Figura 3.6. Mecanismo de colapso C. (Restrepo; 2004)

$$\lambda = \left({}^D\lambda \frac{L_1}{L} + {}^A\lambda_{(m_{h_s})} \frac{L_2}{L} \right) \frac{1}{\cos \frac{\pi}{4}} \quad (3.9)$$

$$\lambda = \frac{1}{\cos \frac{\pi}{4}} \left[\frac{3T}{2 \min\left(rh, \frac{Lh}{s}\right)} \frac{L - L_2}{L} + \frac{T}{rh} \frac{L_2}{L} \right] \quad (3.10)$$

Estos son 3 ejemplos de las fórmulas que se derivaron de las anteriores propuestas por Ayala et al (2003), mejorándolas gracias a procesos experimentales. Podemos distinguir que estas ecuaciones usan variables que corresponden a propiedades mecánicas del material usado en la EMNR. Estas propiedades se pueden obtener de estudios y ensayos experimentales, o los denominados ensayos no destructivos, que tienen un costo significativo.



3.3 Guía del código italiano para estructuras de mampostería no reforzadas

La norma técnica italiana propone una metodología bajo el enfoque de mecanismos de colapso para analizar edificaciones de mampostería no reforzada. Los procedimientos a realizar varían de acuerdo a los objetivos que se quieren alcanzar, para esto se han definidos distintos niveles de concientización:

LV1: En este nivel se hace un análisis cualitativo y evaluación con modelos simplificados. Generalmente los análisis de nivel de concientización LV1 se hacen para recaudar información a nivel territorial de estructuras históricas, con el fin de idear un plan de intervenciones tomando en cuenta el estado que presentan las estructuras y priorizar aquellas en las que sean necesarias acciones rápidas. Por otro lado también, este nivel permite verificar cuales son los mecanismos de colapso que tienen un índice de vulnerabilidad más elevado, es decir, que son más propensos a ocurrir.

LV2: Es necesario una evaluación de los macro nutrientes individuales con el objetivo de realizar restauraciones que afecta a partes individuales de la estructura histórica. Para este tipo de evaluación se deber tener en cuenta la presencia de estado de daños, previo a identificar los macro elementos y mecanismos de falla. El análisis cinemático, lineal y no lineal, es la herramienta más eficaz y simple para tal evaluación; pero los resultados pueden ser muy conservadores si no se consideran detalles de construcción, tales como: cadenas de sujeción entre paredes ortogonales, textura de los elementos, condiciones de restricción de los elementos a analizar, etc.

LV3: Esta es una evaluación global de la respuesta sísmica de la EMNR. Considera la seguridad sísmica del edificio como un todo; es decir, se busca la aceleración del suelo que conduce al estado de límite último en su conjunto o de sus elementos estructurales significativos. Este nivel se adopta para realizar el diseño de intervenciones que alteran el funcionamiento del edificio. Se podría utilizar los mismos métodos del LV2, pero sistemáticamente en cada elemento de la construcción.

De acuerdo a los objetivos planteados en esta investigación, lo que se busca es evaluar la seguridad sísmica de la catedral de Lima, por lo cual será necesario realizar un análisis de acuerdo al nivel LV2, no sin antes aplicar el procedimiento para un tipo de evaluación

LV1, ya que nos permite descartar mecanismos de colapso que posiblemente no se lleguen a activar y así no realizar el análisis cinemático de aquellos que sean muy poco probables de ocurrir.

3.3.1. Procedimiento para una evaluación de nivel de concientización 1 (LV1)

El código italiano para el patrimonio cultural, propone que el comportamiento sísmico de todo el edificio esté representado, sobre una base estadística, por un índice de vulnerabilidad (i_v), variable entre 0 y 1, que se define como un promedio ponderado del comportamiento de diferentes partes de la iglesia. Se presenta la ecuación (3.11) para hallar el índice de vulnerabilidad:

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (3.11)$$

Donde:

ρ_k : es el nivel de importancia del mecanismo, es decir, cuanto impactaría su activación en la respuesta sísmica del edificio. Es 0 para los mecanismos que no podrían haber sido activados en la iglesia, por la falta de macroelementos, mientras que es entre 0,5 y 1 en los demás casos.

V_{ki} y V_{kp} : son, respectivamente, la puntuación obtenida en la encuesta de indicadores de vulnerabilidad y salvaguardas sísmicos (Tabla 3.3), de acuerdo a la ficha de evaluación (Ver Figura 3.7).

La ficha de evaluación para hallar los valores de V_{ki} y V_{kp} consta de 28 mecanismos de colapso asociados con diferentes macro elementos que pueden estar presentes en una iglesia. Esta ficha nos conduce a realizar una evaluación cualitativa a criterio. Separa las características que ayudan a una mejor respuesta estructural con aquellas que elevan la vulnerabilidad de la estructura. Luego, califica el nivel de aporte de los ítems a la protección, como a la vulnerabilidad. En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo de la ficha de evaluación para el mecanismo 1:

FICHA DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD EN IGLESIAS

Proyecto: Evaluación de mecanismos de colapso generados por acciones sísmicas en la Catedral de Lima

MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres longitudinales
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación de la fachada.
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre la fachada y los muros laterales de la nave
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (apoyos, bóvedas, arcos)
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de aberturas en los muros laterales cerca de la esquina
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 3.7. Ficha de evaluación de vulnerabilidad en iglesias. (NTC Italiana; 2008)

Tabla 3.3. Tabla de puntuación de acuerdo a la ficha de evaluación para cada mecanismo. (NTC Italiana; 2008)

Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici	Giudizio dell'efficacia	V _k
almeno 1	3	3
almeno 2	2	
1	2	2
almeno 2	1	
1	1	1
Nessuno	0	0

La considerable cantidad de datos (más de 4.000 iglesias) ha permitido, a través del procesamiento estadístico, establecer una relación entre la acción sísmica y el daño, como función de un parámetro de la vulnerabilidad de la iglesia. Es obvio que la estimación realizada asume un significado puramente estadístico, pero este enfoque puede ser considerado correcto si se dirige a un análisis territorial.

La aceleración máxima del suelo correspondiente a los diferentes estados límite puede estar relacionado con el índice de vulnerabilidad logrado a través de una combinación adecuada de las puntuaciones asignadas a los diversos elementos de la vulnerabilidad y la protección sísmica. Ha sido posible definir una relación directa entre la demanda sísmica y la vulnerabilidad detectada. Esto le permite calcular, para cada iglesia, los valores de la aceleración en el suelo, que corresponde al estado de límite de daño (SLD) y el estado de límite de colapso (SLU). Se muestran las funciones de la correlación propuesta en las ecuaciones (3.12) y (3.13):

$$a_{SLD} = 0.025 \cdot 1.8^{2.75-3.44i_v} \quad (3.12)$$

$$a_{SLU} = 0.025 \cdot 1.8^{5.1-3.44i_v} \quad (3.13)$$

Los 28 mecanismos de colapso propuestos por el código italiano para evaluaciones de patrimonio cultural son:

1. Volteo de la fachada.
2. Falla en la cumbre de la fachada.
3. Mecanismo en el plano de la fachada.
4. Protiro – Nartece.
5. Respuesta transversal de la nave.
6. Mecanismo de corte en muros laterales.
7. Respuesta longitudinal del colonato.
8. Bóveda de la nave central.
9. Volteo de la nave central.
10. Volteo de muros del extremo del transepto.
11. Mecanismo de corte en los muros del transepto.
12. Bóveda del transepto.
13. Arco Triunfal.
14. Cúpula – tambor.
15. Linterna.
16. Volteo de ábside.
17. Mecanismo de corte en el presbiterio o en el ábside.
18. Bóveda del presbiterio o del ábside.
19. Mecanismos en los elementos de cubierta (paredes y habitaciones laterales).
20. Mec. en los elem. De cubierta – transepto.
21. Mec. en los elem. De cubierta – ábside y presbiterio.
22. Volteo de la capilla.
23. Mecanismos de corte en muros de la capilla.
24. Bóveda de a capilla.
25. Irregularidad en planta – altura.
26. Aggetti (navegación, guías, pináculos, estatuas).
27. Torre de campanario.
28. Campanario.

Se adjunta una representación gráfica de todos estos casos en el ANEXO 01

3.3.2. Procedimiento para una evaluación de nivel de concientización 2 (LV2)

Para interpretar mejor el comportamiento de las iglesias, se realiza un análisis cinemático de los mecanismos probables a activarse, para lo cual es necesario tener un conocimiento completo de la geometría del elemento a analizar, condiciones de borde y fuerzas actuantes. Una vez identificado todos los datos, se procede a hallar el factor de activación “ α_0 ” mediante el principio de trabajo virtual o volteo incipiente, para posteriormente obtener la aceleración espectral que activa el mecanismo mediante la ecuación (3.14) de acuerdo al código italiano.

$$\alpha_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* FC} = \frac{\alpha_0 g}{e^* FC} \quad (3.14)$$

Donde:

α_0 : Factor de activación del mecanismo de colapso

g: Gravedad

e^* : Factor de introducción de masa participante

FC: Factor de concientización

A continuación se definen los dos nuevos términos que se necesitan para la aplicación de la ecuación (3.14). El factor de introducción de masa participante (e^*) se deduce con la ecuación (3.15), y depende de la masa participativa (M^*) definida en la ecuación (3.16).

$$e^* = \frac{g M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} \quad (3.15)$$

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i})^2}{g \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} \quad (3.16)$$

Donde:

P_i : Fuerzas que actúan en el cuerpo que se analiza.

$\delta_{x,i}$: Desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza, en dirección de la misma.

g: Gravedad

Una vez concluido el análisis cinemático se procede a realizar la verificación lineal y no lineal con las fórmulas de restricción que propone la NTC 2008 de Italia para el análisis de estructuras de mampostería. A continuación se detalla el procedimiento de las verificaciones.

Verificación lineal:

De acuerdo con la NTC 2008, en la verificación lineal, la seguridad sísmica de los edificios necesita ser verificada tanto por un estado límite de daño (ecuación (3.18)) y un estado límite de seguridad de vida (ecuaciones (3.19) y (3.20)). Pero también podemos comparar la aceleración espectral que activa el mecanismo de colapso con la aceleración característica de la zona donde se ubica, como en la ecuación (3.17).

$$a_0^* \geq a_g(\text{limit state}) \quad (3.17)$$

- SLD: El estado límite de daños considera daños en la estructura, pero de tal forma en la que sea operativa, es decir, no se considera daños graves o fisuración en elementos estructurales y no estructurales. Tiene una resistencia a cargas verticales y horizontales operativas post sismo, es decir, que puede soportar su propio peso y algunas réplicas después del evento.

$$a_0^* \geq a_g(P_{V_R}) \cdot S \quad (3.18)$$

Donde:

S: es el multiplicador del suelo

P_{V_R} : probabilidad de observar una acción sísmica de período de retorno T_R durante un tiempo de referencia V_R

- SLV: El estado de límite de vida permite el fallo o rotura de elementos no estructurales, mientras que en los estructurales pueden observarse daños con la condición de que la resistencia vertical sea suficiente para aguantar el peso

del edificio. La resistencia a cargas laterales es segura para eventos sísmicos de magnitud baja.

La verificación de seguridad en términos de aceleración se define para dos diferentes casos de mecanismo relacionados con el nivel de elevación de la estructura donde se forma la bisagra: a nivel del suelo que se denota como 'mecanismo global', y en un nivel superior de la estructura se denota como 'mecanismo local'. Los dos casos requieren la verificación de las ecuaciones (3.19) y (3.20), respectivamente, (las expresiones a la derecha son equivalentes para el cálculo de la aceleración espectral de demanda de acuerdo con el código de diseño sísmico peruano).

$$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR})S}{q} \equiv \frac{Z}{q} \cdot S \cdot g \quad (3.19)$$

$$a_0^* \geq \frac{S_e(T_1)\psi(z)\gamma}{q} \equiv \frac{Z}{q} \cdot \min\left(2.5 \frac{T_p}{T_1}, 2.5\right) \cdot S \cdot g \cdot \psi(z) \cdot \gamma \quad (3.20)$$

Donde según el código de construcción italiano, a_g (PVR) es la aceleración pico del suelo en el sitio, que se define como una función de su probabilidad de superación en un período de referencia dado, para nuestra evaluación será de 450 años; S es el factor de amplificación del suelo; y q es el factor de reducción (el código italiano recomienda que “q” sea 2 en la verificación lineal, luego de haber realizado análisis e investigaciones sobre la ductilidad de la mampostería no reforzada). En el código de construcción italiano, S_e (T_1) es la aceleración espectral elástico evaluada para el período de vibración fundamental de la estructura, T_1 ; $\psi(z)$ es el primer modo de vibración normalizado de estructura, que se puede aproximar como la relación entre la elevación de la bisagra y la altura total de la estructura, z/H ; y γ es el factor de participación modal, que se puede aproximar en función del número de niveles de la estructura, N, como $3N/(2N + 1)$.

Para las expresiones equivalentes, usando la norma técnica sismo resistente E030 de Perú, Z es el coeficiente de zonificación; S es el factor de suelo, T_p es el período correspondiente al final de la meseta del espectro aceleración de la norma; y T_1 es el período de vibración fundamental de la estructura.

Verificación no lineal:

Para evaluar el comportamiento estructural del macro elemento también en el campo no lineal, el código italiano propone una verificación con respecto a los desplazamientos últimos espectrales del elemento en análisis con el del espectro de demanda propuesto en la norma vigente.

El espectro de capacidad del elemento ha sido simplificado a una función lineal como se ilustra en la Figura 3.8(a) y en la Figura 3.8 (b) se le añadió el espectro de capacidad de la norma. El desplazamiento último real se le denomina d_u^* , y es el 40% del desplazamiento máximo espectral d_o^* , ya que se considera algunas características del material que se explican más adelante.

En la verificación no lineal, d_u^* se compara con la demanda de desplazamiento espectral d_s^* , que se calcula en función de un período secante T_s definido para el sistema SDOF como se ilustra en Figura 3.8(a). En esta verificación también se consideran casos de mecanismos globales y locales, requiriendo la verificación de las ecuaciones (3.21) y (3.22) respectivamente. En caso de mecanismos globales, d_s^* se obtiene al interceptar el espectro de demanda con T_s .

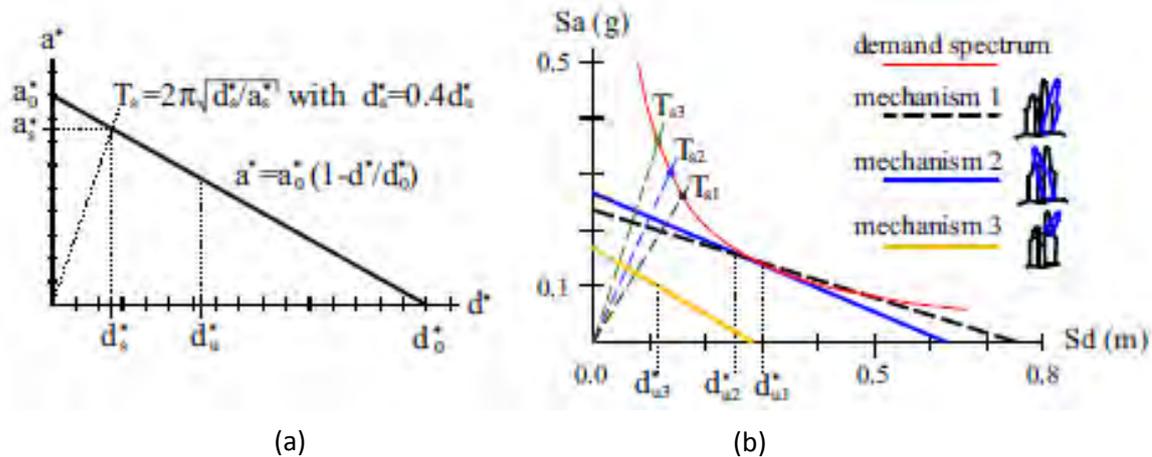


Figura 3.8. (a) Espectro de la norma y estructura en análisis (Aguilar; 2015)

$$d_u^* \geq S_{De}(T_s) = \frac{T_s^2}{4\pi^2} S_e(T_s) \quad (3.21)$$

$$d_u^* \geq S_{De}(T_1)\psi(z)\gamma \frac{\left[\frac{T_s}{T_1}\right]^2}{\sqrt{\left[1 - \frac{T_s}{T_1}\right]^2 + 0.02 \frac{T_s}{T_1}}} \quad (3.22)$$

Donde $S_{De}(T_s)$ es el desplazamiento espectral elástico evaluado para el periodo secante T_s . $S_{De}(T_1)$ es el desplazamiento espectral elástico evaluado para el periodo fundamental, T_1 . Los demás factores ya se han descrito en la verificación lineal.

Gráficamente se puede realizar la comprobación para los mecanismos globales como en la Figura 3.9, que es el espectro de capacidad propuesto por la norma (color rojo) y el espectro de capacidad de la estructura (color negro):

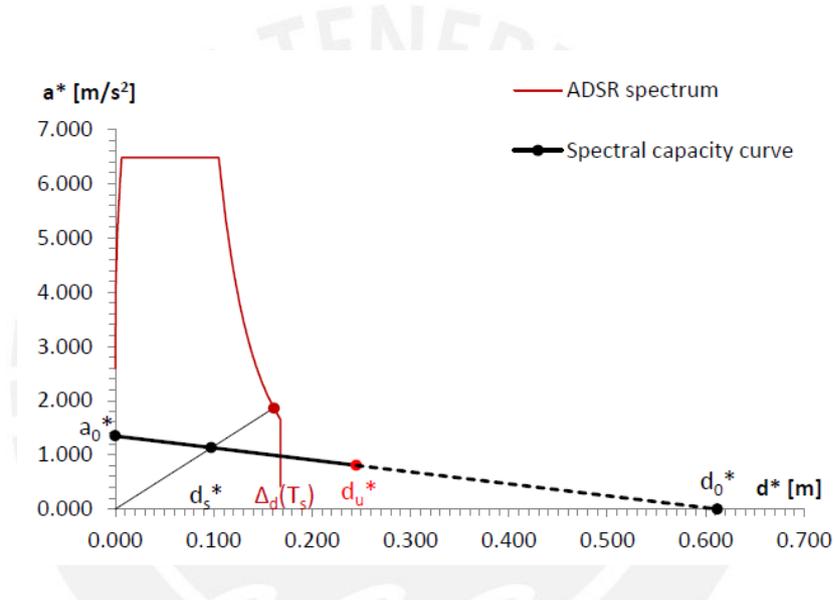


Figura 3.9. Espectros de capacidad de la norma y la estructura (Lorenzo; s/f)

Alternativamente a la construcción de la curva de capacidad con la simplificación del código italiano; Criber et al. (2015) usó para el análisis de la iglesia Santa Gemma, unas curvas de capacidad que representan la aceleración espectral de un sistema SDOF equivalente, en función del desplazamiento. Estos han sido delineados al detectar cuatro puntos correspondientes a cuatro niveles de rendimiento: etapa elástica (ELS), inicio de daño (Damage), cerca del colapso (NCLS) y colapso (CLS) (ver Figura 3.10).

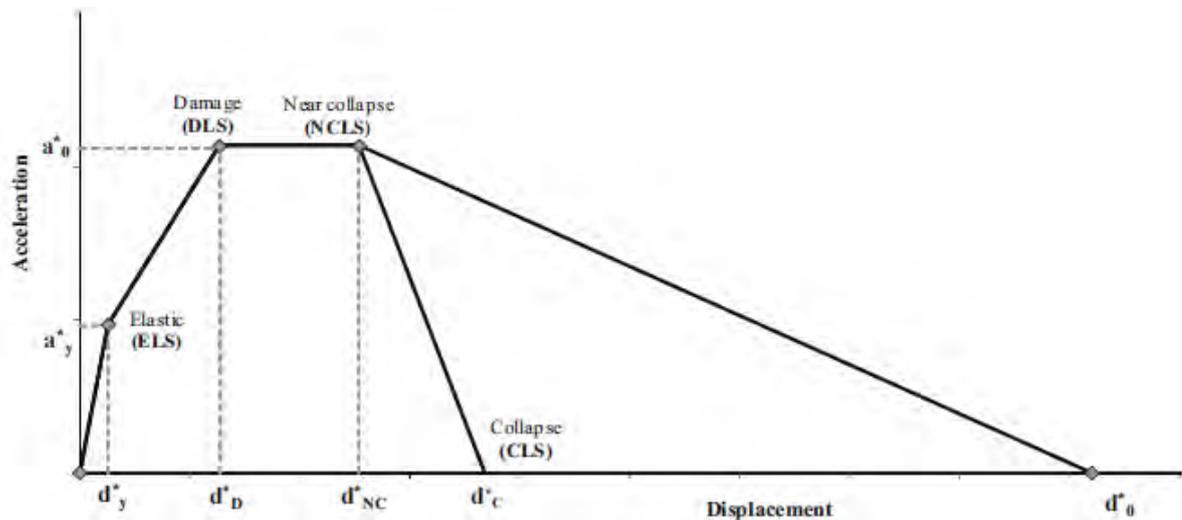


Figura 3.10. Puntos notables de espectro de capacidad (Criber, 2015)

Según Criber et al. (2015), en una primera fase, el último desplazamiento, “ d_k ”, del centro de masas del macro elemento en análisis, se obtiene cuando el valor de la fuerza lateral llega a ser nulo, es decir α_0 igual a 0. Esto permitió simular una situación de colapso incipiente. Posteriormente, el desplazamiento lateral correspondiente del sistema SDOF equivalente, “ d^*_0 ”, ha sido evaluado de acuerdo con la ecuación (3.23), donde los desplazamientos virtuales usados logran las cadenas cinemáticas descritas en la sección anterior.

$$d^*_0 = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{xi}^2}{\delta_{xk} \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{xi}} \quad (3.23)$$

Según Criber et al. (2015), estudios experimentales llevados a cabo en el pasado sobre muros de mampostería no reforzados, resaltaron que el desplazamiento final d^*_0 no es confiable al describir el comportamiento real del elemento. Esta divergencia se debe al desarrollo de grietas en el punto de pivote, con las consecuentes fracturas en las juntas de mortero. Por lo tanto, el desplazamiento último real del sistema de un grado de libertad generalmente se evalúa como la siguiente expresión: “ $d^*_c = 40\%(d^*_0)$ ” (p.15).

De acuerdo con D'Ayala (2005), d^*_{NC} es el desplazamiento correspondiente a la consecución de un estado límite cerca del colapso, relacionado con la aceleración que provoca la activación del mecanismo. Se ha evaluado de forma convencional por la hipótesis de que se consigue esta condición cuando la parte superior de la pared se mueve un tercio del espesor del macro elemento. Para su cálculo se usará la ecuación (3.24).

$$d_{NC}^* = \frac{s_i \cdot h_{bar}}{3 \cdot h_i} \quad (3.24)$$

Donde s_i es el espesor de la pared, h_{bar} y h_i son las alturas del centro de masas y del macro elemento involucrado en el mecanismo, respectivamente. Ambos de estos se han calculado a partir de la posición del punto de pivote.

El desplazamiento en el Estado Límite de Daño (DLS) ha sido evaluado suponiendo una evolución plástica sin endurecimiento caracterizada por el factor de ductilidad $q = 2$. El desplazamiento por lo tanto será:

$$d_{DL}^* = \frac{d_{NC}^*}{q} \quad (3.25)$$

Para el estado límite elástico, la aceleración a_y^* y el desplazamiento d_y^* se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$a_y^* = \frac{s_i}{6 \cdot h_{bar} \cdot e^*} \quad (3.26)$$

$$d_y^* = a_y^* \frac{T_a^2}{4\pi^2} \quad (3.27)$$

Donde T_a es el periodo fundamental.

3.4 Selección de metodología a aplicar

Según Peña (2010), para la selección de la metodología a usar, tenemos que evaluar los siguientes puntos:

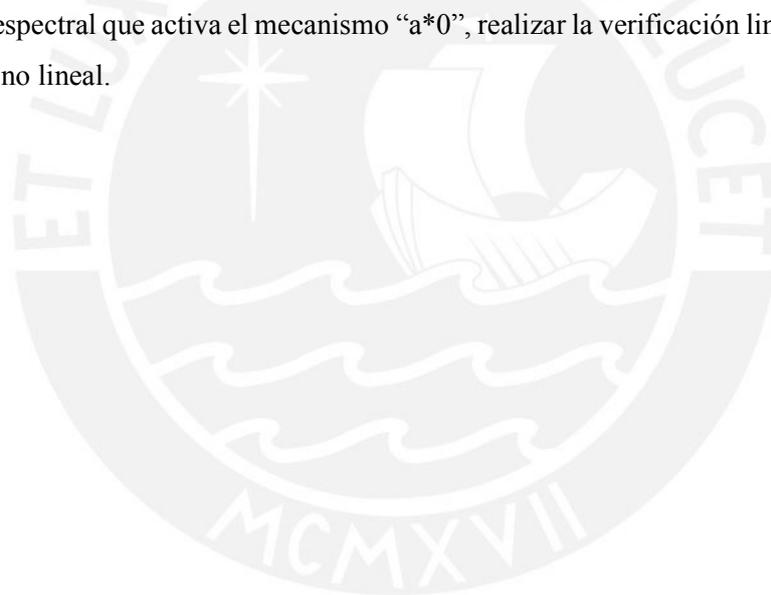
- **Información disponible.** Es necesario que los datos que se dispongan de la estructura, así como de las sollicitaciones actuantes, sean suficientes para poder definir el modelo de análisis. La falta de información se podría suplir con datos obtenidos de la literatura o tomando valores nominales. Sin embargo, esto involucraría incertidumbres adicionales a la metodología que se escoja.
- **Resultados esperados.** Los resultados que se puedan obtener del método de análisis deben proporcionar el objetivo definido al principio de esta investigación. Algunas veces, las limitaciones intrínsecas de la herramienta de análisis no permiten obtener la información necesaria. Por ejemplo, un análisis límite no permite conocer las deformaciones de la estructura.
- **Disponibilidad y Compatibilidad.** Obviamente la herramienta de análisis debe ser de fácil acceso y manejo (disponibilidad) análisis. Así mismo, es de vital importancia tener el conocimiento suficiente de la teoría en que está basado el método de análisis (compatibilidad) para poder hacer un correcto análisis e interpretación de los resultados.
- **Costos.** Se debe de tomar en cuenta que los recursos disponibles estén de acuerdo con los requeridos por la herramienta de análisis. Los recursos son tanto financieros, como de capacidad de cálculo (cómputo), tiempo disponible para el análisis e interpretación de resultados, entre otros.
- **Idealización.** Todo modelo analítico se basa en la idealización de la realidad, por lo tanto, es necesario que sea lo más apropiada posible. En general se hace una idealización de los elementos estructurales, el comportamiento y características del material, las sollicitaciones validadas con el fin de asegurarse de que la idealización sea correcta.

Tomando en cuenta todos los aspectos anteriores, la guía del código italiano es la más adecuada. En primer lugar, la información disponible sobre la catedral de Lima es suficiente para usar este método (planos arquitectónicos, condiciones de contorno y acceso a la edificación para inspecciones visuales). Este método ya ha sido usado en evaluaciones a iglesias europeas, como por ejemplo, en la iglesia de Santa Gemma por Criber (2015), obteniendo resultados que le permitieron interpretar los daños causados por el terremoto de L'Aquila en el 2009. Por lo tanto, se ajusta a la realidad y a los objetivos propuestos. Por otro lado, al ser un método que se basa principalmente en la geometría de los macro elementos no implica un costo económico; a comparación de los otros métodos explicados, en los cuales se necesita realizar ensayos in situ o

en laboratorio con el fin de obtener algunas propiedades mecánicas del material, ya que son requisitos para el uso de las fórmulas propuestas.

Por ser una guía de evaluación para EMNR situados en otro país con diferentes zonas sísmicas, no podemos usar algunas ecuaciones propuestas como las (3.12) y (3.13), que son fórmulas exponenciales que permiten hallar la aceleración del estado límite dependiendo del índice de vulnerabilidad; en primer lugar es necesario una investigación orientada al entendimiento y deducción de esas ecuaciones, ya que Italia presenta parámetros sísmicos distintos a Perú.

La metodología escogida constará de los procedimientos descritos por el Nivel 1 y Nivel 2 de concientización para obtener resultados preliminares sobre la seguridad sísmica de la catedral de Lima. En primer lugar se hará una evaluación cualitativa, en la cual se identificará los mecanismos que son más propensos a ocurrir, es decir, que aportan más al “iv” del edificio. Luego se procederá a realizar un análisis cinemático, que implica calcular el factor de activación del mecanismo “ α ”, la aceleración espectral que activa el mecanismo “ a_0 ”, realizar la verificación lineal y finalmente la verificación no lineal.



4. CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DE LA CATEDRAL DE LIMA

4.1 Tipos de intervención durante su historia

La estructura de la catedral ha sufrido el embate de fuertes sismos, que han definido los cambios en lo que a su configuración estructural y los materiales usados para su construcción se refieren. La estructura original de la catedral fue proyectada por el Arquitecto Francisco de B Herrera. En la Figura 4.1 se observa estructura original y la actual.

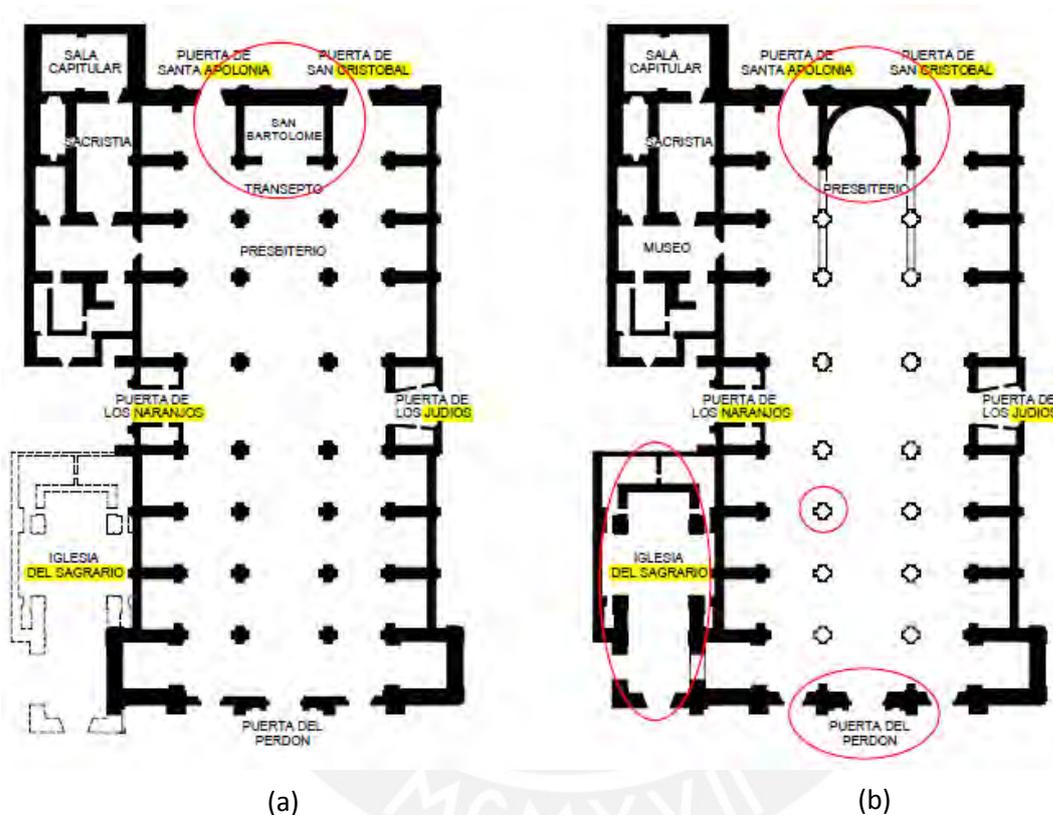


Figura 4.1. Planta de la estructura de la catedral. (a) Plata original. (b) Planta 2005. (Adaptado del CISMID, 2005)

Esta edificación era de concepción renacentista en su estilo. La cimentación estaba hecha de grandes bloques de piedra. La fábrica de la catedral estaba conformada por muros de gran espesor y pilares de albañilería, sobre los cuales se apoyaban arcos aovados, de ladrillo y cal, que soportaban el peso de las bóvedas de arista del mismo material. La altura promedio de los techos era de 21m.

Fue el sismo del 19 de octubre de 1609 el que, por los daños ocasionados en la estructura, obligó a revisar los procedimientos constructivos y arquitectónicos empleados durante esta primera etapa en lo que a la configuración estructural se refiere. Hasta esa fecha solo estaba construido el muro

testero y las cuatro primeras naves transversales contadas a partir de la Puerta del Perdón. (Ver Figura 4.1 (b)). Después del sismo de 1609, en todos los pareceres y en los acuerdos de los cabildos y del real acuerdo de la época, se encuentra la propuesta de bajar la altura de las bóvedas nuevas con relación a las que había construido Becerra.

Estas modificaciones fueron llevadas a cabo por el maestro mayor Martines de Arona y marcan una segunda etapa en la configuración estructural de la catedral. Estos cambios incluyeron la homologación de la altura de las bóvedas en las tres naves abiertas, dejando túneles transversales y horizontales en cuadro cubiertos a nivel homogéneo, entre los 17m y 18m en promedio, como si se tratara de corredores de algún claustro con bóvedas de arista, y cruzados a modo de tablero de ajedrez. Se redujo la altura de las bóvedas sin variar el nivel de los pilares de ladrillo y cal existentes. Estas nuevas bóvedas eran de un estilo arquitectónico gótico-isabelino, hechas a base de cal y ladrillo y aunque eran llamadas bóvedas de crucería, por los detalles dibujados en ella a manera de crucetas y formas arabescas, el peso de éstas descansaba directamente sobre los arcos. Los arcos pasaron a ser de medio punto y construidos del mismo material que las bóvedas. Las modificaciones en la reconstrucción y la culminación de la construcción de la catedral incluyendo las torres duraron aproximadamente hasta el año 1626. (Ver Figura 4.2 (b)).

A raíz del sismo del 17 de Junio de 1678, en la que los daños solo se manifestaron en forma de agrietamientos en las bóvedas, se amplió el espesor de los muros en los estribos laterales o contrafuertes y se colocaron arbotantes sobre ellos con lo que restringía en parte el libre movimiento de las bóvedas. (Ver Figura 4.2 (c)).

El sismo del 28 de octubre de 1746 marcó una tercera etapa en lo que a la configuración estructural de la catedral se refiere (Ver Figura 4.2 (d)). El proyecto de reconstrucción se hizo según los planos del arquitecto Padre Juan Rher y bajo el mando del alarife Santiago Rosales, que era el titular de la fábrica exterior e interior de esta iglesia. Este proyecto suprimió las pesadas bóvedas de mampostería y las reemplazó por otras de madera y cobertura interior de caña y yeso, las que eran llamadas artesonadas ya que desde su interior se colgaban molduras postizas de variadas maderas, las que se enlazaban unas con otras y formaban las figuras de los artesones. La reforma de las bóvedas de la catedral consistió en el cambio de todas las bóvedas de las tres naves principales abiertas y las del crucero central (26 en total). También se cambiaron las gruesas pilastras o pilares de mampostería, que sustentaban las antiguas bóvedas por otras más ligeras compuestas por 8 columnas de madera las que se apoyaban sobre sendas bases de piedra, estos pilares actualmente tienen un recubrimiento de caña y yeso. Se reconstruyeron las torres según el diseño del arquitecto Ignacio Martorell. La basa o base de las torres era de sección cuadrada de ladrillo y cal, habiéndose recortado en chaflán el espacio de las esquinas comprendido entre los

ejes de soportes. En el segundo cuerpo de las torres, correspondientes a los campanarios, los soportes de las pilastras o columnas son lisas, de capitel corintio. En lo alto de éstas, el capitel piramidal de madera es de configuración curvilínea cóncava. Se ensanchó la fachada principal del muro testero asegurando este ensanchamiento con la portada principal a través de gruesos pernos.

Hacia los años entre 1890 y 1898, debido a su lamentable estado de conservación, fue necesario demoler por completo las bóvedas artesonadas levantadas en el período de 1751-1758. Este cambio fue motivado por la descomposición interna de las bóvedas a causa de la humedad, la oxidación y la polilla. Esta vez la reconstrucción no se debía a la estabilidad sísmica. Las nuevas bóvedas nervadas de crucería fueron construidas por el ingeniero E. Castañón y el arquitecto José E. Canecas Riera. Estas bóvedas eran de estilo Neo-gótico y estaban hechas a base de nervaduras de madera que dibujan cruces de malta y similares visibles en el intradós. Tenían una cobertura compuesta por tablas de cedro sobre la cual se colocaba una torta de caña-yeso y barro. Las bóvedas son llamadas de crucería ya que casi todo el peso de estas descansa sobre los pilares de madera ubicados en las esquinas y en menor proporción sobre los arcos de madera de medio punto. Ver Figura 4.2 (d). En la Figura 4.2 (e) se ve el sistema estructural actual, en el cual se han eliminado los arbotantes del sistema anterior, permanecieron los pilares y techos de madera internos, y los muros de albañilería en el perímetro.

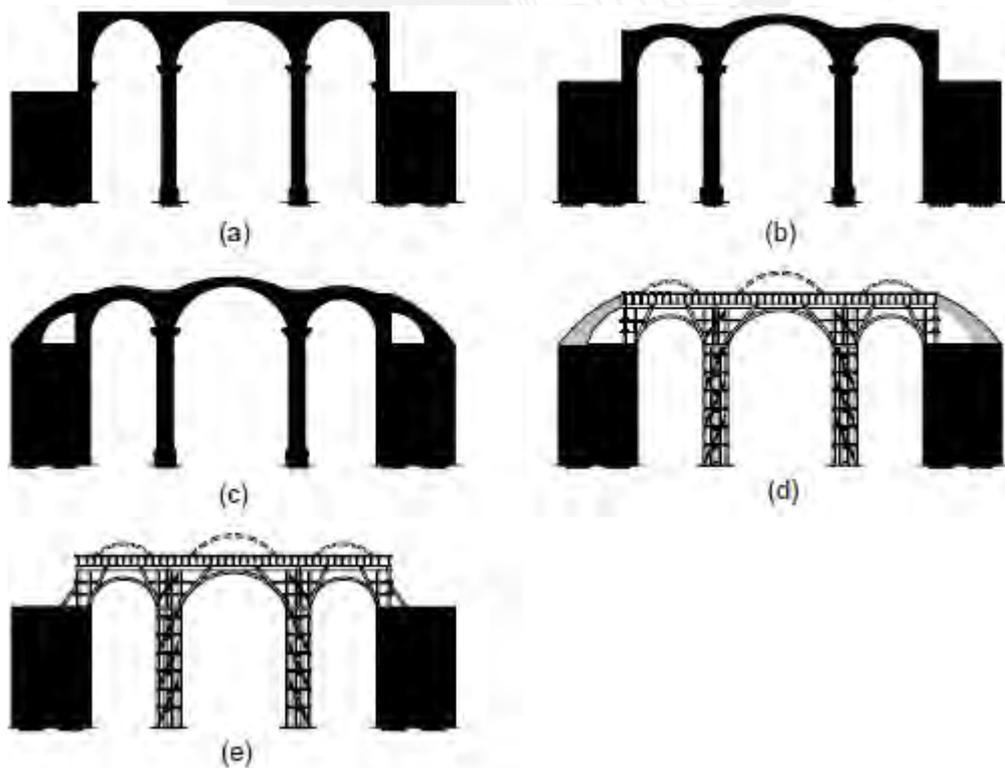


Figura 4.2. Concepción estructural de la catedral de Lima. CISMID (2005)

En la Figura 4.3 se observan vistas aéreas de la plaza Mayor de Lima; se pueden apreciar en ellas los arbotantes a los lados de la catedral. Dado a que en la foto de la derecha aparece el Palacio de Gobierno remodelado, podemos suponer que estas fotos fueron tomadas después de 1920, año en el que se realizaron los cambios en este edificio.



Figura 4.3. Vistas aéreas de la Plaza Mayor de Lima después de 1920. Adaptado del CISMID (2005)

En la bibliografía revisada y de acuerdo a la visita realizada a la catedral de Lima, no se reportan nuevos cambios en la estructura a partir de la graficada en la Figura 4.2 (e).

4.2 Descripción de la estructura en la actualidad

De acuerdo al CISMID (2005), la Catedral de Lima está desplantada sobre un área de 5020 m². Tiene forma de cruz en planta. Está compuesta por 3 naves centrales con alturas que alcanzan hasta los 21m y 2 naves laterales de 11m de alto en promedio. Las dos torres están ubicadas en la parte testera o delantera del edificio, a ambos lados de la Puerta del Perdón. Adosadas al edificio de la catedral, del lado de la Puerta de los Naranjos, se encuentra la Iglesia del Sagrario hacia la parte testera del edificio, con 400 m² de área en planta, mientras que en la parte posterior se encuentra la estructura correspondiente al museo de sitio y Sacristía con un área en planta de 932 m². Estas edificaciones comparten muros divisorios con la catedral.

Estructuralmente está compuesta por 16 pilares centrales de madera así como también por muros de albañilería longitudinales paralelos a la calle de Los Judíos (dirección Y) y muros transversales a modo de contrafuertes o estribos (dirección X), sobre los cuales descansa la estructura del techo propiamente dicho. Los pilares de madera, cada uno con un área en planta de 5.50 m², están compuestos por 8 columnas de madera, cada una con elementos de confinamiento y cobertura

exterior. Tienen 13 m de altura aproximadamente. Los muros de mampostería de ladrillo y cal son de gran espesor, el cual varía entre 1.20 m y 2.40 m. Se aprecian contrafuertes bien equilibrados en los muros de las capillas laterales. Todos los muros tienen 13m de altura. El techo superior de la catedral, correspondiente a las 3 naves centrales y las del crucero, está compuesto por 26 bóvedas nervadas con cobertura de madera y un entramado horizontal, también de madera, el cual sirve de apoyo a la cobertura y por el que se accede a la parte superior de la edificación. Las 14 bóvedas laterales correspondientes a las capillas, así como las 2 bóvedas ubicadas junto al muro posterior y a los lados de la nave central son en su mayoría de ladrillo y cal. Los arcos de madera son de medio punto y descansan directamente sobre los pilares y muros. La catedral tiene 2 torres delanteras de 100 m² de área aproximadamente cada una, son estructuras de albañilería con espesor de muro de 2.40 m. La altura de las torres es del orden de 45m. A continuación en la se muestra la planta baja de la edificación:



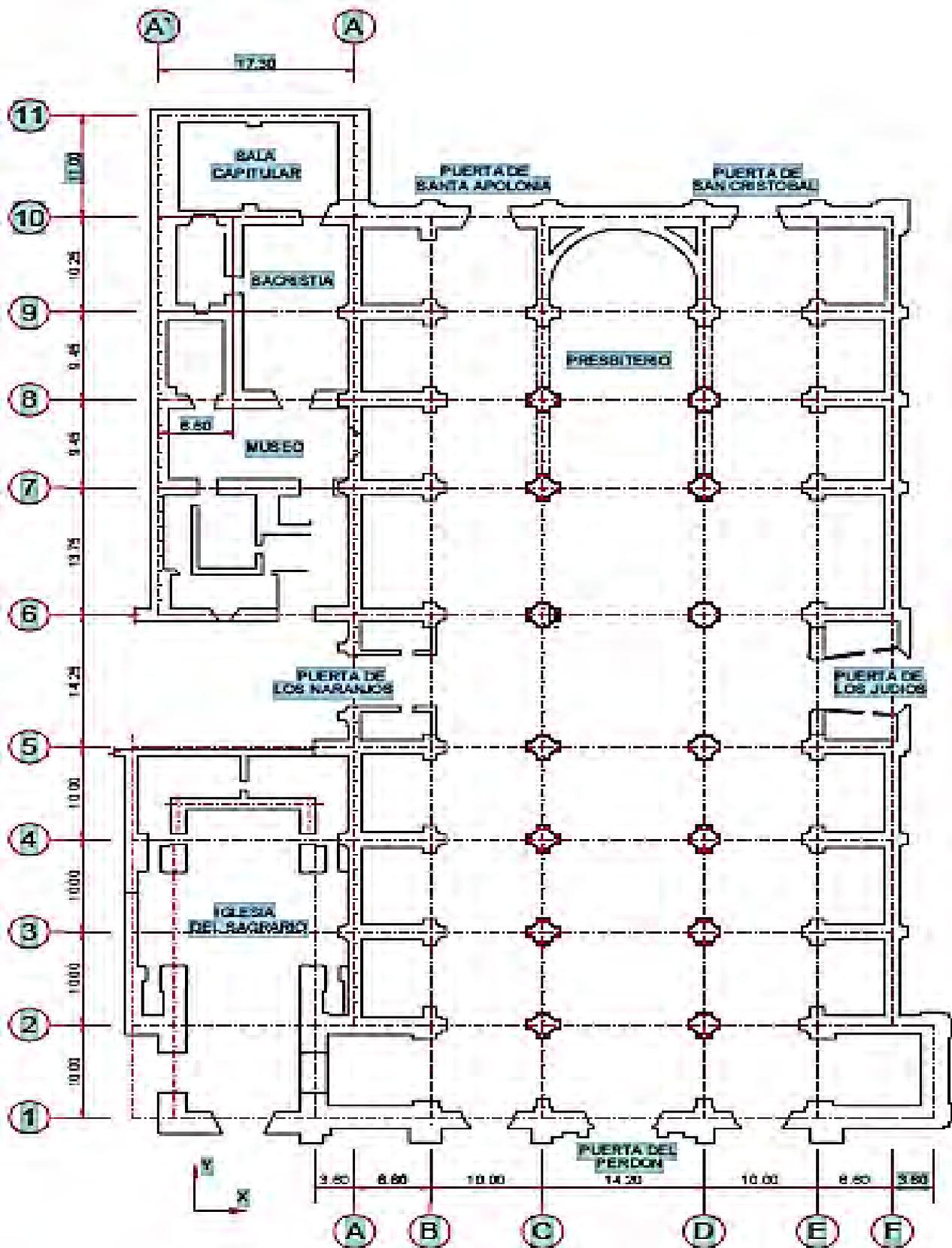


Figura 4.4. Planta de la estructura de la catedral de Lima. CISMID (2005)

La techumbre de la catedral se descompone en una exterior horizontal y otra interior compuesta por bóvedas que se intersecan originando aberturas circulares sobre el techo horizontal. Ambas estructuras en el interior descansan directamente sobre los pilares y en el exterior sobre los muros de albañilería. El techo horizontal exterior está compuesto por un sistema de vigas de 4"x6" paralelas a la dirección Y y espaciadas entre sí a 0.80 m, sobre el cual descansa un piso de madera en forma de machihembrado de ¾" de espesor con una capa de torta de barro de 10 cm y con ladrillo pastelero en la parte superior. Estas vigas de 4"x6" descansan sobre vigas principales de sección 10"x10" a través de unos elementos verticales de madera de sección cuadrada de 4"x4". Este techo horizontal descansa al centro sobre los pilares de madera y en los extremos en los muros de albañilería (ver Figura 4.5). Esto lo hace a través de elementos de madera (soportes verticales de sección 11"x11" e inclinados de sección 10"x10"). Existen elementos de arriostre horizontales que unen los elementos de soporte vertical e inclinado y también un arriostre diagonal que une los elementos de soporte vertical.

Los Pilares de madera están compuestos por 8 columnas de madera de sección cuadrada de 12"x12" y de 13m de largo aproximadamente. Estos elementos están apenas apoyados sobre los cimientos o en algunos casos tienen un pequeño empotramiento que no llega a 10 cm. Existen elementos de arriostre horizontales, que confinan la sección compuesta uniendo las columnas de madera contiguas y opuestas entre sí, de secciones de 10"x6" y 5"x8" respectivamente y colocadas en la altura con un espaciamiento aproximado de 1.90 m. También existen elementos de arriostre diagonal colocados en forma de cruceta en cada dirección uniendo las columnas de madera opuestas dentro de la sección del pilar. (Ver Figura 4.6)

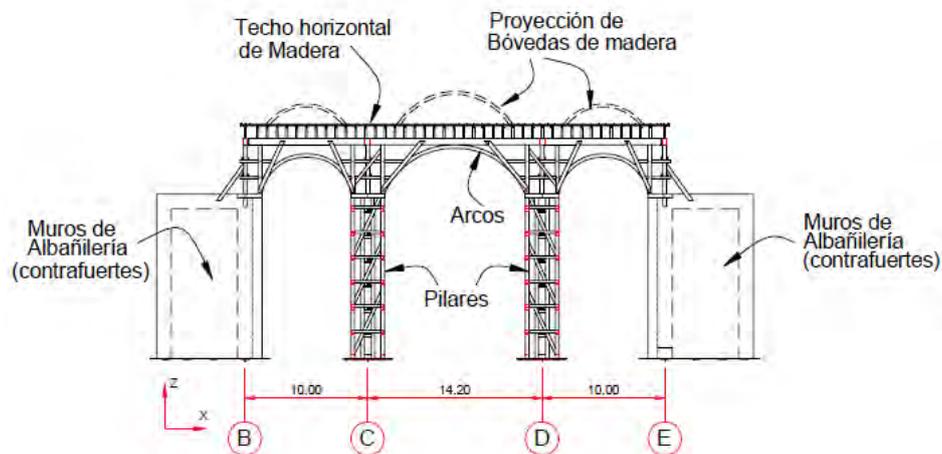


Figura 4.5. Elevación – Elementos de la estructura. CISMID (2005)

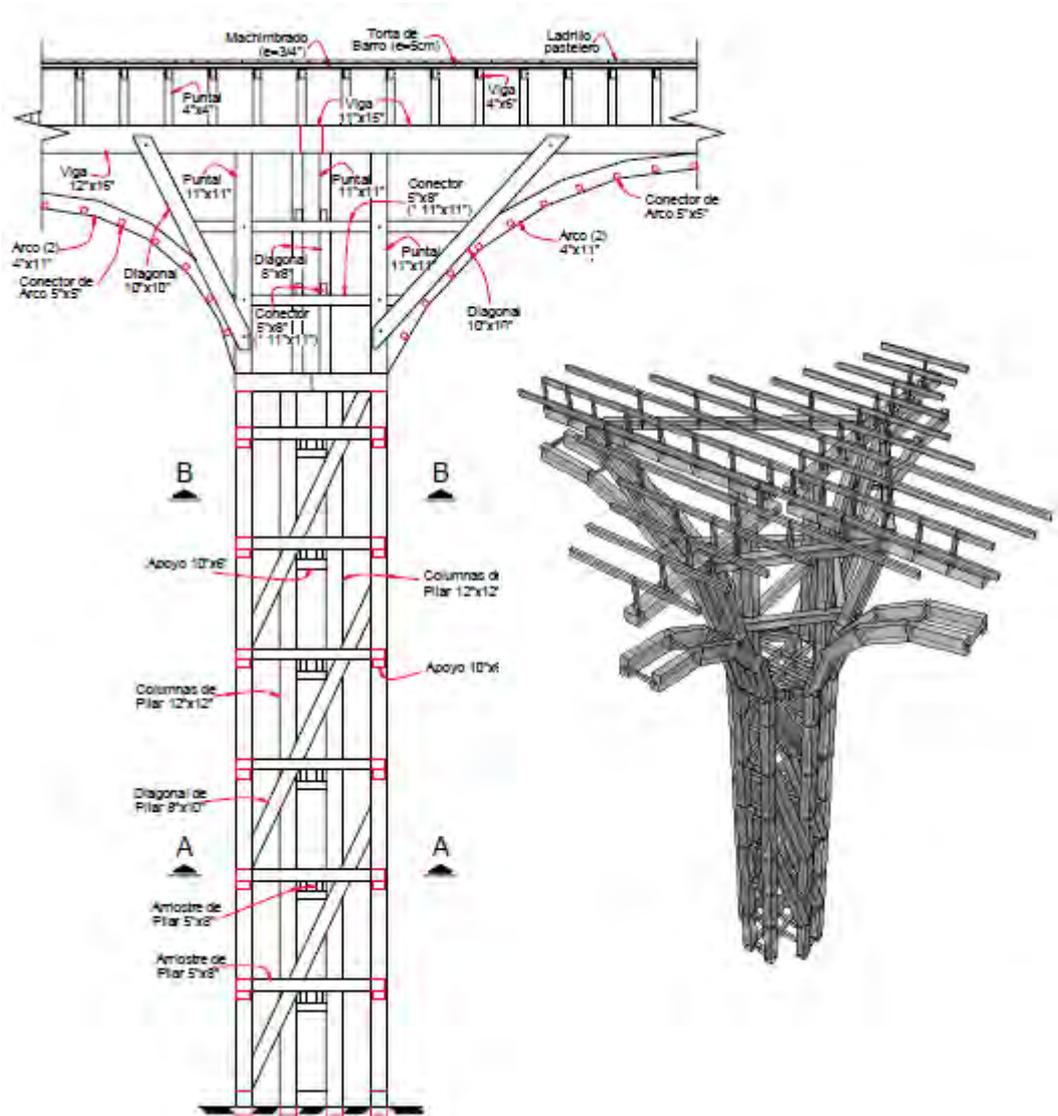


Figura 4.6. Elevación de pilar y sistema de techo sobre el pilar. CISMID (2005)

A continuación se muestran cortes longitudinales (Figura 4.7) y transversales de la catedral de Lima (Figura 4.8).

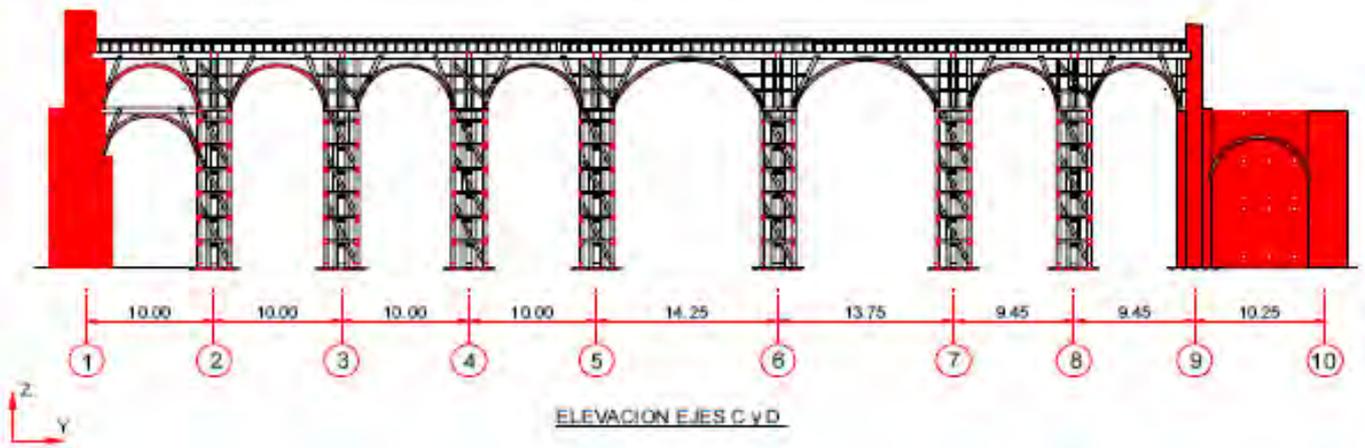
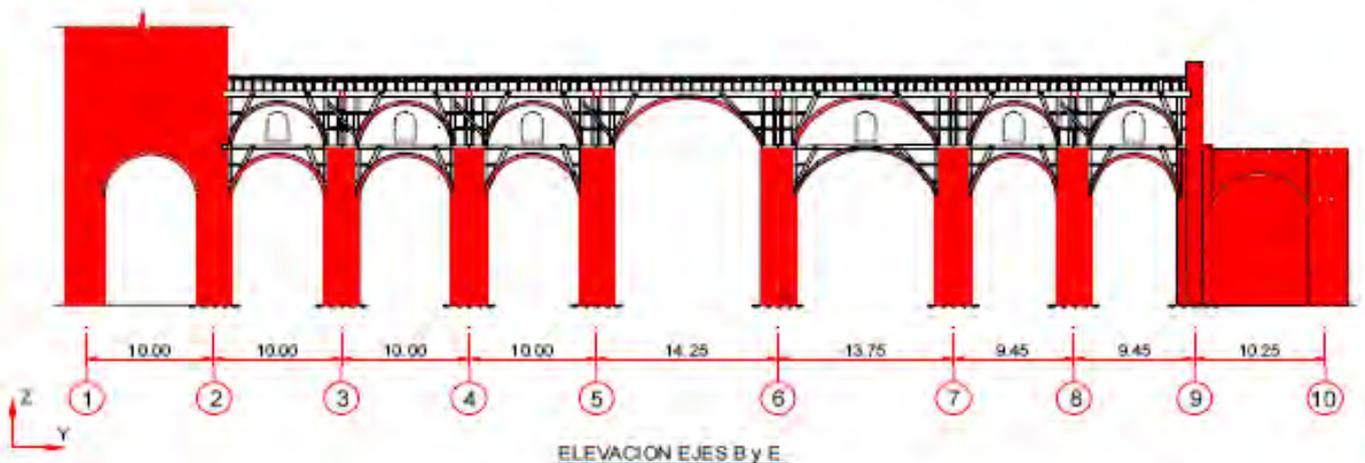


Figura 4.7. Cortes longitudinales de la catedral de Lima

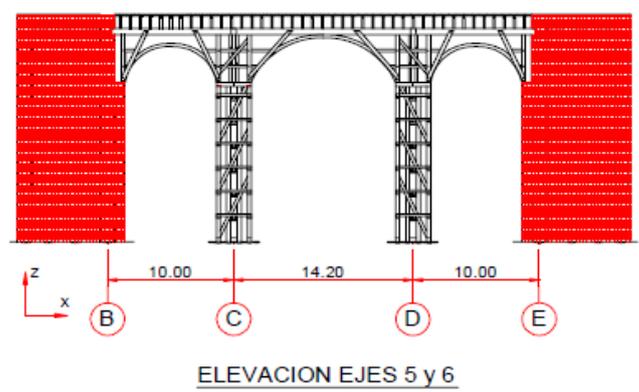
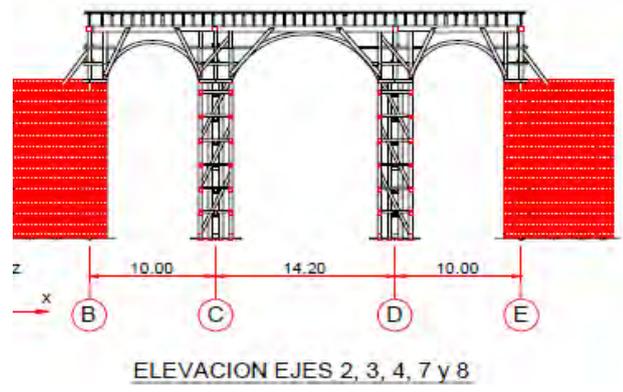


Figura 4.8. Cortes transversales de la catedral de Lima

El segundo techo, el inferior, compuesto por bóvedas con elementos a modo de nervaduras de madera de sección de 5"x12" y de geometría variada. Tiene una cobertura de madera de $\frac{3}{4}$ " de espesor sobre la cual existe una torta de barro de 5cm de espesor con elementos de caña por debajo del techo horizontal. Para la zona ubicada sobre el techo horizontal la torta de barro llega a tener en algunos casos hasta 10 cm de espesor y con un mortero de cemento de 3 a 5 cm de espesor. La disposición de las bóvedas en la catedral y su variada geometría con cruces de Malta se muestran en la Figura 4.9. Estas bóvedas nervadas descansan casi en su totalidad directamente sobre los pilares y en mucha menor proporción sobre los arcos de madera.

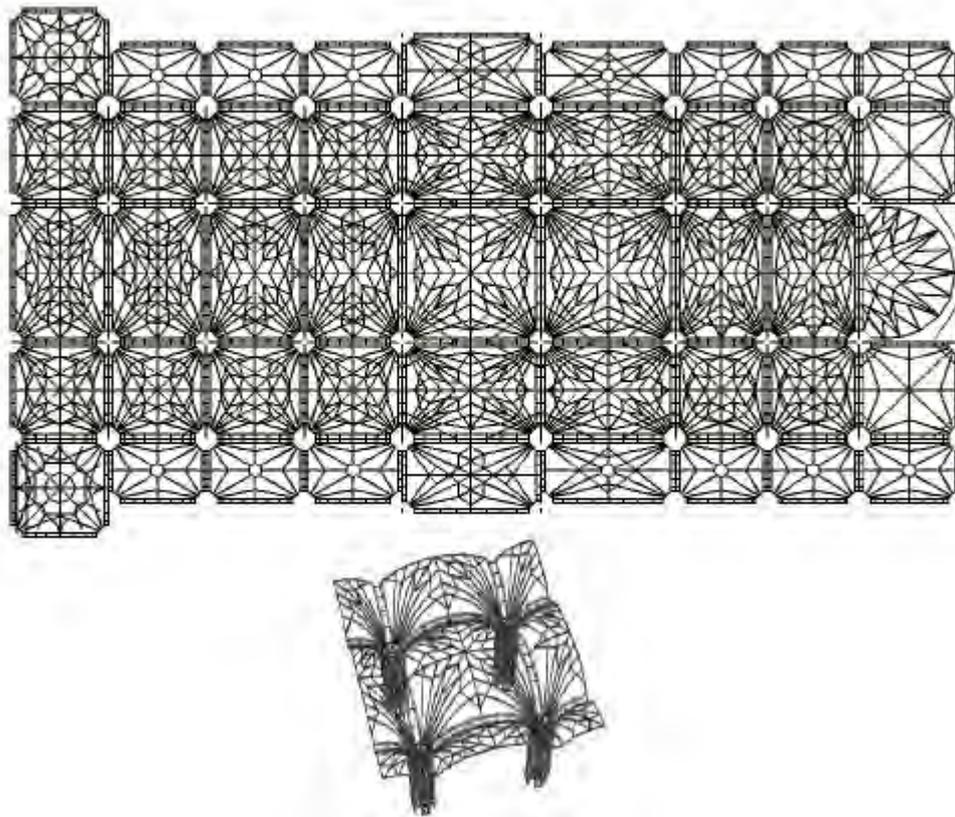


Figura 4.9. Geometría de las bóvedas nervadas en la catedral. CISMID (2005)

Las conexiones de la estructura de madera al interior de la catedral son de variada naturaleza, según los materiales de los elementos conectados. La conexión entre elementos de madera está hecha en base a clavos de hierro de diversos diámetros. Las uniones entre dichos elementos son de múltiples formas, según cada caso particular. Este tipo de conexiones por lo general no restringen de manera eficaz el giro relativo de los elementos. Las uniones entre los elementos de madera y los muros laterales o contrafuertes de ladrillo y cal están hechas en base a empotramientos los cuales, según se evidencia en otros templos de la época, tienen longitudes mayores a un metro, garantizando de alguna manera la restricción al giro relativo de los elementos

de madera con respecto a los muros. En cambio, las columnas de madera al interior de los pilares han sido introducidas dentro de la cimentación de conglomerado de piedra en longitudes pequeñas, que no sobrepasan los 10 cm. Este tipo de conexión de apoyo no restringe debidamente el giro en la base de las columnas.

Las torres de la catedral constan de 3 tramos. El primero, de 18 m de altura aproximada, está hecho en base a muros de ladrillo y cal de 2.40 m de espesor. Existe una escalera de acceso a los campanarios al interior de los muros. El segundo tramo, también de aproximadamente 18 m, está igualmente hecho en base a muros de ladrillo y cal con espesores de 1.9 m. En este tramo se tienen 4 aberturas a modo de portales, por donde se pueden observar las campanas de la catedral. Estos muros han sido recortados en las esquinas con un chaflán de 1.5m. Al interior de este segundo tramo existe una estructura de madera de soporte para las campanas, que está apoyada sobre los mismos muros. El tercer tramo de las torres tiene aproximadamente 9 m y está hecho íntegramente en base a elementos de madera con una cobertura exterior también de madera.

Los muros de albañilería son de espesor variado con aparejo exterior. La disposición de los muros de albañilería en la catedral es como se muestra en la Figura 4.4. El muro del frontis es de 1.9m de espesor y 18m de alto. El muro posterior tiene espesor de 2.45m y 13.5m de alto, los muros laterales tienen un espesor del orden de 1.2m y 16m de alto, y los muros contrafuertes tienen un espesor del orden de 1.60 m. y una altura promedio de 13.5m. Las torres tienen muros con espesor promedio de 2.45m de espesor.

En el estudio hecho por el CISMID (2005) a la catedral de Lima, en cuanto a las propiedades mecánicas de los materiales, se tomaron muestras de la madera que forman la estructura reticular del techo así como las columnas de la Catedral. Asimismo, se extrajo una muestra de mampostería de ladrillo de un muro perimetral. Para las muestras de madera, se determinó que el valor máximo de esfuerzo a la rotura por compresión paralela es del orden de 329 kg/cm². Dentro de las muestras de madera se encontró una con presencia de apolillamiento. La resistencia de esta muestra fue del orden del 50% de la muestra inalterada. Se recomienda usar un módulo de elasticidad para las maderas del orden de 95000 kg/cm². Si se considera que existe una disminución del 50% ante la presencia de polilla en la madera, debería de considerarse en este caso un módulo de elasticidad del orden de 75000 kg/cm². En el caso de la mampostería se obtuvo un valor de esfuerzo máximo de rotura del orden de 22.57 kg/cm². En este caso se recomienda usar un módulo de elasticidad del orden de 11288 kg/cm².

Para la estimación del peso propio de la estructura se consideraron todos los espesores y alturas de muros, secciones y longitudes de los elementos de madera, así como los espesores de las

coberturas de los elementos tales como machihembrados de madera, tortas de barro y otros con caña y yeso. Los pesos específicos que se tuvieron en cuenta para la investigación son:

- Mampostería 1800 kg/m³ (17.64 kN/m³)
- Madera 700 kg/m³ (6.86 kN/m³)
- Tortas de barro 1800 kg/m³ (17.64 kN/m³)

El peso total de la Catedral de Lima se calculó en el orden de 27,550 tn. Los muros de albañilería directamente desplantados sobre el suelo (incluyendo los muros transversales a modo de contrafuertes) tienen un peso del orden de 19,730 tn, lo que significa 71.3% del peso total. El peso de todos los pilares de madera (incluyendo su cobertura de madera con recubrimiento de caña y yeso) es del orden de 209 tn, 0.8% del peso total. El peso de toda la estructura de techos (que incluye toda la estructura de madera de soporte, bóvedas, arcos y sistema de techo) es de 2,750 tn, aproximadamente 10% del peso total, lo que representa un equivalente de 530 kg/m². El peso de las dos torres de la catedral, de 45 m de altura, es 8,030 tn. El peso de la cúpula mayor ubicada en la parte posterior de la catedral es de 75 tn aproximadamente. Las losas interiores ubicadas dentro de las torres y en la zona donde está ubicado el órgano de viento y los coros tienen una carga muerta del orden de 550 kg/m².

Existen otras cargas que podrían ser consideradas como permanentes, tales como el peso de los artefactos de iluminación, que en algunos casos son del orden de 1 tn, pero en relación a la estructura en conjunto son de poca importancia, ya que no sobrepasan los 15 kg/m². El peso total de las campanas es aproximadamente 6 tn, lo que representa un 0.15% del peso de las torres. Las cargas vivas consideradas en el análisis hecho por el CISMID (2005) fueron de 50 kg/m² para la azotea y 250 kg/m² en las losas interiores.

5. CAPÍTULO V: APLICACIÓN DEL CÓDIGO ITALIANO A LAS FACHADAS DE LA CATEDRAL DE LIMA

Como ya se ha definido en el capítulo 3, se utilizará la metodología propuesta en la NTC (2008) de Italia para el análisis de edificaciones de mampostería no reforzada. Como primer paso se realizó el cálculo del índice de vulnerabilidad para los 28 mecanismos propuestos en la norma y así tener noción de cuáles son los que son más probables de ocurrir. A continuación se procedió a realizar el cálculo del factor de activación de aquellos mecanismos que tienen una probabilidad alta de ocurrencia durante un sismo. Finalmente se hizo una verificación lineal y no lineal comparando la capacidad estructural de la catedral de Lima con la demanda sísmica que caracteriza la zona donde se ubica.

5.1 Cálculo del índice de vulnerabilidad

Se realizó el análisis cualitativo de 3 fachadas: la fachada principal, la fachada Los Judíos y la fachada Santa Apolonia. El análisis se adjunta en el ANEXO 02. A continuación se presenta un cuadro resumen con los resultados obtenidos para poder identificar los mecanismos que son más probables de ocurrir. Cabe especificar que no se está hallando el índice de vulnerabilidad, ya que este es un valor que se obtiene con el análisis de todos los macro elementos de la iglesia, es decir, es un índice que describe a todo el edificio y esta tesis se centra en las fachadas de la catedral de Lima. Por lo tanto, usando los valores de importancia que tiene cada mecanismo en la respuesta estructural de la edificación, y factores que aumenten o disminuyan la vulnerabilidad de la estructura, se concluye que el valor resultante de la expresión " $\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$ " nos permite saber cuáles serán los más probables de activarse; es decir, a mayor sea el resultado de la expresión, mayor será la probabilidad que ocurra el mecanismo.

Tabla 5.1. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Principal

FACHADA PRINCIPAL	
MECANISMO	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$
VOLTEO FACHADA	0.38
SOBRE LA FACHADA	0
EN EL PLANO DE LA FACHADA	0.11
CORTE DE MUROS LATERALES	0.12
ELEMENTOS DE CUBIERTA	0

Tabla 5.2. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Los Judíos

FACHADA LOS JUDIOS	
MECANISMO	$\rho_k^*(V_{ki}-V_{kp})/6$
VOLTEO FACHADA	0.15
SOBRE LA FACHADA	0.14
EN EL PLANO DE LA FACHADA	0
CORTE DE MUROS LATERALES	0.10
ELEMENTOS DE CUBIERTA	-0.12

Tabla 5.3. Resultados del análisis cualitativo en la fachada Santa Apolonia

FACHADA SANTA APOLONIA	
MECANISMO	$\rho_k^*(V_{ki}-V_{kp})/6$
VOLTEO FACHADA	0.27
SOBRE LA FACHADA	0.13
EN EL PLANO DE LA FACHADA	0.10
CORTE DE MUROS LATERALES	0
ELEMENTOS DE CUBIERTA	0

Se observa que en todas las fachadas el mecanismo más probable es el volteo simple, seguido del volteo sobre la fachada y finalmente vemos que los mecanismos en el plano, corte y elementos de cubierta tienen aportes casi nulos al índice de vulnerabilidad, lo que quiere decir que la probabilidad de que se activen durante un sismo es baja. Ante esto podemos confirmar que los mecanismos fuera del plano son los que ocurren con más frecuencia en las edificaciones de mampostería no reforzada cuando ocurre un sismo.

5.2 Cálculo del factor de activación – análisis cinemático

El análisis comienza con la creación de un DCL que idealice correctamente los cuerpos que se analizarán. En primer lugar se identificó las condiciones de apoyo que tiene cada elemento a analizar ya que depende en gran porcentaje de estos el tipo de mecanismo que se produzca y luego las cargas aplicadas o que recaen en el elemento en análisis. Se verificará todos los posibles mecanismos que puedan ocurrir, que se han descrito en el inciso 2.6.

Para obtener las cargas externas en las fachadas se hizo un metrado de cargas convencional a los arcos, tomando en cuenta que el peso de los techos se distribuye directamente a los arcos y columnas, y los arcos lo transmiten a los muros, como se muestra en la Figura 5.1.

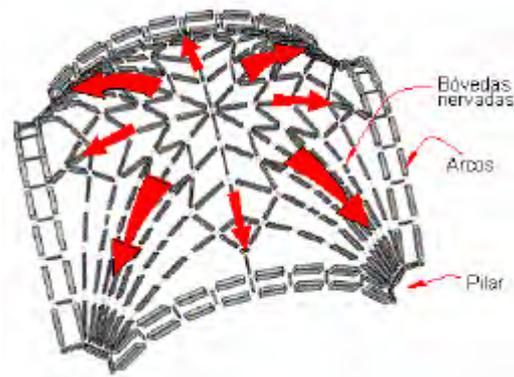


Figura 5.1. Distribución de cargas del techo. CISMID (2005)

Se realizará un análisis separado para cada fachada. Primero la fachada principal, luego la fachada Los Judíos y finalmente la fachada Santa Apolonia. Como datos generales tenemos los pesos propios considerados para cada material:

Tabla 5.4. Pesos específicos asumidos, para los materiales presentes en la catedral de Lima

MATERIAL	$\gamma(\text{kg/m}^3)$	$\gamma (\text{KN/m}^3)$
Mampostería	1800	17.64
Madera	700	6.86
Torta de barro	1800	17.64

En este análisis se usarán los datos descritos en el capítulo 4, tales como espesores de los muros, distancia entre ejes o luces, secciones transversales de arcos y la distribución de los elementos estructurales actuales.

5.2.1 Fachada Principal

En primer lugar se definirá la geometría con la cual representaremos a la fachada principal. Para esta parte se está considerando que las torres que se encuentran en los extremos son un cuerpo externo, es decir, que no tienen conexión eficiente con el muro de la fachada. De acuerdo a lo descrito al CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DE LA CATEDRAL DE LIMA y planos disponibles se obtuvo los siguientes datos de entrada para la fachada Principal: altura = 18m, longitud = 34.2 m y espesor 1.9m

Un dato importante para realizar el análisis es el punto de aplicación del peso propio, para lo cual se tendrá que hallar el centro de gravedad de la fachada. Se presenta una simplificación de la fachada:

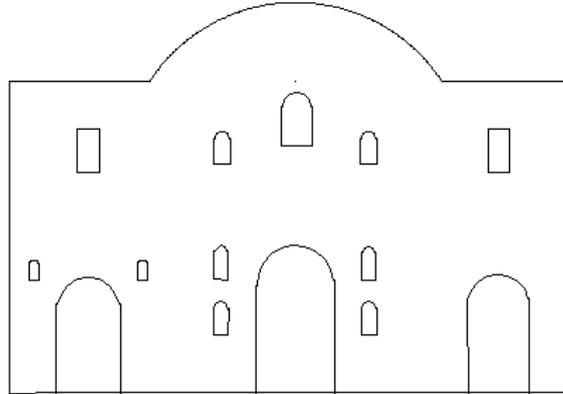


Figura 5.2. Geometría simplificada de la fachada principal de la catedral de Lima.

De esta simplificación se obtuvo que el C.G. está a una altura de 12.373 m.

A continuación se procede con la obtención de las fuerzas externas al muro. De acuerdo al estudio hecho por CISMID (2005), las cargas del techo se distribuyen en los arcos y estos descansan sobre el muro de la fachada. Se puede apreciar en la Figura 5.3 que existen 2 techos que descansan sobre la fachada principal, cuyos pesos son transmitidos al muro mediante arcos.

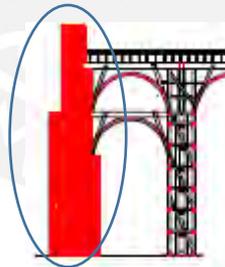


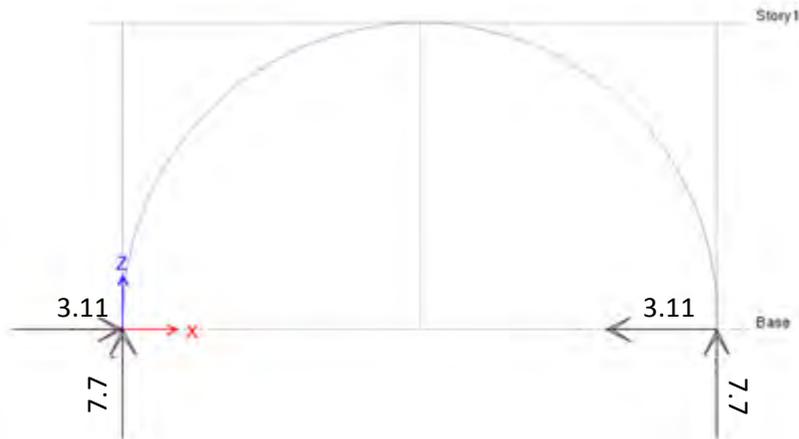
Figura 5.3. Fuerzas externas que actúan en la fachada principal.

Del análisis con el programa ETABS se obtuvieron los siguientes valores para las reacciones transmitidas del arco al muro en análisis.

TECHO INFERIOR:

$$W_{\text{carga}} = 2.217 \text{ tn/m } \text{ ó } 21.374 \text{ kn/m}$$

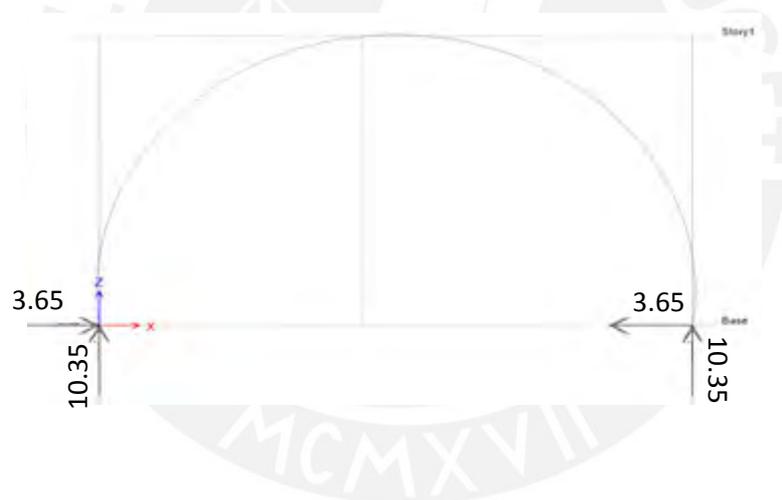
REACCIONES (tn)



TECHO SUPERIOR:

Wcarga= 2.653 tn/m o 26 kn/m

REACCIONES (tn)



Por lo tanto, ya que en la Figura 4.4 se observa 2 ejes que se conectan con la fachada, serían 4 fuerzas externas que participarían a lo largo del muro. Finalmente las fuerzas externas serán:

Inferior: $F1v = 2 \times 7.7 = 15.4$ Tn y $F1h = 2 \times 3.11 = 6.22$ Tn

Superior: $F2v = 2 \times 10.35 = 20.7$ Tn y $F2h = 2 \times 3.65 = 7.3$ Tn

Para hacer una simplificación del DCL se tomará que solo existe una fuerza de empuje, que se ubicará en un punto medio entre el techo inferior y superior. Por lo tanto:

$Fv = 15.4 + 20.7 = 36.1$ Tn

$Fh = 6.22 + 7.3 = 13.52$ Tn

En la Figura 5.4 se aprecian los puntos de aplicación de las fuerzas externas en la fachada Principal.

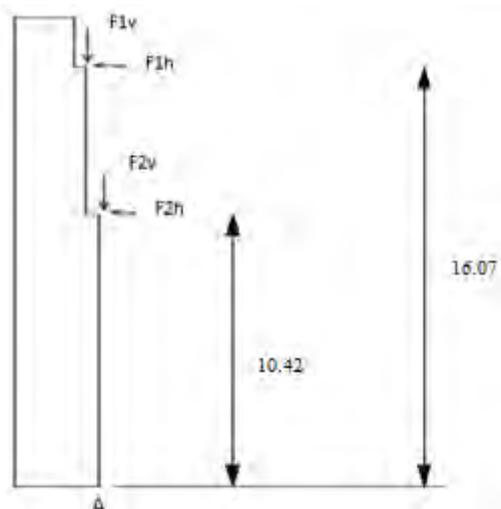


Figura 5.4. Puntos de aplicación de fuerzas externas

De acuerdo a la Figura 5.3, 5.4 y 5.5 obtenemos que el punto de aplicación de F_v y F_h será a 13.245 m del piso y a 1.475 m del punto A (se ha tomado una única resultante y hallado un punto de aplicación en la altura, que equivalga a la disposición real de las fuerzas de arcos).

Según el informe de CISMID (2005), todos los muros están colocados en una zanja de aproximadamente 1 m de profundidad, no existe ningún empotramiento definido, por lo cual para la idealización del modelo se supondrá un apoyo articulado en la base y libre en sus otros extremos ya que ni en el borde superior ni en los laterales se observó apoyos o restricciones eficientes. Por otro lado, se realizará el análisis para un bloque rígido con espesor 1.9m y otro para un muro tipo cortina. Este último es un caso hipotético, ya que en otras iglesias del mismo estilo se observa relleno en medio, pero fue imposible poder definir bien esto, ya que los muros de las fachadas están tarrajeados. Esto fue con la finalidad de englobar todos los casos posibles de mecanismos de colapso posibles a ocurrir, así que se usó la misma hipótesis en las demás fachadas.

Para el cálculo del factor de activación se ha creado una base de datos para facilitar la iteración en busca del mecanismo más crítico. A continuación se presenta la Tabla 5.5 con los datos de entrada y resultados obtenidos para los mecanismos que se han identificado como probables de activarse, de acuerdo a sus condiciones de apoyo descritos en el inciso 2.6. Las fuerzas están expresadas en Kilonewtons (Kn) y las longitudes en metros (m).

Tabla 5.5. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Principal

a)

Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido		
Datos		
Geometría	Esesor del muro (s) [m]	1.900
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	18.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	12.373
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	13.245
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	1.475
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	20632.412
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	353.779
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	132.496
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	20122.616
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	259970.647
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	1754.906
	Multiplicador de colapso (α)	0.071

b)

Mecanismo de vuelco simple - muro cortina		
Datos		
Geometría	Esesor del muro A (sa) [m]	0.500
	Esesor del muro B (sb) [m]	0.500
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	18.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	12.373
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	13.245
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	1.475
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en A (da) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	10316.206
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	10316.206
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	353.779
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	132.496
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-	
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	5679.928
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	259970.647
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	1754.906
	Multiplicador de colapso (α)	0.015

c)

Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.900
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	5.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	2.500
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	3.070
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	1.350
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	5731.226
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	150.920
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	60.956
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	5648.406
	Momento de volteo α (Mr)(α) [Kn.m]	14791.388
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	187.135
Multiplicador de colapso (α)		0.369

d)

Mecanismo de flexión horizontal - confinada		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.900
	Longitud del bloque (L) [m]	1.900
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.000
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_r) [Kn]	2200.000
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	104.961
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	60.956
Resultados		
Multiplicador de colapso (α)		0.238

El cálculo del factor de activación se obtiene dividiendo el momento estabilizante “Ms”, entre el momento de volteo “Mr”. Como se explicó en los ejemplos del capítulo 2, resulta lo mismo que aplicar las ecuaciones del P.T.V. En este primer análisis se evaluaron 4 mecanismos, ya que son las tres posibles formas en la que podría fallar de acuerdo a las condiciones en la que se encuentra el elemento. Según los resultados, vemos que el segundo mecanismo presentado tiene un factor de activación menor, por lo tanto, es más probable que se active, ya que necesita una menor fuerza horizontal para convertir el sistema en un sistema lábil.

5.2.2 Fachada Los Judíos

En esta parte de la edificación se observó que existen muros que han sido construidos en distintos tiempos y con distintos materiales, por lo cual se hizo una separación y la fachada a analizar tiene la siguiente geometría: altura = 16m, longitud = 13.12 m y espesor 1.2m.

La simplificación de la fachada Los Judíos se presenta a continuación:

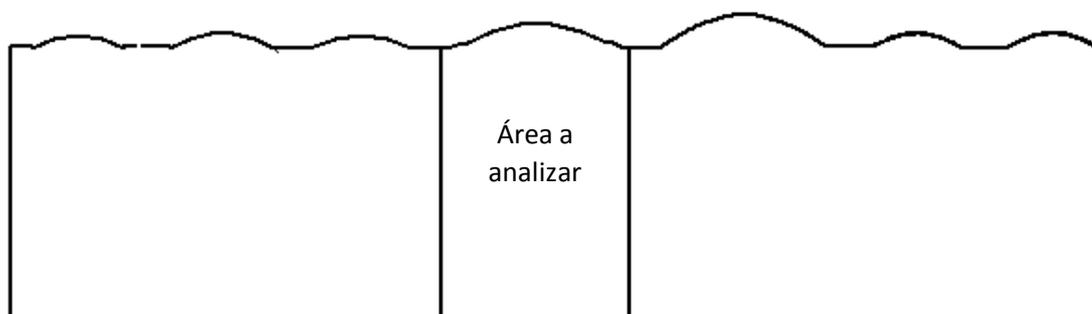


Figura 5.5. Geometría simplificada de la fachada Los Judíos de la catedral de Lima.

De esta simplificación se obtuvo que el C.G está a una altura de 10.53 m.

Para esta fachada según la Figura 4.4. Planta de la estructura de la catedral de Lima. CISMID (2005), se observa que no hay elementos que generen empuje directamente, pero en la visita a la catedral de Lima, se observó que una bóveda pequeña descansa sobre esta fachada; sin embargo, se va a despreciar, ya que en el análisis de la fachada principal se observó que la transmisión del peso de una bóveda no es un factor que cambie el resultado significativamente. En términos de restricciones vemos que existen muros perpendiculares a la fachada, en forma de contrafuertes. Estos muros generan que haya posibilidad de que se produzcan más mecanismos que en la fachada analizada anteriormente. A continuación se presenta los resultados obtenidos con la base de datos creada. (Ver desde Tabla 5.2.6 hasta la 5.2.10).

Tabla 5.6. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Los Judíos

a)

Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido		
Datos		
Geometría	Esesor del muro (s) [m]	1.200
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	16.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	10.530
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	15.000
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.800
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	4443.579
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	2727.246
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	47936.492
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000
Multiplicador de colapso (α)		0.057

b)

Mecanismo de vuelco simple - muro cortina		
Datos		
Geometría	Esesor del muro A (sa) [m]	0.500
	Esesor del muro B (sb) [m]	0.500
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	16.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	10.530
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	15.000
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.000
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en A (da) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	2221.789
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	2221.789
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-	
Resultados		
Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		1110.895
Momentos	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	47936.492
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000
Multiplicador de colapso (α)		0.023

c)

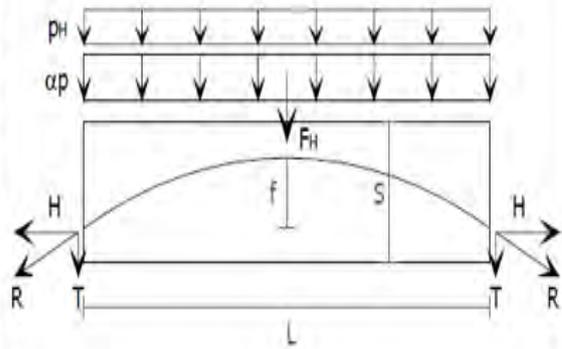
Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	2.000
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	1.000
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	1.000
	Brazo horizontal cargas de arcos y/o bóvedas (dv) [m]	0.800
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	555.447
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	394.368
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	631.821
	Momento de voteo (Mr) [Kn.m]	0.000
Multiplicador de colapso (α)		0.624

d)

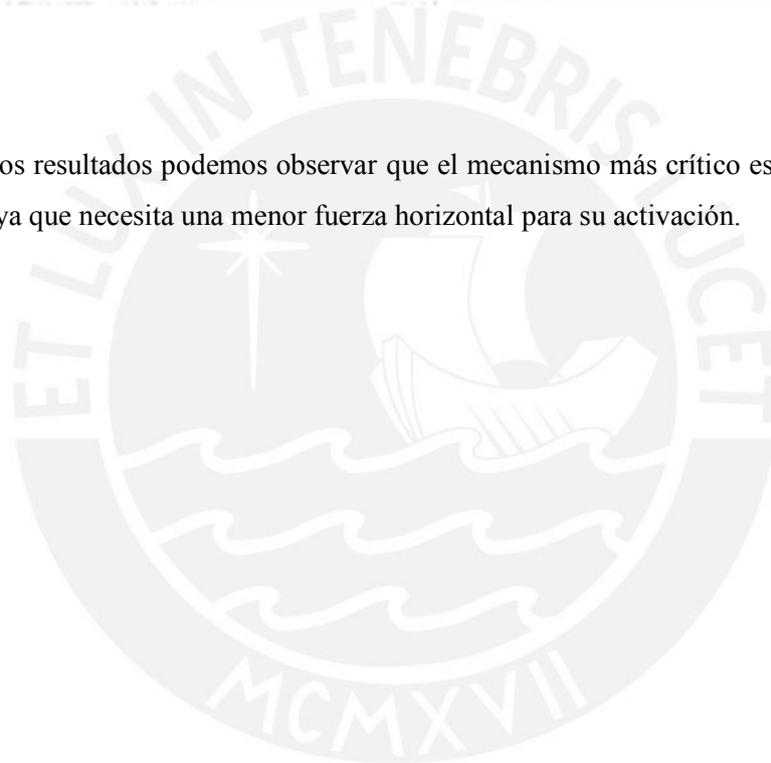
Mecanismo de vuelco compuesto - cuña diagonal		
Datos		
Geometría	Espesor del muro frontal (s) [m]	1.200
	Altura del muro frontal (entrepiso) (h) [m]	16.000
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro frontal (d) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro ortogonal (do) [m]	-
	Distancia horizontal de A al baricentro del muro ortogonal (Xgo) [m]	1.533
	Altura del baricentro del muro frontal (Yg) [m]	10.530
Cargas	Altura del baricentro del muro ortogonal (Ygo) [m]	10.667
	Peso de la pared frontal (W) [Kn]	4443.579
	Peso de cuña de liberación (Wo) [Kn]	903.166
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas en el muro frontal (Ps) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas en el muro ortogonal (Pso) [Kn]	-
Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-	
Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-	
Resultados		
Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		4112.101
Momentos	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	57570.267
	Momento de voteo (Mr) [Kn.m]	-
Multiplicador de colapso (α)		0.071

e)

Mecanismo de flexión horizontal - confinado		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200
	Longitud del bloque (L) [m]	1.200
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.800
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_x) [Kn]	2200.000
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	86.259
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	0.000
Resultados		
Multiplicador de colapso (α)		1.351



De acuerdo a los resultados podemos observar que el mecanismo más crítico es el de muro tipo doble cortina, ya que necesita una menor fuerza horizontal para su activación.



5.2.3 Fachada Santa Apolonia

La simplificación de la fachada es la siguiente:

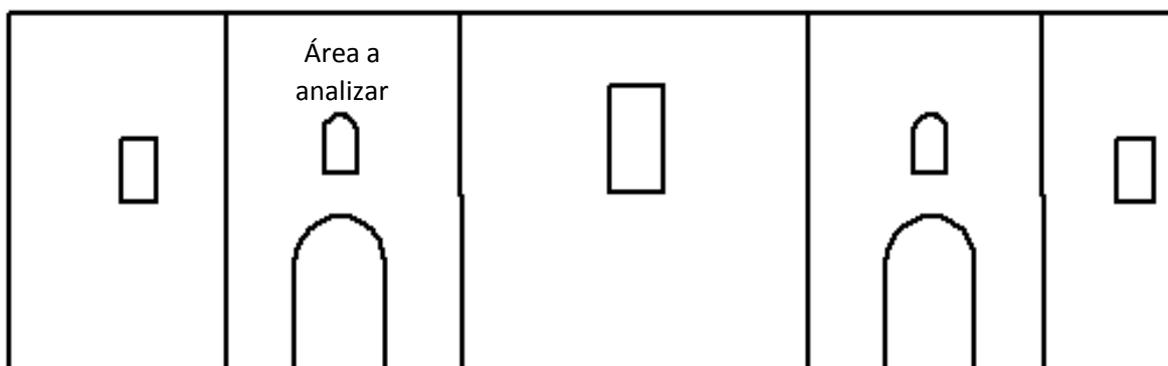


Figura 5.6. Geometría simplificada de la fachada Santa Apolonia de la catedral de Lima.

Al igual que en la fachada Los Judíos, en esta fachada se observa una distinción entre algunas partes, debido al material y época constructiva. Se ha definido un área de análisis que corresponde a la verdadera fachada (con la arquitectura característica original). La geometría definida para esta fachada es la siguiente: altura = 13.5m, longitud = 12.97 m y espesor 2.45 m.

Según la Figura 4.7, donde se observan los cortes longitudinales de la catedral, podemos apreciar que existen contrafuertes perpendiculares a la fachada, en donde descansan los arcos que transmiten el peso de las bóvedas centrales. Por otro lado, de acuerdo a la visita realizada a la catedral de Lima, el muro de esta fachada si recibe el peso de una pequeña bóveda; sin embargo, se despreciará para el análisis.

De acuerdo a las condiciones de apoyo y cargas que soporta esta fachada, los mecanismos que son probables a ocurrir son los mismos que la fachada Los Judíos. A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis (Ver desde Tabla 5.2.11 hasta la 5.2.15).

Tabla 5.7. Factores de activación para posibles mecanismos en la Fachada Santa Apolonia

a)

Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	2.450
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	13.500
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	8.900
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	12.100
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	2.000
Cargas	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
	Peso del muro (W) [Kn]	7567.242
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
Resultados	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	9504.382
Momentos	Momento de volteo α (Mr(α)) [Kn.m]	68767.241
	Momento de vateo (Mr) [Kn.m]	0.000
	Multiplicador de colapso (α)	0.138

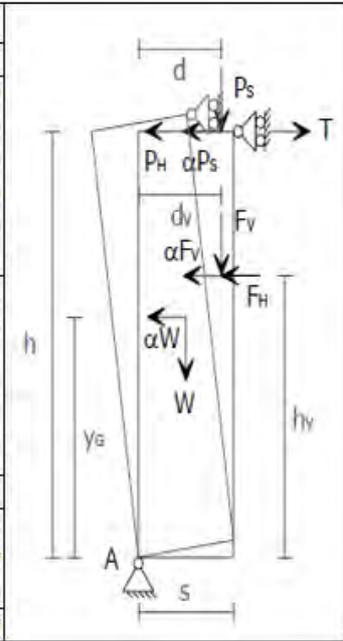
b)

Mecanismo de vuelco simple - muro cortina		
Datos		
Geometría	Espesor del muro A (sa) [m]	0.500
	Espesor del muro B (sb) [m]	0.500
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	13.500
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	8.900
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	12.100
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.100
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en A (da) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	3783.621
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	3783.621
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	1903.536
	Momento de volteo α (Mr(α)) [Kn.m]	68767.241
Momentos	Momento de vateo (Mr) [Kn.m]	0.000
	Multiplicador de colapso (α)	0.028

c)

Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido

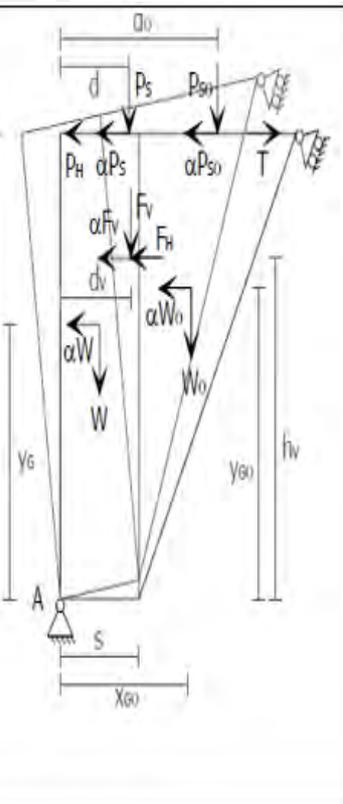
Datos		
Geometría	Esesor del muro (s) [m]	2.450
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	2.500
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	1.250
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	1.100
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	2.000
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	1401.341
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	1951.153
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	1880.657
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000
Multiplicador de colapso (α)		1.037



d)

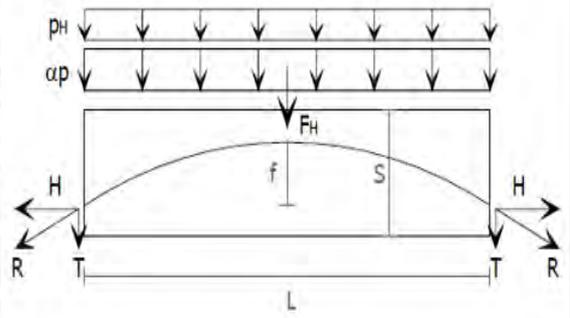
Mecanismo de vuelco compuesto - cuña diagonal

Datos		
Geometría	Esesor del muro frontal (s) [m]	2.450
	Altura del muro frontal (entrepiso) (h) [m]	13.500
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	12.100
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro frontal (d) [m]	-
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	2.000
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro ortogonal (do) [m]	-
	Distancia horizontal de A al baricentro del muro ortogonal (Xgo) [m]	3.283
	Altura del baricentro del muro frontal (Yg) [m]	8.900
	Altura del baricentro del muro ortogonal (Ygo) [m]	9.000
Cargas	Peso de la pared frontal (W) [Kn]	7567.242
	Peso de cuña de liberación (Wo) [Kn]	952.558
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas en el muro frontal (Ps) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas en el muro ortogonal (Pso) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-
Resultados		
Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		12631.948
Momentos	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	77340.266
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	-
Multiplicador de colapso (α)		0.163



e)

Mecanismo de flexión horizontal - confinado		
Datos		
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200
	Longitud del bloque (L) [m]	1.200
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.800
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_r) [Kn]	2200.000
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	89.479
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	0.000
Resultados		
Multiplicador de colapso (α)		1.333



5.3 Verificación lineal:

De acuerdo al código italiano, es necesario realizar una verificación lineal. En esta investigación tomaremos la perspectiva del estado límite de vida (SLV), ya que el objetivo es verificar que la estructura no colapse al producirse un sismo de gran magnitud, pudiendo tener daños o fallas en elementos no estructurales, pero que tenga la capacidad de soportar su propio peso y que asegure la integridad física de los usuarios ante réplicas del sismo. Se ha usado las fórmulas propuestas por el código italiano con los parámetros sísmicos de la norma peruana, descritas en el inciso 3.3.2.

Para mecanismos globales:

$$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR})S}{q} \equiv \frac{Z}{q} \cdot S \cdot g \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

Para mecanismos locales:

$$a_0^* \geq \frac{S_e(T_1)\psi(z)\gamma}{q} \equiv \frac{Z}{q} \cdot \min\left(2.5 \frac{T_p}{T_1}, 2.5\right) \cdot S \cdot g \cdot \psi(z) \cdot \gamma \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

Los parámetros de sitio son los siguientes:

Z = 0.45 (Lima, Zona sísmica 4)

S = 1 (Roca o suelos rígidos)

q = 2 (Valor recomendado por el código italiano)

$$T_p = 0.4$$

$$T_l = 2.5$$

C = depende del periodo fundamental de la fachada que se analice

A continuación se muestra tablas con los resultados de la verificación lineal para cada fachada:

Tabla 5.8. Resultados de la verificación lineal. a) De la fachada principal. b) De la fachada de los Judíos. c) De la fachada Santa Apolonia

a) FACHADA PRINCIPAL				
MECANISMO	α	a*0 (g)	a demanda	¿CUMPLE?
VOLTEO SIMPLE	0.071	0.052	0.225	NO
VOLTEO CORTINA	0.015	0.011	0.225	NO
VOLTEO PARTE SUPERIOR	0.369	0.274	0.484	NO
FLEXIÓN HORIZONTAL	0.238	0.238	0.516	NO

b) FACHADA LOS JUDÍOS				
MECANISMO	α	a*0 (g)	a demanda	¿CUMPLE?
VOLTEO SIMPLE	0.057	0.042	0.225	NO
VOLTEO SUPERIOR	0.624	0.462	0.527	NO
VOLTEO SIMPLE CORTINA	0.023	0.017	0.225	NO
CUÑA DIAGONAL	0.071	0.053	0.225	NO
FLEXIION HORIZONTAL	1.351	1.001	0.496	SI

c) FACHADA SANTA APOLONIA				
MECANISMO	α	a*0 (g)	a demanda	¿CUMPLE?
VOLTEO SIMPLE	0.138	0.103	0.225	NO
VOLTEO SUPERIOR	1.037	0.769	0.635	SI
VOLTEO SIMPLE CORTINA	0.028	0.021	0.225	NO
CUÑA DIAGONAL	0.163	0.121	0.225	NO

Como se ha definido en los parámetros de análisis, el factor de reducción “q” es igual a 2, con lo cual el código italiano exige que la aceleración espectral que active el mecanismo o inicie la etapa inelástica en el elemento sea como mínimo la mitad de la aceleración máxima elástica que demanda el sitio.

En los resultados presentados se observa que hay 2 casos que cumplen con la verificación lineal. Ambos son mecanismos locales, y se puede intuir que esto es debido a que se necesita una mayor aceleración para activar este tipo de mecanismos. Por otro lado, que no se cumpla la verificación

lineal no quiere decir que el elemento colapsará cuando se active el mecanismo en análisis, por lo cual es necesario realizar una verificación no lineal donde se compare el desplazamiento último del elemento con el desplazamiento máximo que demanda del sitio.

5.4 Cálculo del espectro de capacidad y verificación no lineal:

De acuerdo a lo desarrollado en el inciso 3.3.2, se optó por crear curvas de capacidad de acuerdo a lo propuesto por D'Áyala (2005). Para el cálculo de los puntos notables se han tomado las siguientes consideraciones:

- Según Aguilar (2015), luego de activarse el mecanismo, un movimiento progresivo del cuerpo ocurre hasta alcanzar un estado de desplazamiento máximo, que corresponde a un valor cero para el multiplicador de carga, " α_0 ". El vector de carga de peso estará alineado con el punto de bisagra, ver Figura 5.7. Se considera que la estructura es progresivamente capaz de soportar la evolución del mecanismo, hasta la disipación completa de la propia fuerza horizontal, es decir, hasta que la estructura ya no tenga capacidad de resistir acciones externas horizontales.

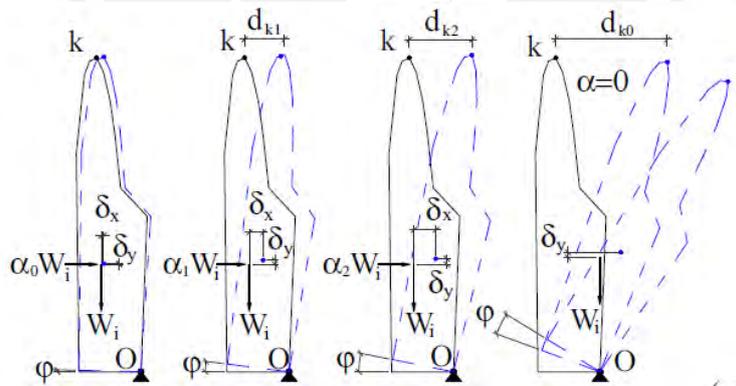


Figura 5.7. Movimiento progresivo hasta llegar al colapso. (Aguilar, 2015)

- Se han usado las fórmulas propuestas por el código italiano con los parámetros sísmicos especificados en la norma peruana E030

El procedimiento para obtener la curva de capacidad contempla los siguientes pasos:

- 1) El origen es el punto (0, 0)
- 2) Se define a^*_y y d^*_y , que representan la etapa elástica del elemento. Los valores de estas variables generalmente son pequeños, debido al casi nulo comportamiento lineal del material ante deformaciones.

- 3) El comienzo de la etapa inelástica está definido por la aceleración espectral que activa el mecanismo “a*₀” y el desplazamiento límite de daño “d*_{DL}”.
- 4) El siguiente punto se define con “a*₀” y con el desplazamiento de estado límite d*_{NC}, es decir, esta parte de la curva es constante, no se considera que la mampostería pueda aumentar su resistencia lateral cuando se producen los desplazamientos inelásticos, es decir, no presenta sobre resistencia.
- 5) El último punto es el de colapso, donde la resistencia lateral es nula, por lo tanto la aceleración también es nula y el desplazamiento último real del sistema “d*_c” es el 40% del máximo desplazamiento espectral “d*_o”.

Una vez concluido el cálculo del espectro de capacidad se debe obtener el desplazamiento de demanda espectral “d*_d” o “d_{max}” con el cual se va a comparar el desplazamiento último real del elemento analizado “d*_c”. De acuerdo a la verificación propuesta por el código italiano se debe usar las siguientes fórmulas:

Para mecanismos globales:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_s) = \frac{T_s^2}{4\pi^2} S_e(T_s) \dots\dots\dots (3.21)$$

Para mecanismos locales:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_1) \psi(z) \gamma \frac{\left[\frac{T_s}{T_1}\right]^2}{\sqrt{\left[1 - \frac{T_s}{T_1}\right]^2 + 0.02 \frac{T_s}{T_1}}} \dots\dots\dots(3.22)$$

Los términos de estas expresiones se encuentran detallados en el inciso 3.3.2. Con fines de facilitar la nomenclatura, d*c vendría a ser d*u en la fórmula italiana y d*d es toda la expresión de la derecha.

A continuación se presenta las curvas de capacidad obtenidas de los mecanismos probables en las 3 fachadas analizadas. La línea azul representa la curva de capacidad y roja es el desplazamiento de demanda espectral.

Para la fachada principal se obtuvieron las siguientes curvas de capacidad:

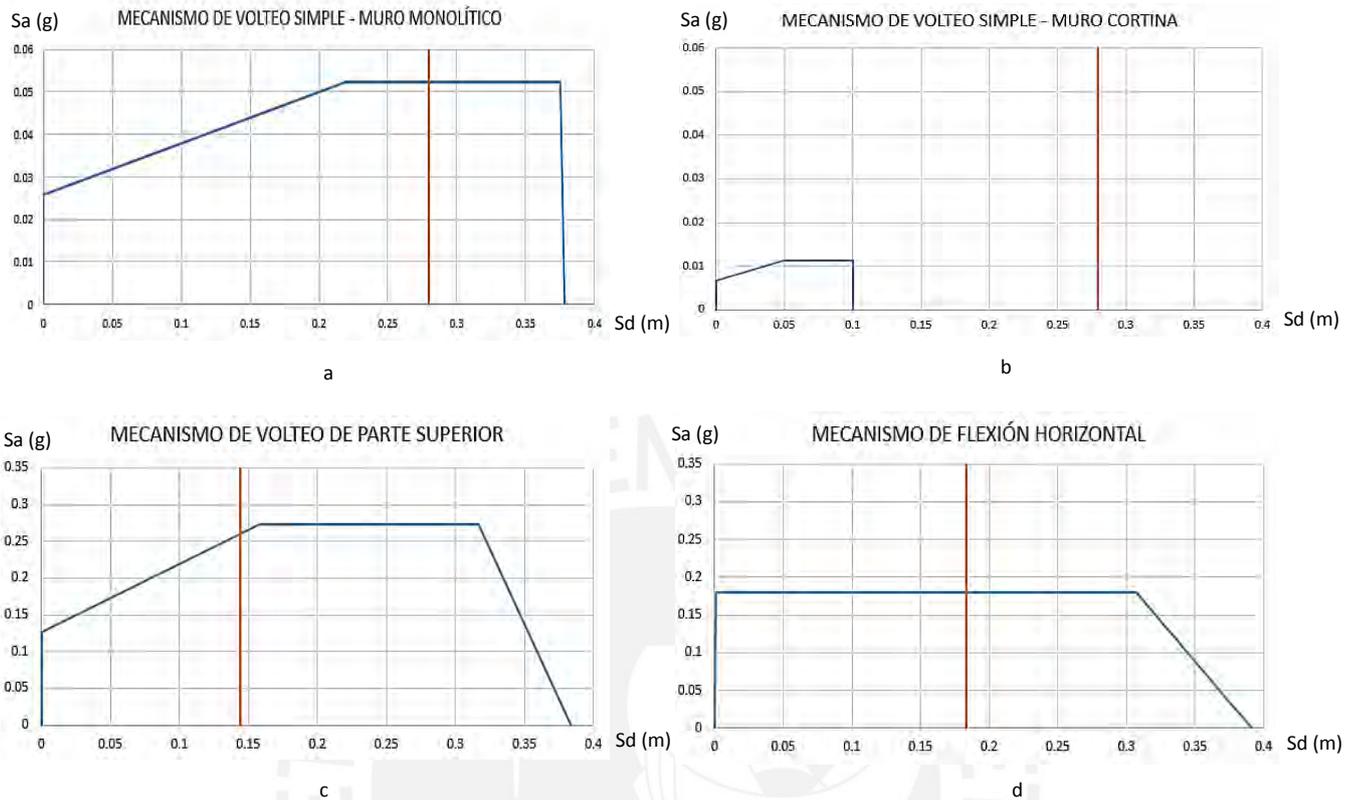


Figura 5.8. Curvas de capacidad de la fachada Principal para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Flexión horizontal confinada.

Se observa que en el caso en el que el muro es tipo doble cortina, el comportamiento estructural es ineficiente, ya que no cumple con la verificación no lineal, el desplazamiento último espectral de la fachada es menor que el que demanda el sitio.

En el caso del mecanismo de volteo en muro monolítico se observa que el sismo de demanda llevará al elemento a una zona de daño inelástico, al igual que si es que se activa un mecanismo de flexión horizontal suponiendo que haya un confinamiento eficaz en los lados laterales de la fachada (existen 2 torres en los lados, que le impiden el desplazamiento en su plano).

Finalmente el mecanismo de volteo superior es el que será menos probable de ocurrir, pero por si es que llega a activarse el elemento responderá con una disipación de energía histerética de deformaciones que llegarán cerca al estado de inicio de daño.

En la fachada Los Judíos se obtuvieron los siguientes espectros de capacidad:

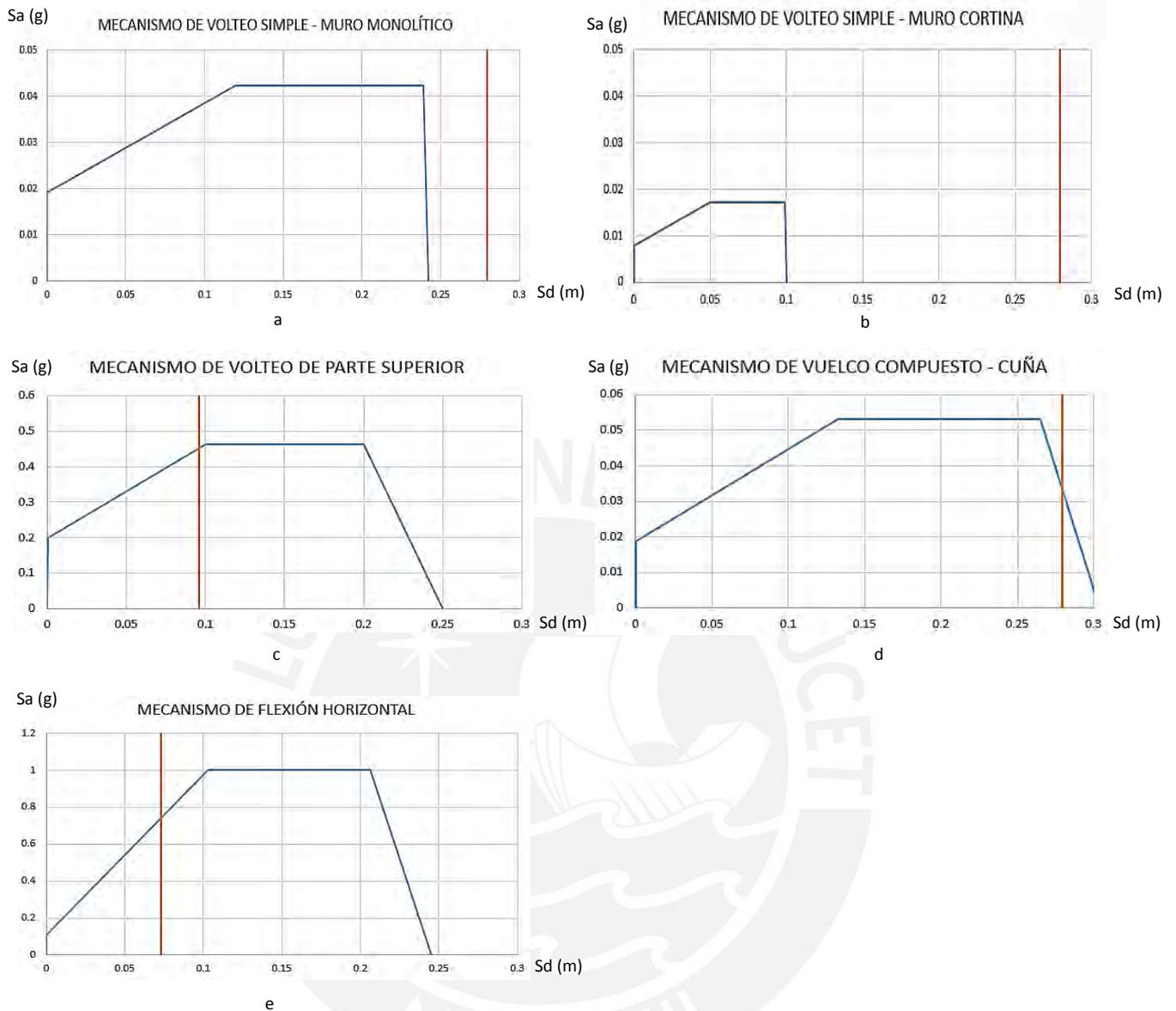


Figura 5.9. Curvas de capacidad de la fachada Los Judíos para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Vuelco compuesto – cuña. e) Flexión horizontal confinada.

En esta fachada se observa que los volteos simples tanto de muros monolíticos y tipo doble cortina no llegan a cumplir la verificación no lineal. Inclusive el mecanismo de volteo compuesto puede considerarse peligroso, ya que el desplazamiento espectral para este caso es cercano al desplazamiento de demanda. En esta fachada se debe analizar si los contrafuertes existentes garantizarán una restricción del volteo, ya que es muy probable de activarse en un sismo de gran magnitud. Los mecanismos de flexión horizontal y volteo superior son los menos probables a ocurrir y si es que llegasen a activarse no supondrían daños severos para la fachada.

Así mismo, en la fachada de Santa Apolonia se obtuvieron las siguientes curvas:

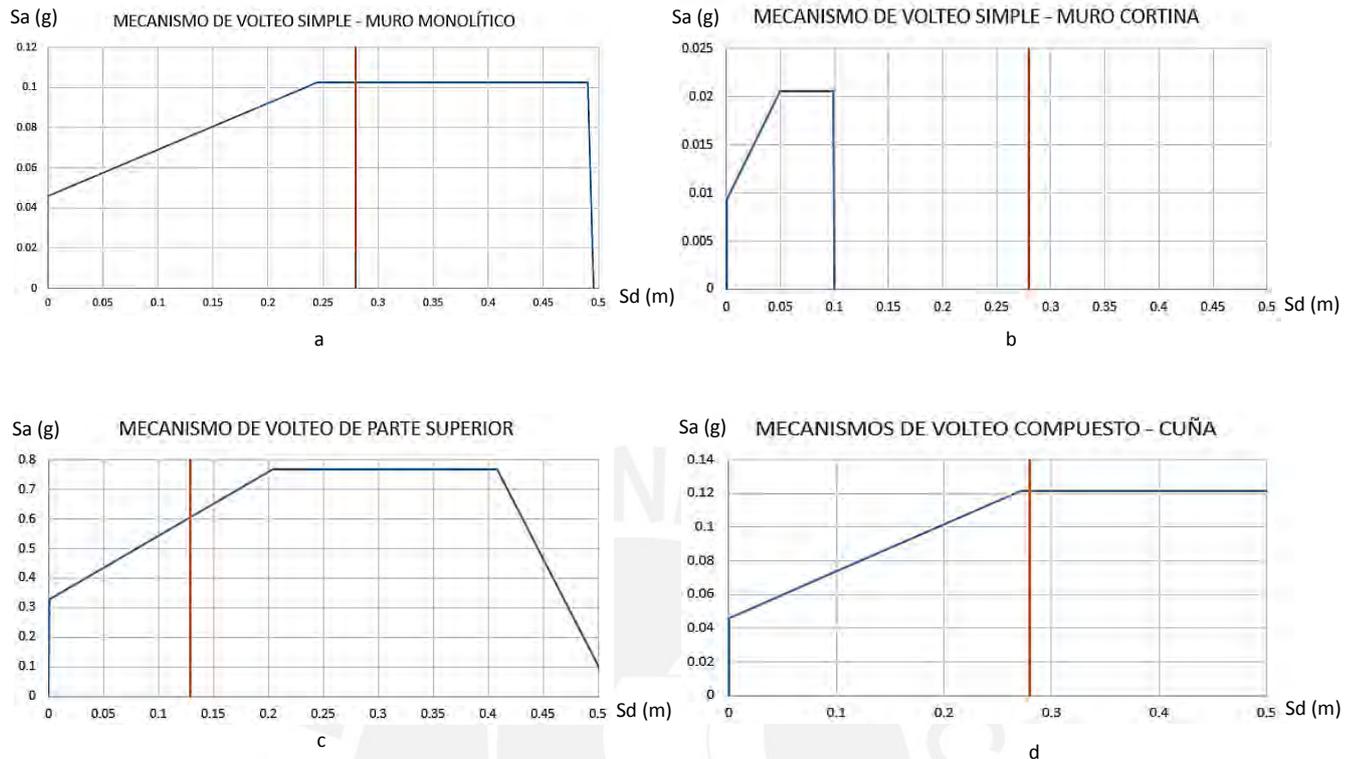


Figura 5.10 Curvas de capacidad de la fachada Santa Apolonia para los mecanismos a) Volteo simple – muro rígido. b) Volteo simple – muro cortina. c) Volteo de parte superior. d) Vuelco compuesto – cuña

Se puede observar que el mecanismo más crítico en esta fachada es el volteo simple en un muro tipo doble cortina. Por otro lado, el mecanismo de volteo superior es que generará menos daño. Para el volteo en muro tipo monolítico y volteo compuesto, el sismo de demanda hará incurrir al elemento en la etapa inelástica pero no se producirá colapso.

El procedimiento para la verificación lineal y no lineal para los mecanismos de cada fachada se adjunta en el ANEXO 03.

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La metodología aplicada en esta investigación, propuesta por la NTC 2008 de Italia, sirve para analizar preliminarmente la seguridad sísmica de edificaciones históricas. Sus resultados no son precisos, pero al ser una metodología rápida nos puede permitir analizar un gran número de construcciones históricas y comparar su estado estructural para definir una lista de aquellas que necesiten una intervención con más urgencia.
- Como resultado de la revisión bibliográfica, se concluye que los mecanismos fuera del plano son los más probables a ocurrir en las estructuras de mampostería no reforzada, según Ayala et al. (2003), Restrepo (2004) y otros autores.
- Con la descripción arquitectónica, estructural y las visitas realizadas a la catedral de Lima, se identificó los siguientes macro elementos: la fachada Principal, la fachada Los Judíos, la fachada Santa Apolonia y dos torres.
- Con fines comparativos, se halló un índice para cada fachada como un porcentaje del índice de vulnerabilidad de toda la catedral, de acuerdo a su aporte a la vulnerabilidad o protección sísmica de toda la edificación. De los resultados de este procedimiento se concluye que la fachada Principal es la más vulnerable; esto se debe a la carencia de contrafuertes que restrinjan el volteo, las cargas que soportan directamente de las bóvedas y la cantidad de aberturas en su volumen a comparación de las otras dos fachadas. En la Figura 6.1 se observa que la fachada Santa Polonia es la segunda más vulnerable, debido a que, al igual que la fachada principal, presenta una restricción al volteo menos eficiente que en la fachada Los Judíos, en la que se observa contrafuertes que restringen el desplazamiento en una dirección.

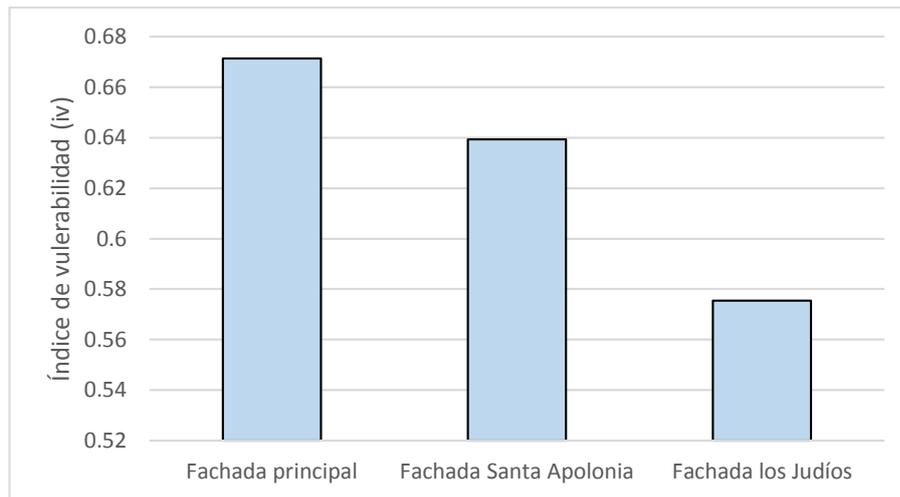


Figura 6.1. Comparación entre índices de vulnerabilidad de las fachadas de la catedral de Lima.

- Dentro del análisis cualitativo se ha puesto en evidencia que los mecanismos fuera del plano son los más probables a ocurrir, confirmando lo revisado en la bibliografía. Para comparar la probabilidad de activación de los distintos mecanismos, se usó la siguiente expresión: “ $\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / (6 \cdot \rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) \text{promedioponderado}) + 0.5$ ”. Los elementos de esta ecuación son:
 - ρ_k : es el nivel de importancia del mecanismo, es decir, cuanto impactaría su activación en la respuesta sísmica del edificio. Es 0 para los mecanismos que no podrían haber sido activados en la iglesia, por la falta de macroelementos, mientras que es entre 0,5 y 1 en los demás casos.
 - V_{ki} y V_{kp} : son, respectivamente, la puntuación obtenida en la encuesta de indicadores de vulnerabilidad y salvaguardas sísmicos (Tabla 3.3), de acuerdo a la ficha de evaluación que se presentó (Ver Figura 3.7)

Con esta expresión se representa el aporte de cada mecanismo al índice de vulnerabilidad total de la fachada en estudio. En la Figura 6.2 se grafica esta comparación para la fachada Los Judíos, se observa que el mecanismo “Plano de la fachada” no tiene ningún aporte a la vulnerabilidad de la fachada analizada. Por lo tanto, es muy poco probable que en la fachada Los Judíos se active un mecanismo en su plano.

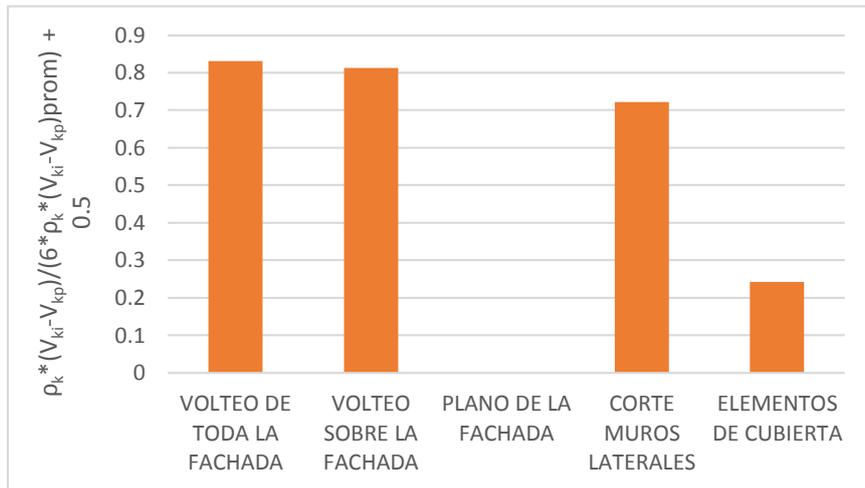
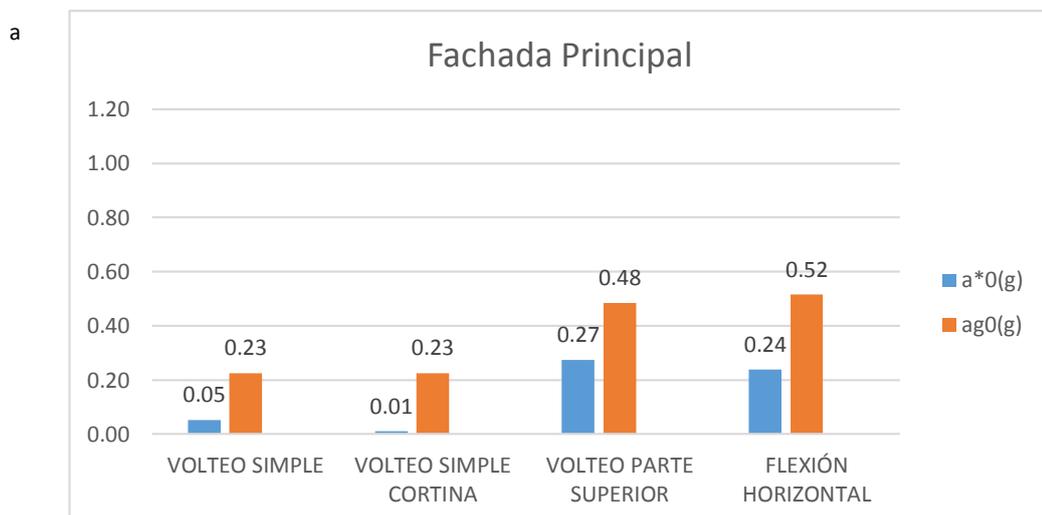


Figura 6.2. Comparación entre aporte de cada mecanismo al índice de vulnerabilidad en la fachada Los Judíos.

- Los resultados del análisis lineal o verificación lineal son distintos para las 3 fachadas. En la fachada Principal se observa que la aceleración espectral, “ $a^*0(g)$ ”, para el cual se activa cada tipo de mecanismo es menor a la aceleración del suelo que demanda la zona, “ $ag0(g)$ ”, eso quiere decir que al momento de un terremoto con $T_r= 450$ años, la fachada principal tendrá que incurrir en la etapa inelástica (Ver figura 6.3 a). Por otro lado, en la fachada Los Judíos la flexión horizontal es el único mecanismo que cumple con la verificación lineal, por lo tanto es muy poco probable que al ocurrir un sismo de gran magnitud este mecanismo se active (Ver figura 6.3 b). Finalmente, en la fachada Santa Apolonia, resulta que el mecanismo de volteo superior si cumple la verificación lineal, por lo cual es poco probable que se active en un terremoto. (Ver figura 6.3 c).



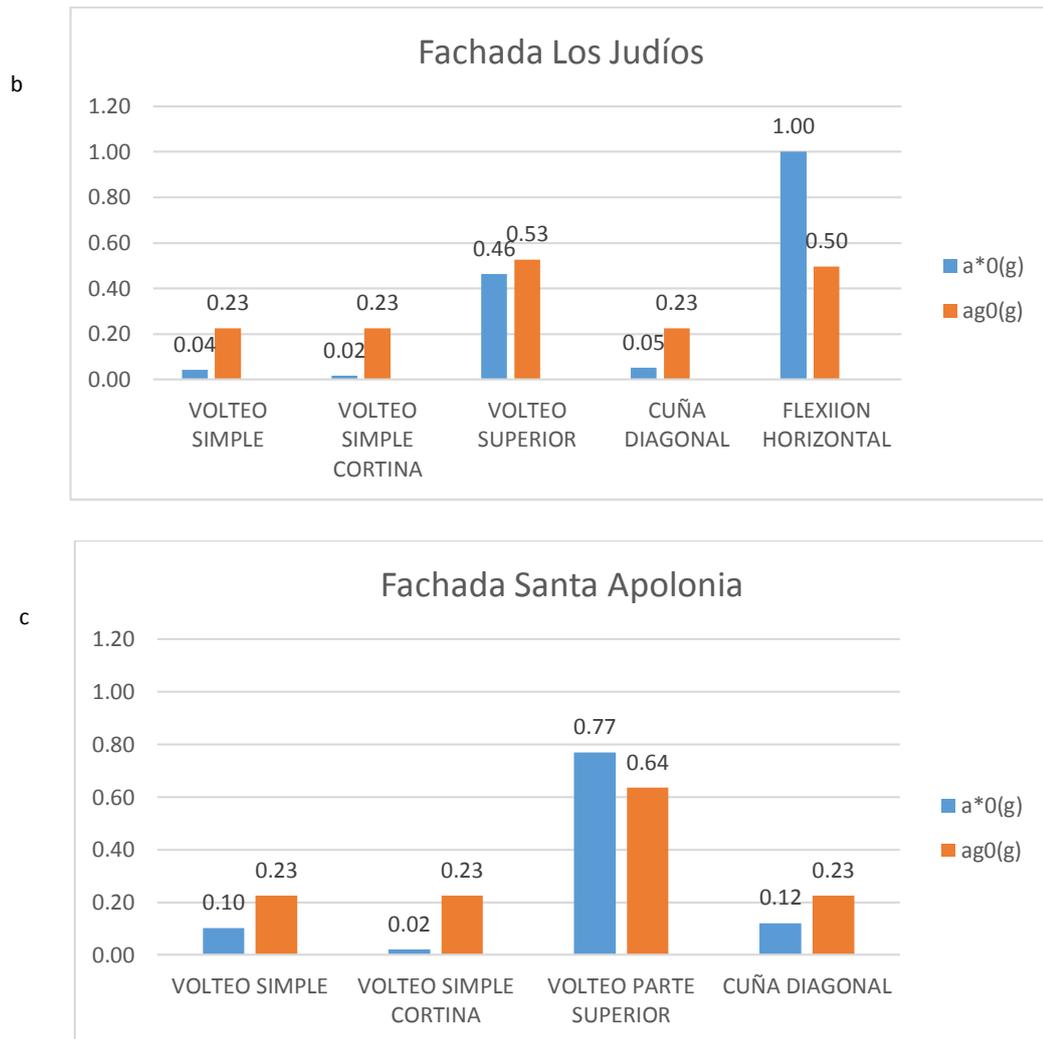


Figura 6.3. Verificación lineal de las fachadas de la catedral.

- Se observa una tendencia entre el factor de activación y la verificación lineal. Los mecanismos con mayor factor de activación tienen más posibilidad de cumplir la verificación lineal. Si el cociente entre a^*_0 / ag_0 es mayor a 1 entonces el mecanismo no se activará durante un sismo de gran magnitud.

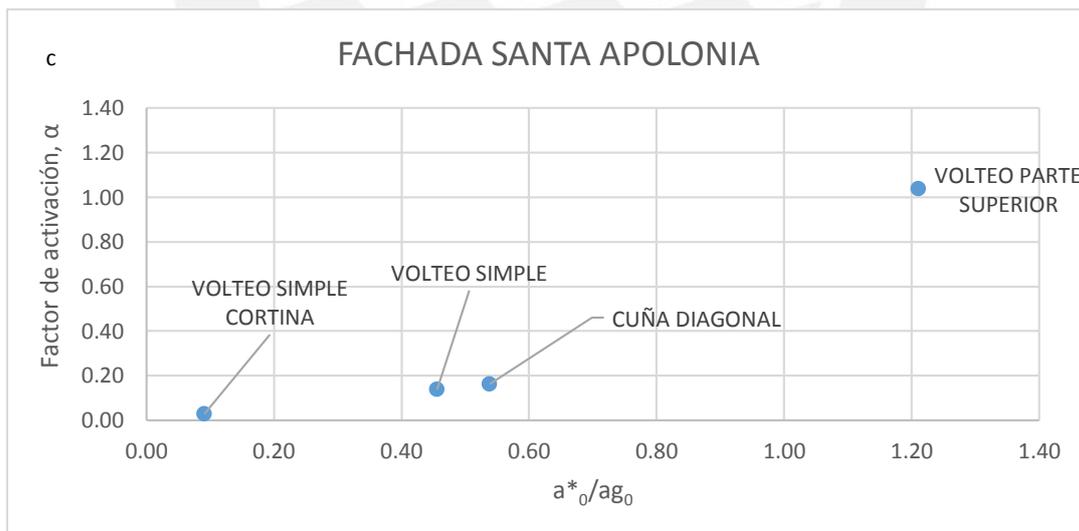
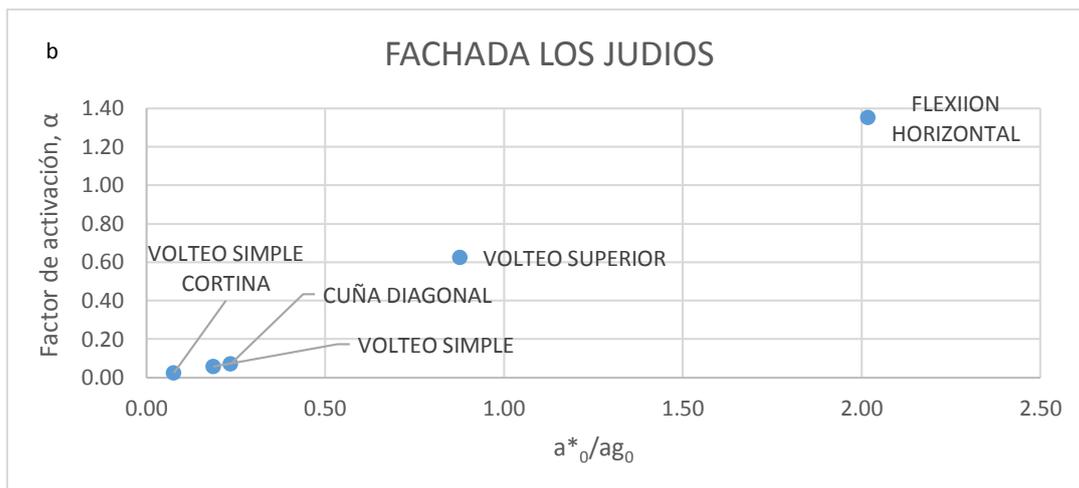
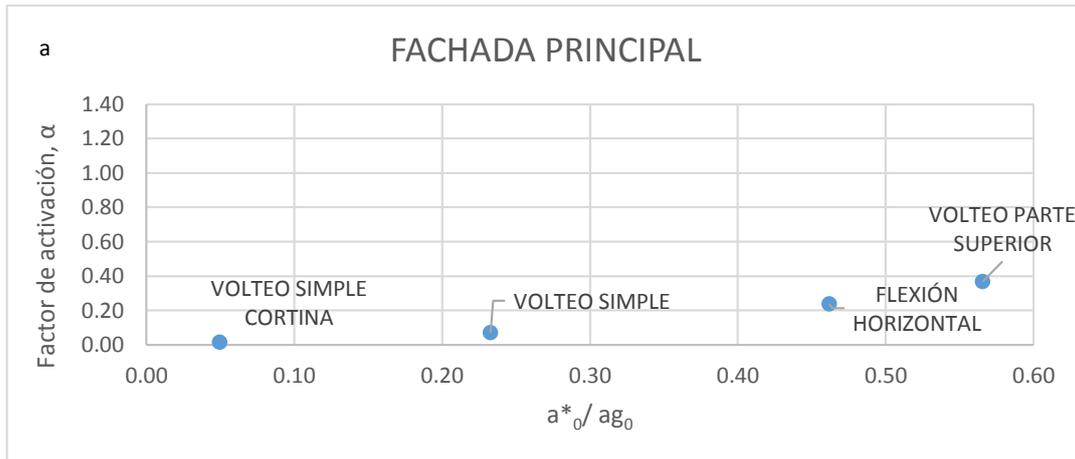
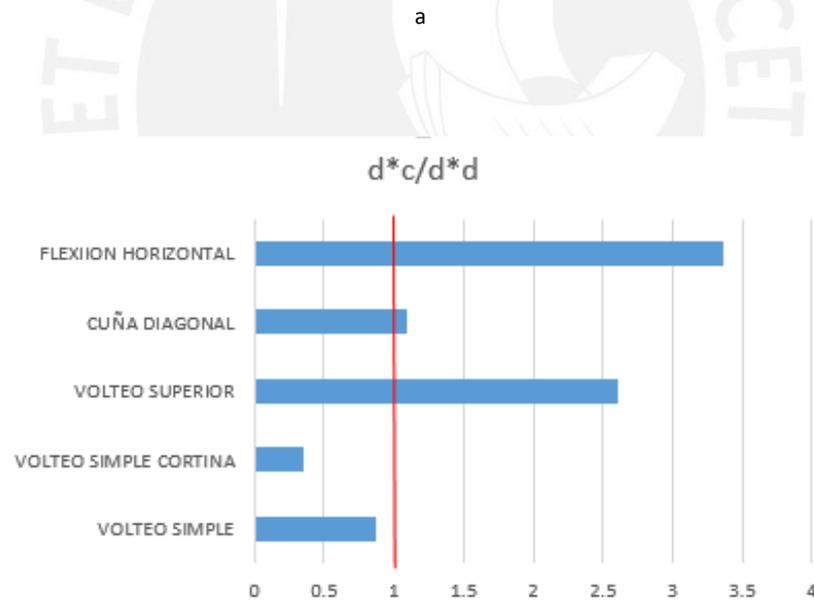
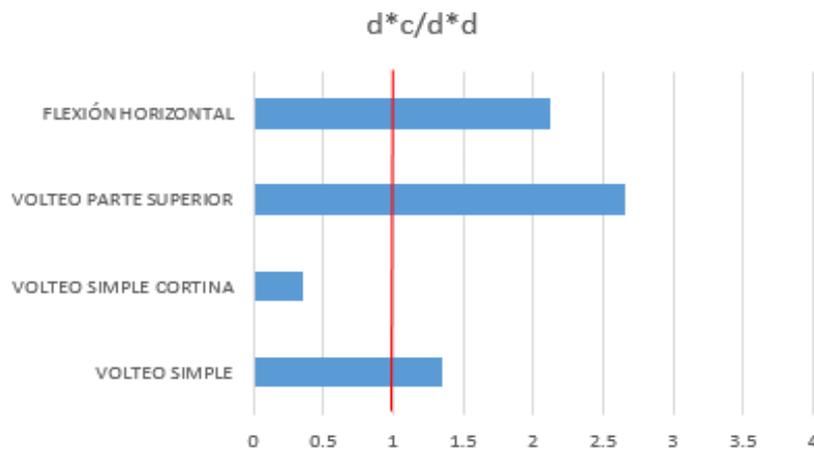


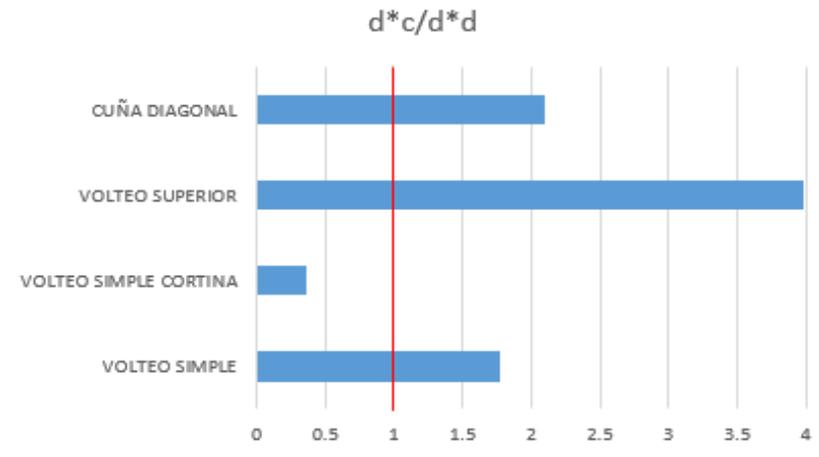
Figura 6.4. Factor de activación vs a^*/ag_0

- Como resultado del análisis cinemático no lineal, se puede concluir que el mecanismo más crítico fuera del plano es el volteo simple en muros tipo doble cortina. Esto es debido a su baja capacidad de desplazamiento y respuesta estructural, lo cual se refleja en las curvas de capacidad presentadas en el capítulo 5.4. En la Figura 6.5 se refleja la relación

entre capacidad de desplazamiento “ d^*_c ” y el desplazamiento de demanda d^*_d . Si el valor del cociente entre estos es mayor a 1, o la barra sobrepasa la línea vertical del gráfico, el mecanismo satisface la demanda del sitio, por lo tanto cumple la verificación no lineal y no colapsará. Cabe resaltar que las condiciones de borde de las 3 fachadas son distintas; por lo cual, se han analizado diferentes mecanismos para cada una.



b



c

Figura 6.5. Relación entre d^*/d^*_a en: a) Fachada principal. b) Fachada Los Judíos. c) Fachada Santa Apolonia.

- De acuerdo a los resultados obtenidos, vemos que en las tres fachadas la mayoría de mecanismos no cumplen con la verificación lineal. Esto es debido al material del cual están compuestos los elementos en análisis, ladrillos de arcilla con yeso, que tienen una etapa elástica casi nula. Por lo tanto, el análisis lineal sirve para hacer una evaluación rápida de los mecanismos que no se activarán y serán casos que no necesitarán una evaluación no lineal.
- Si bien el mecanismo de volteo simple en muros tipo doble cortina es el más crítico, es necesario para su activación que el elemento no tenga ninguna conexión en sus extremos. Esto es un caso muy ideal, por lo cual es muy común ver en estudios post sismos de edificaciones históricas que se activen otros tipos de mecanismos. Se puede observar entre las fallas más frecuentes los mecanismos de cuña diagonal, de flexión vertical y flexión horizontal.
- La geometría del elemento a analizar influye en el comportamiento estructural. Por ejemplo, la respuesta estructural de la fachada Santa Apolonia es mejor que la de la fachada Los Judíos. Esto es debido a que el espesor del primero es mayor, a pesar que ambas tengan una superficie frontal de dimensiones aproximadas.
- Es necesaria la intervención en las fachadas con la finalidad de mejorar su comportamiento estructural, instalando refuerzos que aumenten el confinamiento de los

muros, con el fin de conseguir un comportamiento similar a muros monolíticos y tengan una mejor respuesta estructural, como se ha visto en los resultados obtenidos.

- Otra medida para mejorar el desempeño estructural de las fachadas sería incluir contrafuertes o elementos conectores en la Fachada Principal y Santa Polonia, que restrinjan eficientemente el volteo en ambas direcciones del sismo y mejorar los contrafuertes existentes en la fachada Los Judíos; ya que en esta última, se observa que solo restringe el volteo en una de las direcciones.

6.2 Recomendaciones

- Los valores obtenidos de desplazamientos últimos son aproximados y solo sirven para dar una idea de las formas probables en las que los macro elementos analizados pueden colapsar.
- Se recomienda comparar los resultados con la aplicación de otras metodologías como las ecuaciones de Ayala (2003) y Restrepo (2004); que son más sofisticadas en cuanto a datos de ingreso, ya que se necesitan algunas propiedades mecánicas del material de construcción del edificio. El uso de las ecuaciones propuestas por estos autores nos dará un valor más exacto del factor de activación “ α ”; por ende, de la aceleración espectral “ $a*0$ ” y todos los elementos que dependan de esta.
- Para complementar este estudio, sería deseable realizar un análisis estructural de un modelo numérico FEM de la catedral de Lima, que sea calibrado a base de pruebas de vibración ambiental hechas in situ y así obtener conclusiones más específicas; sobre todo reconocer las zonas más frágiles de la catedral que se verán afectadas durante un sismo de gran magnitud.
- La evaluación cualitativa del nivel 1 de concientización es limitada, y solo se debe tomar como una referencia, ya que depende mucho del criterio personal de la persona que realiza la evaluación. Otro factor que limita el uso de la ficha de evaluación propuesta por el código italiano, es que ha sido elaborada con datos estadísticos obtenidos de estudios post sismo en edificaciones históricas de Italia, donde los parámetros sísmicos de zona son distintos a los peruanos, por ende, los efectos de los sismos son diferentes.
- Se recomienda realizar una idealización geométrica más detallada y tomar en cuenta los elementos arquitectónicos, ya que estos pueden ser factores que produzcan que los centros de gravedad de las fachadas no se encuentren en el centro del muro. Muy aparte de esto,

debe analizarse las conexiones de los elementos arquitectónicos con los muros estructurales, ya que son precarias y al ocurrir un sismo de gran magnitud pueden desprenderse y causar daños sorpresivos si es que no se les da la importancia debida.



7. REFERENCIAS

- Aguilar, R., Marques, R., Sovero, K., Martel, C., Trujillano, F. y Boroschek, R. (2015) Investigations on structural behaviour of archaeological heritage in Perú: From survey to seismic assessment. *Engineering Structures* 95, 94-111.
- ASSEMBLEA GENERALE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LL.PP. (2006) Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni. Roma.
- Ayala, D. y Speranza, E. (2003) Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, 3-30.
- Ayala, D. (2005). Force and displacement based vulnerability assessment for traditional buildings. *Bull Earthquake Engineering*, 235–265.
- Ayala, D. y Paganoni, S. (2011). Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009. *Bull Earthquake Engineering* 9(1), 81–104.
- Baker, J. y Heyman, J. (1969) *Plastic design of frames*. Cambridge, Inglaterra.
- Brando, G., Criber, E. y De Matteis, G. (2015) The effects of L'Aquila earthquake on the St. Gemma church in Goriano Sicoli: part II—fem analysis, *Bulleting Earthquake Engineering*, 13(12), 1-16.
- Criber, E., Brando, G. y De Matteis, G. (2015) The effects of L'Aquila earthquake on the St. Gemma church in Goriano Sicoli: part I—damage survey and kinematic analysis. *Bulleting Earthquake Engineering*, 13(12), 1-20.
- IL MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE. (2008). NTC 2008. Norma que regula la construcción de edificaciones en Italia. Roma.
- ITC, REGIONE MARCHE y UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'AQUILA. (2007). Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Aquila.

- Mendes, A. (2017). Metodología de evaluación visual rápida para determinar la vulnerabilidad sísmica en las iglesias coloniales: aplicaciones en Cusco (Tesis de pregrado en Ingeniería Civil). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.
- Peña, F. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas [monografía].
- REGIONE MOLISE COMMISSARIO DELEGATO. (2002). Decreto n.10. Approvazione “Protocollo di Progettazione per gli Interventi su Immobili Privati per la Ricostruzione Post-Sisma redatti in attuazione della Direttiva Tecnica del C.T.S. approvata con Decreto Commissariale n. 35/2005”. Molise.
- RELUIS. (s/f). Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso local negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi. Italia.
- Restrepo, L. (2004). Seismic Risk of Unreinforced Masonry Buildings (Tesis de doctorado de Filosofia en Ingeniería Sísmica) University of Pavia and ROSE School, Italia.
- Roca, P., Cervera, M., Gariup, G. y Pela, L. (2010) Structural Analysis of Masonry Historical Constructions. Classical and Advanced Approaches. Archives of Computational Methods in Engineering, 2-24.

8. ANEXOS

ANEXO 01

28 MECANISMOS DE COLAPSO PROPUESTOS POR EL CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN ITALIANO

ANEXO 02

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

ANEXO 03

ANÁLISIS CINEMÁTICO, VERIFICACIÓN LINEAL Y NO LINEAL



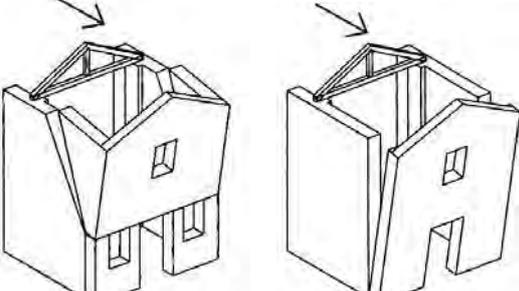
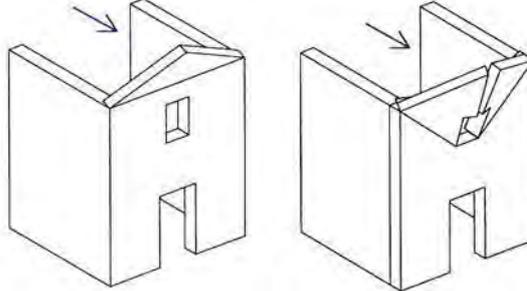
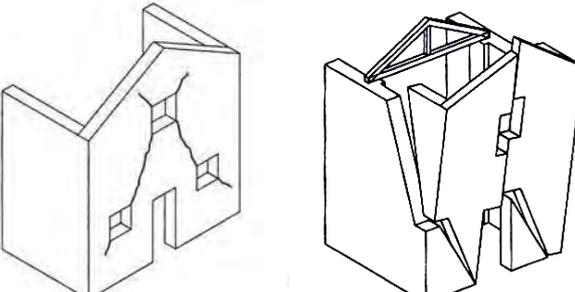
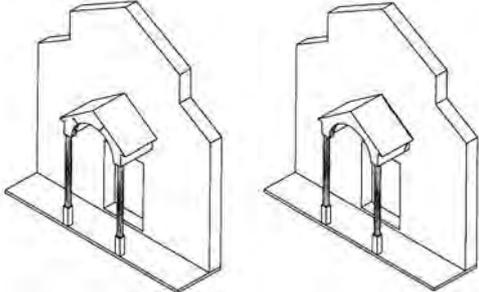
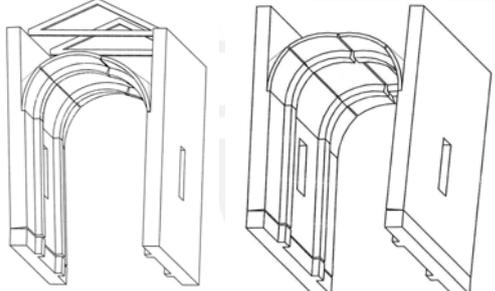
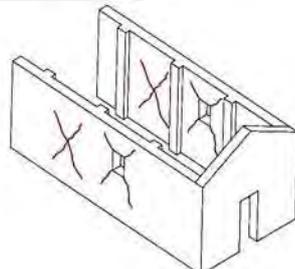
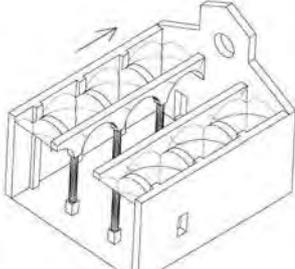
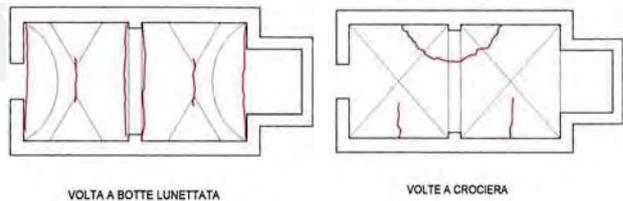
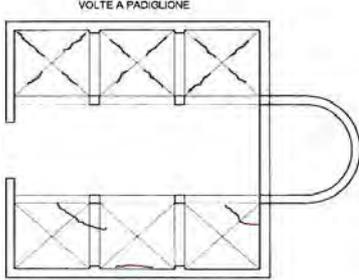


ANEXO 01

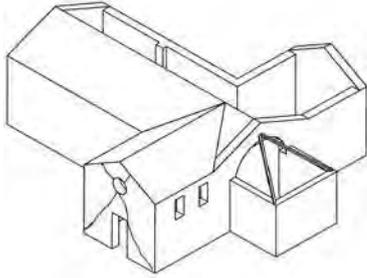
28 MECANISMOS DE COLAPSO

NTC ITALIANA 2008

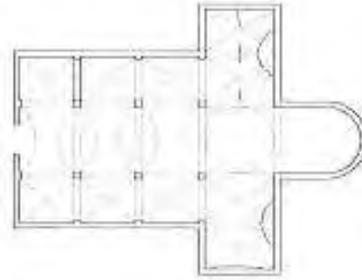
ABACO DEI MECCANISMI DI COLLASSO DELLE CHIESE

<p>1. RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA</p> 	<p>2. MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA</p> 
<p>3. MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA</p> 	<p>4 - PROTIRO - NARTECE</p> 
<p>5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA</p> 	<p>6 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)</p> 
<p>7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO</p> 	<p>8 - VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE</p>  <p style="text-align: center;">VOLTA A BOTTE LUNETTATA VOLTE A CROCIERA</p>
<p>9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI</p>  <p style="text-align: center;">VOLTE A PADIGLIONE</p> <p style="text-align: center;">VOLTE A CROCIERA</p>	<p>10 - RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO</p> 

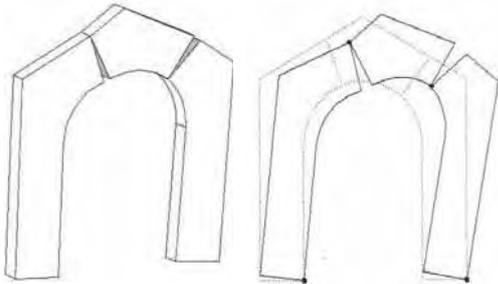
11 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO



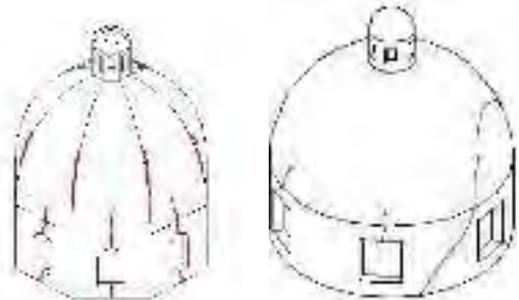
12 - VOLTE DEL TRANSETTO



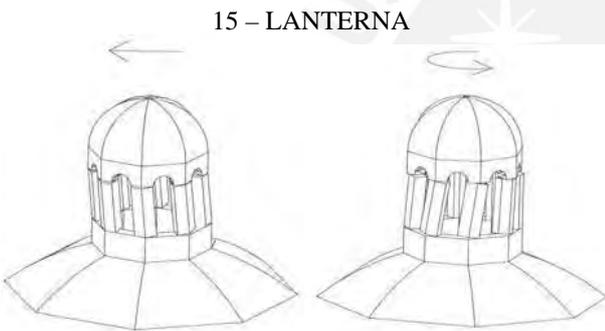
13 - ARCHI TRIONFALI



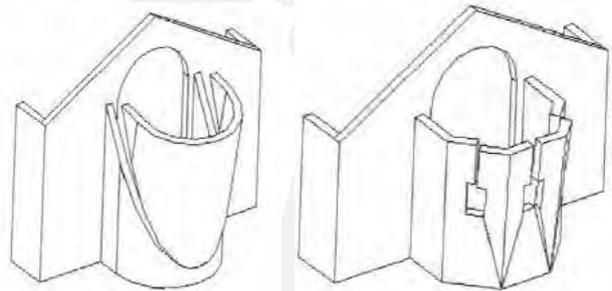
14 - CUPOLA - TAMBURO / TIBURIO



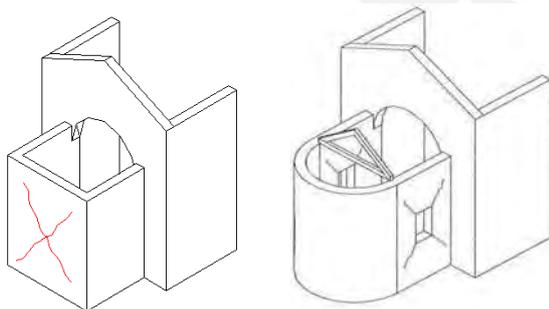
15 - LANTERNA



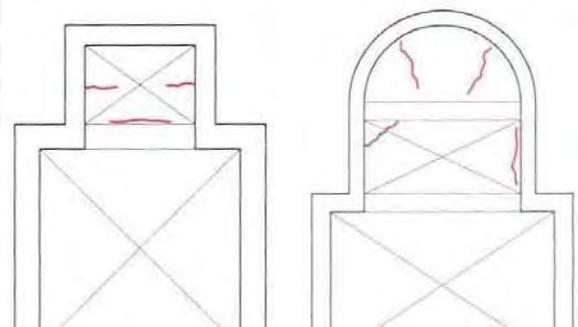
16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE



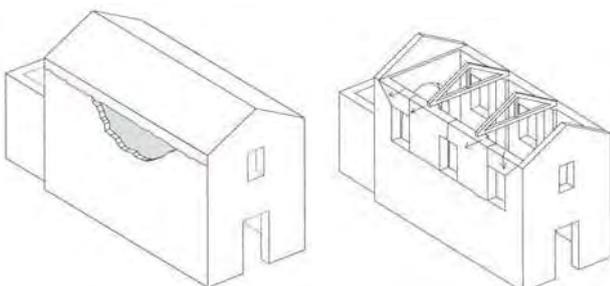
17 - MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE



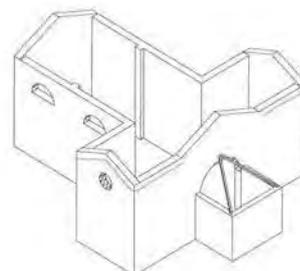
18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE



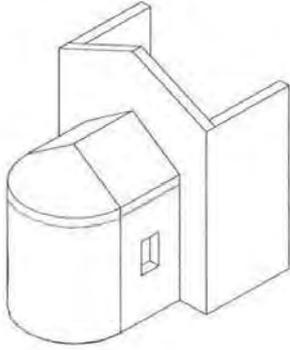
19 - ELEMENTI DI COPERTURA: AULA



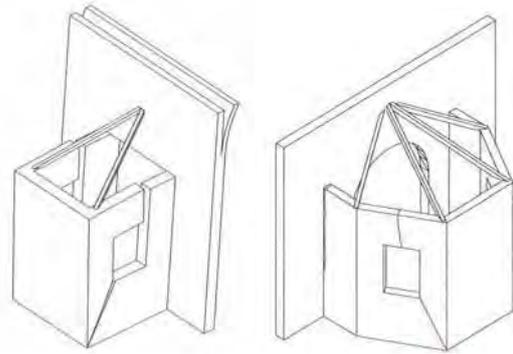
20 - ELEMENTI DI COPERTURA: TRANSETTO



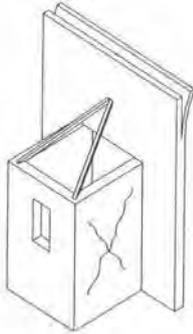
21 - ELEMENTI DI COPERTURA: ABSIDE



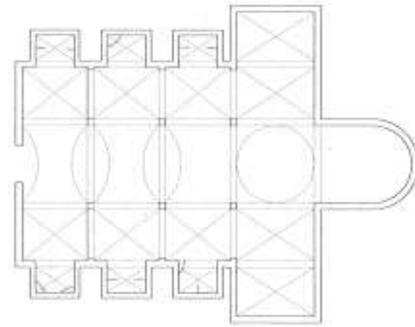
22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE



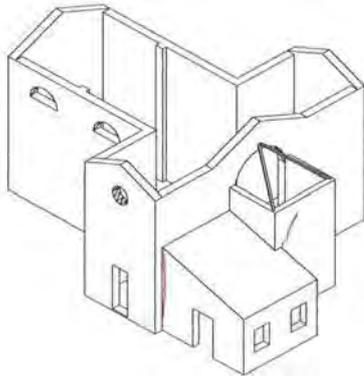
23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE CAPPELLE



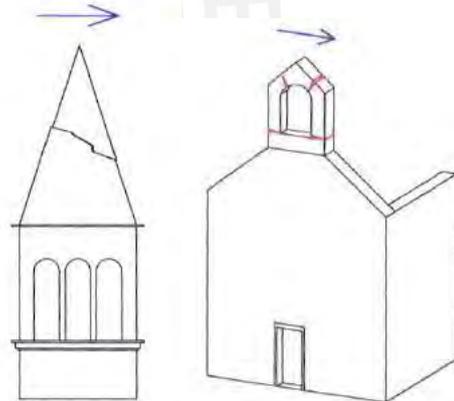
24 - VOLTE DELLE CAPPELLE



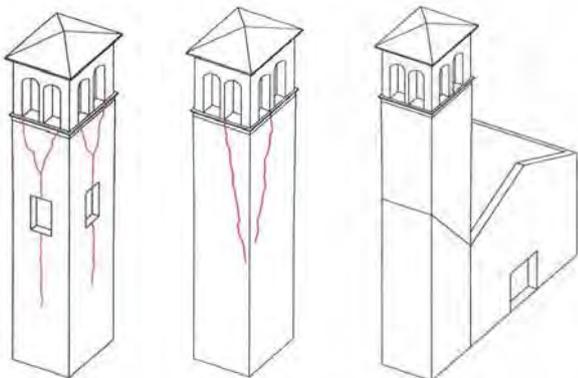
25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITA' DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE



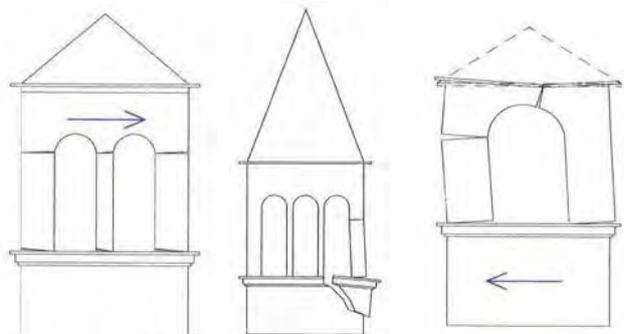
26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)



27 - TORRE CAMPANARIA



28 - CELLA CAMPANARIA





ANEXO 02

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

FICHA DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD EN IGLESIAS FACHADA PRINCIPAL

Proyecto: Evaluación de mecanismos de colapso generados por acciones sísmicas en la Catedral de Lima

MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación de la fachada.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre la fachada y los muros laterales de la nave	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (apoyos, bóvedas, arcos)	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas en los muros laterales cerca de la esquina	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 2: MECANISMO SOBRE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales con los elementos de cubierta	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de elementos de sujeción del plano	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, viga de c.a.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de un tímpano de gran tamaño y peso	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes de c.a. de grandes dimensiones, cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 3: MECANISMO EN EL PLANO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo al muro frontal	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación del muro	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Elevada esbeltez de la fachada (relación ancho/alto)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 4: NÁRTEX		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo o tirante paralelo a las fachada o muros longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de columnas de rigidez adecuada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (arcos, bóvedas)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 5: RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes externos que eviten la rotación de los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un cuerpo adyacente	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes paralelos a la fachada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de elevada esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arcos y bóvedas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento ligero (metal reticulado, mampostería reforzada o c.a.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas o mampostería de espesor reducido (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento rígido (c.a.), cubierta pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 7: RESPUESTA LONGITUDINAL DE COLUMNAS EN LA NAVE DE LA IGLESIA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo a muros longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes y/o edificios en las fachadas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas pesadas en la nave central	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cobertura pesada de concreto armado o refuerzo rígido de espesor considerable.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 8: BOVEDA DE LA NAVE CENTRAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>

MECANISMO 9: BÓVEDAS DE LA NAVES LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 10: VOLTEO DE MUROS DEL EXTREMO DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo longitudinal	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, otros edificios)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena conexión con la cobertura (refuerzo perimetral)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y los laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, vigas en c.a., cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el muro frontal (roseta) y/o en los muros laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una vela de gran tamaño y peso	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 11: MECANISMO DE CORTE EN LOS MUROS DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 12: BÓVEDA DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 13: ARCO TRIUNFAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de contraste efectivos (relación luz/ancho de la nave, transepto, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de apoyos bien contruidos y/o adecuado espesor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tímpano superior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cúpula o tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 14: CÚPULA - TAMBOR		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un borde circular externo, incluso en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia en el tambor de contrafuerte exterior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cúpula apoyada directamente en los arcos de triunfo (sin tambor)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 15: LINTERNA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo externo	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilastras o contrafuertes	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Dimensiones más pequeñas que las de la cúpula	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Linterna de elevada esbeltez, con grandes aberturas y pequeños pilares	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 16: VOLTEO DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en el contorno (semicircular, poligonal y rectangular)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, cuerpos adyacentes, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta de contrapeso, sin empuje	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas empujando	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Borde rígido, cubierta pesada, vigas de techo de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 17: MECANISMOS DE CORTE EN EL PRESBITERIO O EN EL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquivadros en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 18: BÓVEDA DEL PRESBITERIO O DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones de la viga a la mampostería	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 20: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 21: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - ÁBSIDE Y PRESBITERIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 22: VOLTEO DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, edificios contiguos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes y refuerzos en el perímetro	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 23: MECANISMOS DE CORTE EN MUROS DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquitrabes en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 24: BÓVEDA DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	La presencia de refuerzo horizontal en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 25: IRREGULARIDAD EN PLANTA - ALTURA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una conexión adecuada entre mampostería de diferentes fases	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales de conexión	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una elevada diferencia de rigidez entre los dos cuerpos	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posibilidad de acciones concentradas transmitidas por el elemento de enlace	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 26: VOLADIZOS (VELAS, CHAPITELES, PINÁCULOS, ESTATUAS)		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pasadores de conexión con la mampostería o elementos de retención	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de limitada importancia y tamaño	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería monolítica (de buena calidad)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de alta esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posición asimétrica con respecto al elemento subyacente (masa considerable del voladizo)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 27: TORRE DE CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales a diferentes alturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una distancia adecuada de los muros de la iglesia (si es adyacente)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buena conexión con los muros de la iglesia (si están incrustadas)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas significativas en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Restricción asimétrica en las paredes de la base (torre incorporada)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Apoyo irregular de la torre con el suelo (presencia de arcos en algunos lados)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 28: CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilares rígidos y/o arcos de luz reducida	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo metálico	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una cobertura pesada u otras masas significativas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de empuje estático de la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE LA FACHADA PRINCIPAL			
MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.75	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0.38
V_{ki}	3		
V_{kp}	0		
MECANISMO 2: SOBRE LA FACHADA			
ρ_k	0.7	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0
V_{ki}	1		
V_{kp}	1		
MECANISMO 3: EN EL PLANO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.65	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0.11
V_{ki}	1		
V_{kp}	0		
MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES			
ρ_k	0.7	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0.12
V_{ki}	2		
V_{kp}	1		
MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE			
ρ_k	0.7	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0
V_{ki}	1		
V_{kp}	1		
$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \frac{\sum \rho_k (V_{ki} - V_{kp}) / l}{\sum \rho_k} + \frac{1}{2} \frac{\sum \rho_k}{iv}$			
		$\sum \rho_k (V_{ki} - V_{kp}) / l$	0.6
		$\sum \rho_k$	3.5
		iv	0.67

FICHA DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD EN IGLESIAS FACHADA JUDIOS

Proyecto: *Evaluación de mecanismos de colapso generados por acciones sísmicas en la Catedral de Lima*

MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres longitudinales
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación de la fachada.
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre la fachada y los muros laterales de la nave
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (apoyos, bóvedas, arcos)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas en los muros laterales cerca de la esquina
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 2: MECANISMO SOBRE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales con los elementos de cubierta
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de elementos de sujeción del plano
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, viga de c.a.)
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de un tímpano de gran tamaño y peso
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes de c.a. de grandes dimensiones, cobertura pesada de c.a.

MECANISMO 3: MECANISMO EN EL PLANO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo al muro frontal
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación del muro
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Elevada esbeltez de la fachada (relación ancho/alto)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 4: NÁRTEX		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo o tirante paralelo a las fachada o muros longitudinales
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de columnas de rigidez adecuada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (arcos, bóvedas)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 5: RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes externos que eviten la rotación de los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un cuerpo adyacente	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes paralelos a la fachada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de elevada esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arcos y bóvedas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento ligero (metal reticulado, mampostería reforzada o c.a.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas o mampostería de espesor reducido (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento rígido (c.a.), cubierta pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 7: RESPUESTA LONGITUDINAL DE COLUMNAS EN LA NAVE DE LA IGLESIA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo a muros longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes y/o edificios en las fachadas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas pesadas en la nave central	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cobertura pesada de concreto armado o refuerzo rígido de espesor considerable.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 8: BOVEDA DE LA NAVE CENTRAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 9: BÓVEDAS DE LA NAVES LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 10: VOLTEO DE MUROS DEL EXTREMO DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo longitudinal	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, otros edificios)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena conexión con la cobertura (refuerzo perimetral)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y los laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, vigas en c.a., cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el muro frontal (roseta) y/o en los muros laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una vela de gran tamaño y peso	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 11: MECANISMO DE CORTE EN LOS MUROS DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 12: BÓVEDA DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 13: ARCO TRIUNFAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de contraste efectivos (relación luz/ancho de la nave, transepto, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de apoyos bien contruidos y/o adecuado espesor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tímpano superior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cúpula o tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 14: CÚPULA - TAMBOR		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un borde circular externo, incluso en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia en el tambor de contrafuerte exterior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cúpula apoyada directamente en los arcos de triunfo (sin tambor)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 15: LINTERNA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo externo	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilastras o contrafuertes	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Dimensiones más pequeñas que las de la cúpula	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Linterna de elevada esbeltez, con grandes aberturas y pequeños pilares	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 16: VOLTEO DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en el contorno (semicircular, poligonal y rectangular)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, cuerpos adyacentes, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta de contrapeso, sin empuje	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas empujando	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Borde rígido, cubierta pesada, vigas de techo de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 17: MECANISMOS DE CORTE EN EL PRESBITERIO O EN EL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquitecros en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 18: BÓVEDA DEL PRESBITERIO O DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cubierta	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones de la viga a la mampostería	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cubierta.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 20: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA – TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cubierta	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 21: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - ÁBSIDE Y PRESBITERIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 22: VOLTEO DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, edificios contiguos)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes y refuerzos en el perímetro
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y laterales
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 23: MECANISMOS DE CORTE EN MUROS DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquitrabes en las aberturas
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 24: BÓVEDA DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	La presencia de refuerzo horizontal en una posición eficaz
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios

MECANISMO 25: IRREGULARIDAD EN PLANTA - ALTURA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una conexión adecuada entre mampostería de diferentes fases	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales de conexión	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una elevada diferencia de rigidez entre los dos cuerpos	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posibilidad de acciones concentradas transmitidas por el elemento de enlace	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 26: VOLADIZOS (VELAS, CHAPITELES, PINÁCULOS, ESTATUAS)		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pasadores de conexión con la mampostería o elementos de retención	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de limitada importancia y tamaño	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería monolítica (de buena calidad)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de alta esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posición asimétrica con respecto al elemento subyacente (masa considerable del voladizo)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 27: TORRE DE CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales a diferentes alturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una distancia adecuada de los muros de la iglesia (si es adyacente)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buena conexión con los muros de la iglesia (si están incrustadas)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas significativas en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Restricción asimétrica en las paredes de la base (torre incorporada)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Apoyo irregular de la torre con el suelo (presencia de arcos en algunos lados)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 28: CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilares rígidos y/o arcos de luz reducida	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo metálico	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una cobertura pesada u otras masas significativas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de empuje estático de la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE LA FACHADA LOS JUDIOS			
MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.9	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	0.15
V_{ki}	2		
V_{kp}	1		
MECANISMO 2: SOBRE LA FACHADA			
ρ_k	0.85	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	0.14
V_{ki}	1		
V_{kp}	0		
MECANISMO 3: EN EL PLANO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.6	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	0
V_{ki}	1		
V_{kp}	1		
MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES			
ρ_k	0.6	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	0.1
V_{ki}	1		
V_{kp}	0		
MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE			
ρ_k	0.7	$\rho_k \cdot (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	-0.12
V_{ki}	0		
V_{kp}	1		
$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$		$\sum \rho_k (V_{ki} - V_{kp}) / 6$	0.28
		$\sum \rho_k$	3.65
		i_v	0.58

FICHA DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD EN IGLESIAS - FACHADA SANTA POLONIA

Proyecto: Evaluación de mecanismos de colapso generados por acciones sísmicas en la Catedral de Lima

MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación de la fachada.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre la fachada y los muros laterales de la nave	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (apoyos, bóvedas, arcos)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas en los muros laterales cerca de la esquina	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 2: MECANISMO SOBRE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales con los elementos de cubierta	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de elementos de sujeción del plano	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, viga de c.a.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de un tímpano de gran tamaño y peso	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes de c.a. de grandes dimensiones, cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 3: MECANISMO EN EL PLANO DE LA FACHADA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo al muro frontal	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de edificios, contrafuertes que impiden la rotación del muro	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Elevada esbeltez de la fachada (relación ancho/alto)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 4: NÁRTEX		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo o tirante paralelo a las fachada o muros longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de columnas de rigidez adecuada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos empujadores (arcos, bóvedas)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 5: RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes externos que eviten la rotación de los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un cuerpo adyacente	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes paralelos a la fachada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de elevada esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arcos y bóvedas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento ligero (metal reticulado, mampostería reforzada o c.a.)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas o mampostería de espesor reducido (rosetas)	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de confinamiento rígido (c.a.), cubierta pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 7: RESPUESTA LONGITUDINAL DE COLUMNAS EN LA NAVE DE LA IGLESIA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo paralelo a muros longitudinales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes y/o edificios en las fachadas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas pesadas en la nave central	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cobertura pesada de concreto armado o refuerzo rígido de espesor considerable.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 8: BOVEDA DE LA NAVE CENTRAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 9: BÓVEDAS DE LA NAVES LATERALES		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 10: VOLTEO DE MUROS DEL EXTREMO DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo longitudinal	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, otros edificios)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena conexión con la cobertura (refuerzo perimetral)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y los laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, vigas en c.a., cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el muro frontal (roseta) y/o en los muros laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una vela de gran tamaño y peso	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 11: MECANISMO DE CORTE EN LOS MUROS DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de travesaños o dinteles en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 12: BÓVEDA DEL TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 13: ARCO TRIUNFAL		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de muros de contraste efectivos (relación luz/ancho de la nave, transepto, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de apoyos bien contruidos y/o adecuado espesor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tímpano superior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cúpula o tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 14: CÚPULA - TAMBOR		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un borde circular externo, incluso en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia en el tambor de contrafuerte exterior	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Cúpula apoyada directamente en los arcos de triunfo (sin tambor)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cobertura pesada de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el tambor	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 15: LINTERNA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo externo	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilastras o contrafuertes	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Dimensiones más pequeñas que las de la cúpula	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Linterna de elevada esbeltez, con grandes aberturas y pequeños pilares	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 16: VOLTEO DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en el contorno (semicircular, poligonal y rectangular)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, cuerpos adyacentes, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta de contrapeso, sin empuje	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas empujando	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Borde rígido, cubierta pesada, vigas de techo de c.a.	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 17: MECANISMOS DE CORTE EN EL PRESBITERIO O EN EL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquitrabes en las aberturas
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 18: BÓVEDA DEL PRESBITERIO O DEL ÁBSIDE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en una posición eficaz
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios

MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones de la viga a la mampostería
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura.
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 20: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA – TRANSEPTO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si	No	Protección sísmica
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura
Si	No	Indicador de vulnerabilidad
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MECANISMO 21: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - ÁBSIDE Y PRESBITERIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones puntuales de la viga a la mampostería	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de arriostres (elementos cruzados o tirantes metálicos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones de los elementos de cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cubierta que genere empuje estático	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cobertura pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 22: VOLTEO DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, edificios contiguos)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes y refuerzos en el perímetro	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Buena calidad en la unión entre el muro frontal y laterales	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas en los muros	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 23: MECANISMOS DE CORTE EN MUROS DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquivados en las aberturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes ligeros (metal reticulado, mampostería reforzada, otros)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de bordes rígidos, cubierta pesada	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes o áreas con mampostería de espesor reducido	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 24: BÓVEDA DE LA CAPILLA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	La presencia de refuerzo horizontal en una posición eficaz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de lunetas de dimensiones considerables	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Bóveda delgada, especialmente si están en grandes espacios	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 25: IRREGULARIDAD EN PLANTA - ALTURA		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una conexión adecuada entre mampostería de diferentes fases	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales de conexión	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una elevada diferencia de rigidez entre los dos cuerpos	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posibilidad de acciones concentradas transmitidas por el elemento de enlace	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 26: VOLADIZOS (VELAS, CHAPITELES, PINÁCULOS, ESTATUAS)		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pasadores de conexión con la mampostería o elementos de retención	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de limitada importancia y tamaño	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería monolítica (de buena calidad)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Elementos de alta esbeltez	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Posición asimétrica con respecto al elemento subyacente (masa considerable del voladizo)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 27: TORRE DE CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzos horizontales a diferentes alturas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una distancia adecuada de los muros de la iglesia (si es adyacente)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de buena conexión con los muros de la iglesia (si están incrustadas)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas significativas en múltiples niveles	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Restricción asimétrica en las paredes de la base (torre incorporada)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Apoyo irregular de la torre con el suelo (presencia de arcos en algunos lados)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

MECANISMO 28: CAMPANARIO		
Presencia del macroelemento relacionado al mecanismo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
Si No	Protección sísmica	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de pilares rígidos y/o arcos de luz reducida	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo metálico	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Si No	Indicador de vulnerabilidad	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de una cobertura pesada u otras masas significativas	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Presencia de empuje estático de la cobertura	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE LA FACHADA SANTA APOLONIA			
MECANISMO 1: VOLTEO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.8	$\rho_k*(V_{ki}-V_{kp})/6$	0.27
V_{ki}	3		
V_{kp}	1		
MECANISMO 2: SOBRE LA FACHADA			
ρ_k	0.75	$\rho_k*(V_{ki}-V_{kp})/6$	0.13
V_{ki}	2		
V_{kp}	1		
MECANISMO 3: EN EL PLANO DE LA FACHADA			
ρ_k	0.7	$\rho_k*(V_{ki}-V_{kp})/6$	0.12
V_{ki}	1		
V_{kp}	0		
MECANISMO 6: MECANISMO DE CORTE EN MUROS LATERALES			
ρ_k	0.7	$\rho_k*(V_{ki}-V_{kp})/6$	0
V_{ki}	1		
V_{kp}	1		
MECANISMO 19: MECANISMOS EN LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA - MUROS LATERALES DE LA NAVE			
ρ_k	0.7	$\rho_k*(V_{ki}-V_{kp})/6$	0
V_{ki}	1		
V_{kp}	1		
$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (V_{ki} - V_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$		$\sum \rho_k (V_{ki}-V_{kp})/6$	0.28
		$\sum \rho_k$	3.65
		i_v	0.58



ANEXO 03

ANÁLISIS CINEMÁTICO

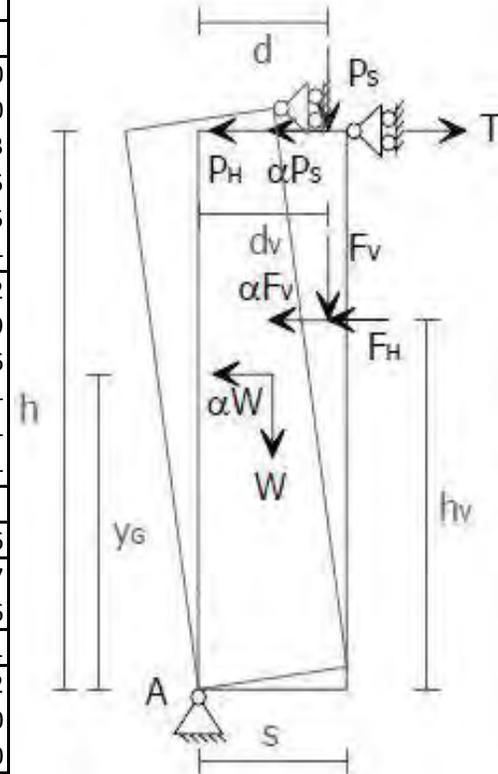
VERIFICACIÓN LINEAL

VERIFICACIÓN NO LINEAL

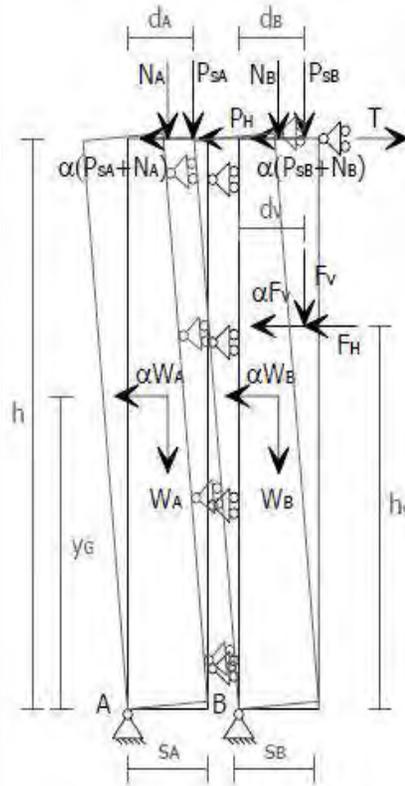


FACHADA PRINCIPAL

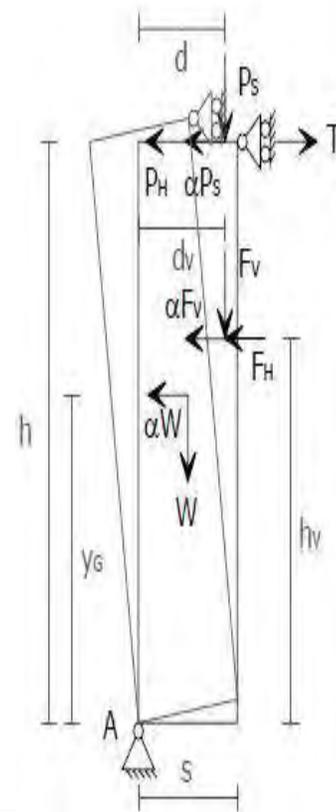
Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.900			
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	18.000			
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	12.373			
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	13.245			
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	1.475			
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-			
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	20632.412			
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	353.779			
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	132.496			
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-			
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-			
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-			
Resultados					
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	20122.616			
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	259970.647			
	Momento de voteo (Mr) [Kn.m]	1754.906			
Multiplicador de colapso (α)		0.071			
Aceleración	Masa participativa (M*)	2152.532			
	Factor de inclusión de masa (e*)	1.000			
	Facto de confianza (FC)	1.350			
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.052			
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	261725.553	Verificación no lineal		
	Pi*Sx,i^2	3243946.575			
	M*	2152.532			
	e*	1.000			
	a*0 (g)	0.052			
	a0g (g)	0.052			
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225			
	F.S estructura	0.233			
	ESPECTRO DE CAPACIDAD				
	PUNTOS NOTABLES				
Centro de masas (Yg) [m]			12.458		
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]			0.950		
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]			0.945		
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]			0.378		
Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]			0.438		
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]			0.219		
Aceleración límite elástico (a*y) [m]			0.026		
Desplazamiento elástico (d*y) [m]			5.84E-05		
Periodo fundamental (Ta) [s]			0.300		
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]			0.280		
F.S desplazamiento			1.352		
Resultado	NO CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



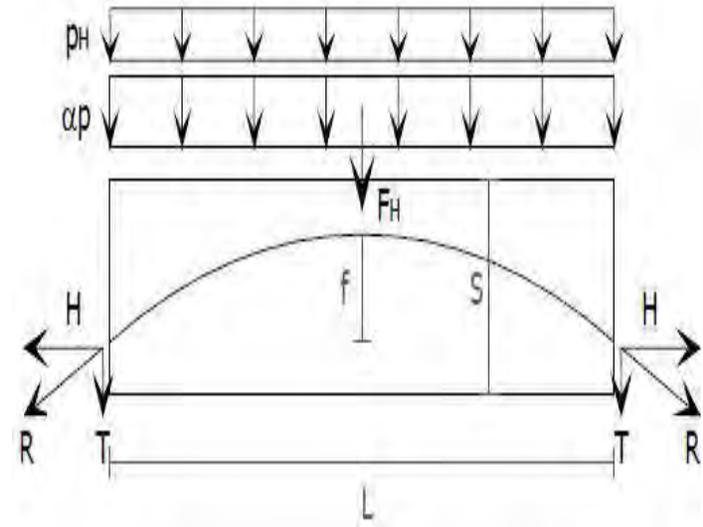
Mecanismo de vuelco simple - muro cortina				
Datos				
Geometría	Espesor del muro A (sa) [m]	0.500		
	Espesor del muro B (sb) [m]	0.500		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	18.000		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	12.373		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	13.245		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	1.475		
	Brazo horizontal cargas de bóvedasen A (da) [m]	-		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-		
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	10316.206		
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	10316.206		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	353.779		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	132.496		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-		
Resultados				
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	5679.928		
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	259970.647		
	Momento de vateo (Mr) [Kn.m]	1754.906		
Multiplicador de colapso (α)		0.015		
Aceleración	Masa participativa (M*)	2152.532		
	Factor de inclusión de masa (e*)	1.000		
	Facto de confianza (FC)	1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.011		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	261725.553	Verificación no lineal	
	Pi*Sx,i^2	3243946.575		
	M*	2152.532		
	e*	1.000		
	a*0 (g)	0.011		
	a0g (g)	0.011		
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		
	F.S estructura	0.050		
	ESPECTRO DE CAPACIDAD			
	PUNTOS NOTABLES			
	Centro de masas (Yg) [m]	12.735		
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.258			
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.251			
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.100			
Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.100			
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.050			
Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.007			
Desplazamiento elástico (d*y) [m]	1.54E-05			
Periodo fundamental (Ta) [s]	0.300			
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280			
F.S desplazamiento	0.359			
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	NO CUMPLE	



Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]		1.900		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]		5.000		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]		2.500		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]		3.070		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]		1.350		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]		-		
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]		5731.226		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]		150.920		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]		60.956		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]		-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]		-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]		-		
Resultados					
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		5648.406		
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]		14791.388		
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]		187.135		
Multiplicador de colapso (α)			0.369		
Aceleración	Masa participativa (M*)		604.757		
	Factor de inclusión de masa (e*)		0.998		
	Facto de confianza (FC)		1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)			0.274		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	14978.522	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	37817.067		PUNTOS NOTABLES	
	M*	604.757		Centro de masas (Yg) [m]	2.530
	e*	0.998		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.960
	a*0 (g)	0.274		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.958
	ag (g)	0.255		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.383
	Se(T1)¥(z)y/q (g)	0.484		Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.317
	F.S estructura	0.566		Desplazamiento límite de daño (d*d) [m]	0.158
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.127
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	0.000
				Periodo fundamental (Ta) [s]	0.300
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.144		
		F.S desplazamiento	2.655		
Resultado	NO CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



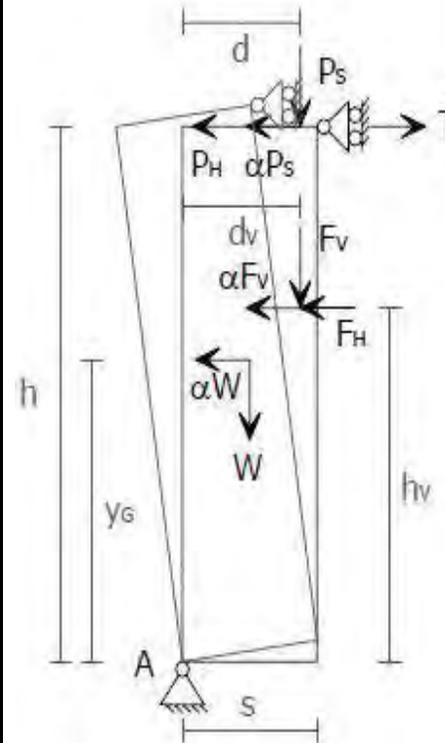
Mecanismo de flexión horizontal - confinada					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.900			
	Longitud del bloque (L) [m]	1.900			
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.000			
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_r) [Kn]	2200.000			
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	104.961			
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000			
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	60.956			
Resultados					
Multiplicador de colapso (α)		0.238			
Aceleración	Masa participativa (M*)	604.757			
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.998			
	Facto de confianza (FC)	1.350			
Aceleración espectral (a^*0)(g)		0.18			
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	29401.188	Verificación no lineal		
	Pi*Sx,i^2	251380.155			
	M*	350.534			
	e*	0.983			
	a*0 (g)	0.180			
	ag (g)	0.157			
	Se(T1)¥(z)y/q (g)	0.516			
	F.S estructura	0.348			
	ESPECTRO DE CAPACIDAD				
	PUNTOS NOTABLES				
	Centro de masas (Yg) [m]		1.455		
	Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]		0.960		
	Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]		0.978		
	Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]		0.391		
	Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]		0.307		
	Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]		0.154		
	Aceleración límite elástico (a*y) [m]		0.222		
	Desplazamiento elástico (d*y) [m]		0.001		
	Periodo fundamental (Ta) [s]		0.300		
	Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]		0.184		
	F.S desplazamiento		2.129		
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	SI CUMPLE		



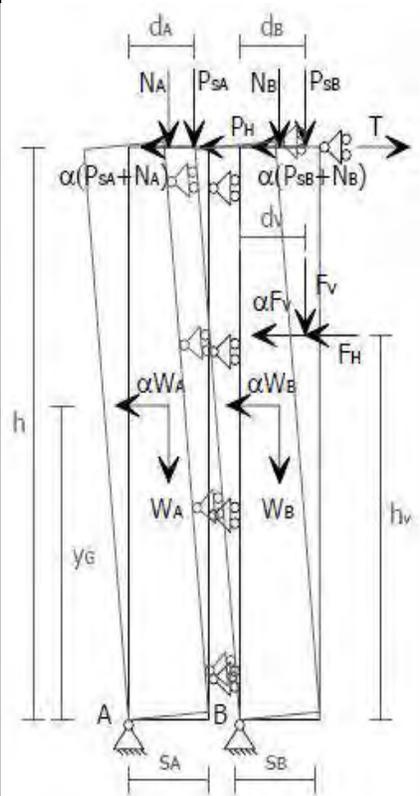


FACHADA LOS JUDÍOS

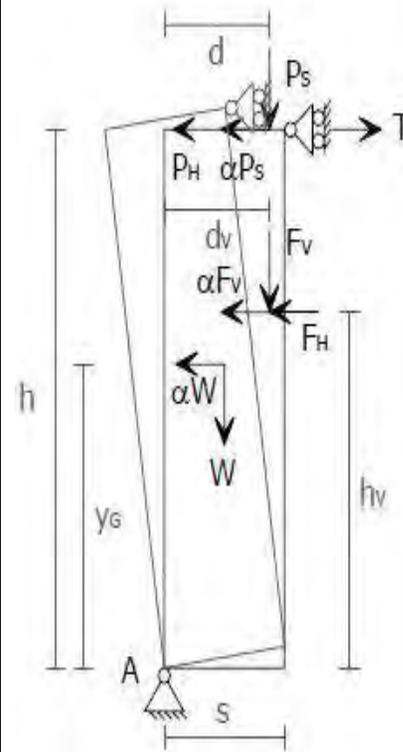
Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido				
Datos				
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	16.000		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	10.530		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	15.000		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.800		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-		
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	4443.579		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-		
Resultados				
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	2727.246		
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	47936.492		
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000		
Multiplicador de colapso (α)		0.057		
Aceleración	Masa participativa (M*)	459.394		
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.997		
	Facto de confianza (FC)	1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.000		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	47936.492	Verificación no lineal	
	Pi*Sx,i^2	509892.142		
	M*	459.394		
	e*	0.997		
	a*0 (g)	0.042		
	a0g (g)	0.042		
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		
	F.S estructura	0.188		
	ESPECTRO DE CAPACIDAD			
	PUNTOS NOTABLES			
	Centro de masas (Yg) [m]	10.606		
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.604			
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.606			
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.242			
Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.239			
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.120			
Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.019			
Desplazamiento elástico (d*y) [m]	3.41E-05			
Periodo fundamental (Ta) [s]	0.267			
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280			
F.S desplazamiento	0.867			
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	NO CUMPLE	



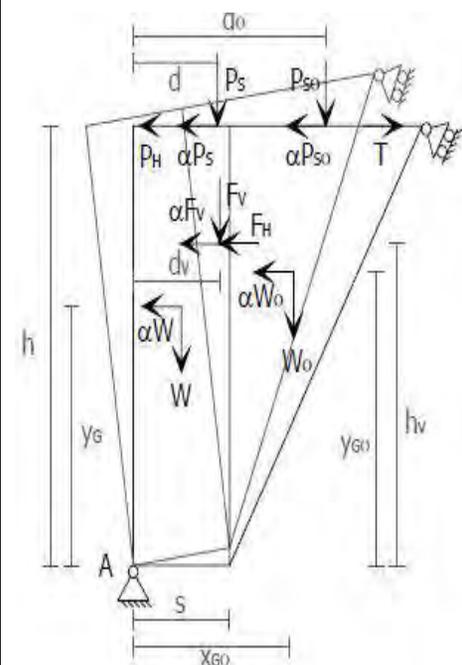
Mecanismo de vuelco simple - muro cortina				
Datos				
Geometría	Espesor del muro A (sa) [m]	0.500		
	Espesor del muro B (sb) [m]	0.500		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	16.000		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	10.530		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	15.000		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.000		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en A (da) [m]	-		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-		
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	2221.789		
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	2221.789		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-		
Resultados				
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	1110.895		
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	47936.492		
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000		
Multiplicador de colapso (α)		0.023		
Aceleración	Masa participativa (M*)	459.394		
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.997		
	Facto de confianza (FC)	1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.017		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	47936.492	Verificación no lineal	
	Pi*Sx,i^2	509892.142		
	M*	459.394		
	e*	0.997		
	a*0 (g)	0.017		
	a0g (g)	0.017		
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		
	F.S estructura	0.077		
	ESPECTRO DE CAPACIDAD			
	PUNTOS NOTABLES			
Centro de masas (Yg) [m]	10.530			
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.250			
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.250			
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.100			
Desplazamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.099			
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.050			
Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.008			
Desplazamiento elástico (d*y) [m]	1.42E-05			
Periodo fundamental (Ta) [s]	0.267			
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280			
F.S desplazamiento	0.358			
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	NO CUMPLE	



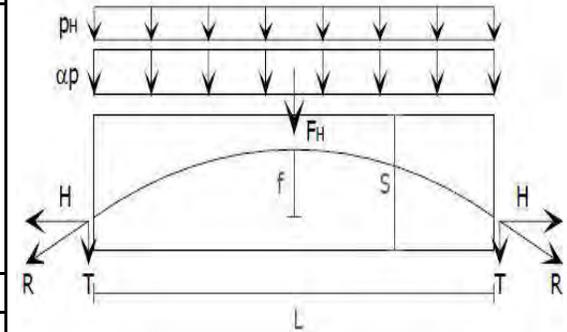
Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido				
Datos				
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	2.000		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	1.000		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	1.000		
	Brazo horizontal cargas de arcos y/o bóvedas (dv) [m]	0.800		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-		
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	555.447		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	76.374		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-		
Resultados				
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	394.368		
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	631.821		
	Momento de votoo (Mr) [Kn.m]	0.000		
Multiplicador de colapso (α)		0.624		
Aceleración	Masa participativa (M*)	64.406		
	Factor de inclusión de masa (e*)	1.000		
	Facto de confianza (FC)	1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.462		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	631.821	Verificación no lineal	
	Pi*Sx,i^2	631.821		
	M*	64.406		
	e*	1.000		
	a*0 (g)	0.462		
	ag (g)	0.395		
	Se(T1)z/q (g)	0.527		
	F.S estructura	0.877		
	ESPECTRO DE CAPACIDAD			
	PUNTOS NOTABLES			
Centro de masas (Yg) [m]		1.000		
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]		0.624		
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]		0.624		
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]		0.250		
Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]		0.200		
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]		0.100		
Aceleración límite elástico (a*y) [m]		0.200		
Desplazamiento elástico (d*y) [m]		0.000		
Periodo fundamental (Ta) [s]		0.267		
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]		0.096		
F.S desplazamiento		2.604		
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	SI CUMPLE	



Mecanismo de vuelco compuesto - cuña diagonal					
Datos					
Geometría	Espesor del muro frontal (s) [m]		1.200		
	Altura del muro frontal (entrepiso) (h) [m]		16.000		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]		-		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro frontal (d) [m]		-		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]		-		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro ortogonal (do) [m]		-		
	Distancia horizontal de A al baricentro del muro ortogonal (Xgo) [m]		1.533		
	Altura del baricentro del muro frontal (Yg) [m]		10.530		
Altura del baricentro del muro ortogonal (Ygo) [m]		10.667			
Cargas	Peso de la pared frontal (W) [Kn]		4443.579		
	Peso de cuña de liberación (Wo) [Kn]		903.166		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]		76.374		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]		-		
	Carga vertical por bóvedas en el muro frontal (Ps) [Kn]		-		
	Carga vertical por bóvedas en el muro ortogonal (Pso) [Kn]		-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]		-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]		-		
Resultados					
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		4112.101		
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]		57570.267		
	Momento de voteo (Mr) [Kn.m]		-		
		Multiplicador de colapso (α)	0.071		
Aceleración	Masa participativa (M*)		551.459		
	Factor de inclusión de masa (e*)		0.998		
	Facto de confianza (FC)		1.350		
		Aceleración espectral (a^*0)(g)	0.053		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	57570.267	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	612652.405		PUNTOS NOTABLES	
	M*	551.459		Centro de masas (Yg) [m]	10.616
	e*	0.998		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.758
	a*0 (g)	0.053		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.760
	a0g (g)	0.053		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.304
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		Desplazamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.265
	F.S estructura	0.236		Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.133
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.019
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	3.38E-05
		Periodo fundamental (Ta) [s]	0.267		
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280		
		F.S desplazamiento	1.087		
Resultado	NO CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



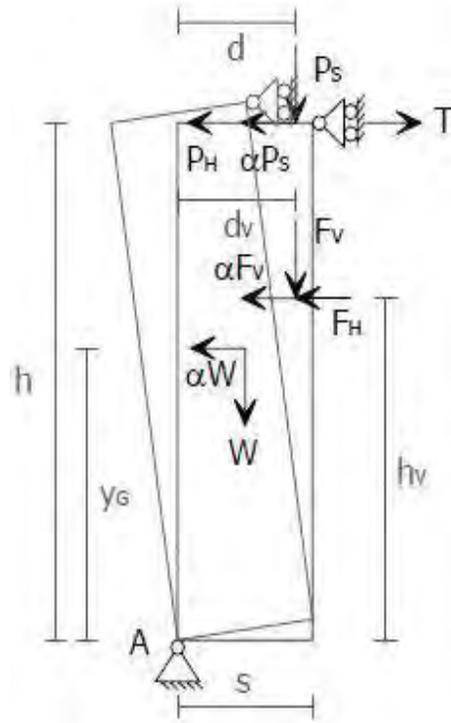
Mecanismo de flexión horizontal - confinado					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200			
	Longitud del bloque (L) [m]	1.200			
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.800			
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_r) [Kn]	2200.000			
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	86.259			
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000			
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	0.000			
Resultados					
Multiplicador de colapso (α)		1.351			
Aceleración	Masa participativa (M*)	107.579			
	Factor de inclusión de masa (e*)	1.000			
	Facto de confianza (FC)	1.350			
Aceleración espectral (a*0)(g)		1.001			
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	3461.548	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	11353.876		PUNTOS NOTABLES	
	M*	107.579		Centro de masas (Yg) [m]	1.961
	e*	1.000		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.614
	a*0 (g)	1.001		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.614
	ag (g)	0.909		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.245
	Se(T1)z(z)/q (g)	0.496		Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.206
	F.S estructura	2.019		Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.103
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.105
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	0.000
		Periodo fundamental (Ta) [s]	0.267		
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.073		
		F.S desplazamiento	3.364		
Resultado	SI CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



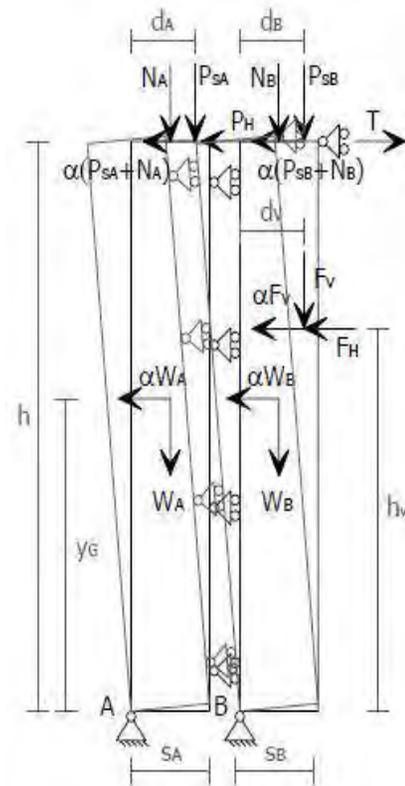
FACHADA SANTA APOLONIA



Mecanismo de vuelco simple - cuerpo rígido					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	2.450			
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	13.500			
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	8.900			
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	12.100			
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	2.000			
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-			
Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	7567.242			
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255			
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-			
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-			
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-			
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-			
Resultados					
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	9504.382			
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	68767.241			
	Momento de votoo (Mr) [Kn.m]	0.000			
Multiplicador de colapso (α)		0.138			
Aceleración	Masa participativa (M*)	781.831			
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.998			
	Facto de confianza (FC)	1.350			
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.103			
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	68767.241	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	616568.561		PUNTOS NOTABLES	
	M*	781.831		Centro de masas (Yg) [m]	8.949
	e*	0.998		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	1.237
	a*0 (g)	0.103		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	1.239
	a0g (g)	0.103		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.496
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.490
	F.S estructura	0.456		Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.245
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.046
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	5.86E-05
		Periodo fundamental (Ta) [s]	0.225		
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280		
		F.S desplazamiento	1.773		
Resultado	NO CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



Mecanismo de vuelco simple - muro cortina				
Datos				
Geometría	Espesor del muro A (sa) [m]	0.500		
	Espesor del muro B (sb) [m]	0.500		
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	13.500		
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	8.900		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	12.100		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	0.100		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en A (da) [m]	-		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en B (db) [m]	-		
Cargas	Peso del muro A (Wa) [Kn]	3783.621		
	Peso del muro B (Wb) [Kn]	3783.621		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-		
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-		
Resultados				
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	1903.536		
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]	68767.241		
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]	0.000		
Multiplicador de colapso (α)		0.028		
Aceleración	Masa participativa (M*)	781.831		
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.998		
	Facto de confianza (FC)	1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)		0.021		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	68767.241	Verificación no lineal	
	Pi*Sx,i^2	616568.561		
	M*	781.831		
	e*	0.998		
	a*0 (g)	0.021		
	a0g (g)	0.021		
	ag(Pvr)S/q (g)	0.225		
	F.S estructura	0.091		
	ESPECTRO DE CAPACIDAD			
	PUNTOS NOTABLES			
Centro de masas (Yg) [m]	8.900			
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.250			
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.250			
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.100			
Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.099			
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.050			
Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.009			
Desplazamiento elástico (d*y) [m]	1.20E-05			
Periodo fundamental (Ta) [s]	0.225			
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280			
F.S desplazamiento	0.358			
Resultado	NO CUMPLE	Resultado	NO CUMPLE	



Mecanismo de vuelco parte superior - cuerpo rígido

Datos

Geometría	Espesor del muro (s) [m]	2.450
	Altura del muro (entrepiso) (h) [m]	2.500
	Altura del centro del baricentro (Yg) [m]	1.250
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]	1.100
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]	2.000
	Brazo horizontal cargas de bóvedas (d) [m]	-

Cargas	Peso del muro (W) [Kn]	1401.341
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]	117.255
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]	-
	Carga vertical por bóvedas (Ps) [Kn]	-
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]	-
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]	-

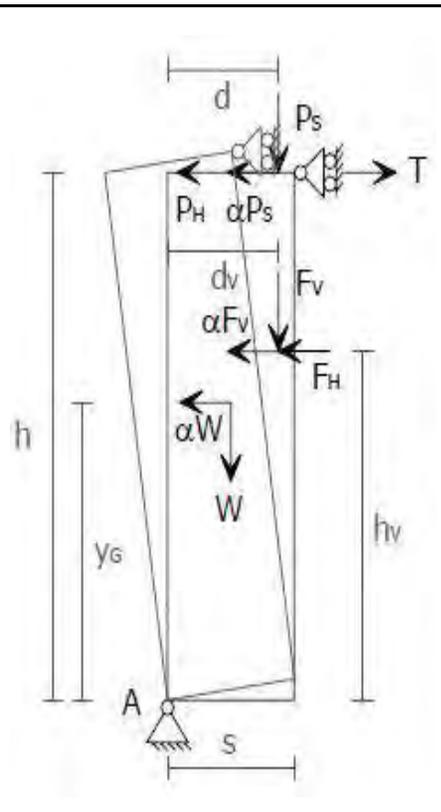
Resultados

Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]	1951.153
	Momento de volteo. $\alpha (Mr(\alpha))$ [Kn.m]	1880.657
	Momento de votoo (Mr) [Kn.m]	0.000

Multiplicador de colapso (α) 1.037

Aceleración	Masa participativa (M*)	154.639
	Factor de inclusión de masa (e*)	0.999
	Facto de confianza (FC)	1.350

Aceleración espectral (a*0)(g) 0.769

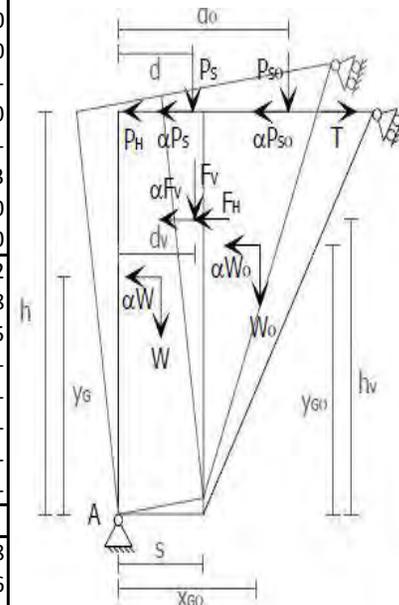


Verificación Lineal	Pi*Sx,i	1880.657	Verificación no lineal
	Pi*Sx,i^2	2331.474	
	M*	604.757	
	e*	0.998	
	a*0 (g)	0.769	
	ag (g)	0.545	
	Se(T1)¥(z)¥/q (g)	0.635	
	F.S estructura	1.211	

ESPECTRO DE CAPACIDAD	
PUNTOS NOTABLES	
Centro de masas (Yg) [m]	1.238
Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	1.285
Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	1.286
Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.514
Desplazamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.408
Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.204
Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.327
Desplazamiento elástico (d*y) [m]	0.001
Periodo fundamental (Ta) [s]	0.275
Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.129
F.S desplazamiento	3.979

Resultado SI CUMPLE Resultado SI CUMPLE

Mecanismo de vuelco compuesto - cuña diagonal					
Datos					
Geometría	Espesor del muro frontal (s) [m]		2.450		
	Altura del muro frontal (entrepiso) (h) [m]		13.500		
	Brazo vertical cargas de arcos (hv) [m]		12.100		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro frontal (d) [m]		-		
	Brazo horizontal cargas de arcos (dv) [m]		2.000		
	Brazo horizontal cargas de bóvedas en el muro ortogonal (do) [m]		-		
	Distancia horizontal de A al baricentro del muro ortogonal (Xgo) [m]		3.283		
	Altura del baricentro del muro frontal (Yg) [m]		8.900		
Altura del baricentro del muro ortogonal (Ygo) [m]		9.000			
Cargas	Peso de la pared frontal (W) [Kn]		7567.242		
	Peso de cuña de liberación (Wo) [Kn]		952.558		
	Fuerza vertical del arco (Fv) [Kn]		117.255		
	Fuerza horizontal del arco (Fh) [Kn]		-		
	Carga vertical por bóvedas en el muro frontal (Ps) [Kn]		-		
	Carga vertical por bóvedas en el muro ortogonal (Pso) [Kn]		-		
	Carga horizontal por bóvedas (Ph) [Kn]		-		
	Fuerza máxima del tirante (T) [Kn]		-		
Resultados					
Momentos	Momento estabilizante (Ms) [Kn.m]		12631.948		
	Momento de volteo. α (Mr(α)) [Kn.m]		77340.266		
	Momento de veteo (Mr) [Kn.m]		-		
Multiplicador de colapso (α)			0.163		
Aceleración	Masa participativa (M*)		878.930		
	Factor de inclusión de masa (e*)		0.998		
	Facto de confianza (FC)		1.350		
Aceleración espectral (a*0)(g)			0.769		
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	77340.266	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	693725.782		PUNTOS NOTABLES	
	M*	878.930		Centro de masas (Yg) [m]	8.954
	e*	0.998		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	1.462
	a*0 (g)	0.121		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	1.465
	ag (g)	0.121		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.586
	Se(T1)z(z)γ/q (g)	0.225		Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.542
	F.S estructura	0.539		Desplazamiento límite de daño (d*dl) [m]	0.271
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.046
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	0.000
		Periodo fundamental (Ta) [s]	0.225		
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.280		
		F.S desplazamiento	2.096		
Resultado	NO CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	



Mecanismo de flexión horizontal - confinado					
Datos					
Geometría	Espesor del muro (s) [m]	1.200			
	Longitud del bloque (L) [m]	1.200			
	Altura del bloque que sufrirá la flexión (b) [m]	3.800			
Cargas	Resistencia a la rotura de la mampostería (σ_r) [Kn]	2200.000			
	Carga vertical aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	89.479			
	Carga horizontal aplicada al elemento por unidad de longitud (p) [Kn]	0.000			
	Carga horizontal concentrada en un punto del elemento (Fh) [Kn]	0.000			
Resultados					
Multiplicador de colapso (α)		1.333			
Aceleración	Masa participativa (M*)	106.349			
	Factor de inclusión de masa (e*)	1.000			
	Facto de confianza (FC)	1.350			
Aceleración espectral (a^*0)(g)		0.99			
Verificación Lineal	Pi*Sx,i	3382.849	Verificación no lineal	ESPECTRO DE CAPACIDAD	
	Pi*Sx,i^2	10968.888		PUNTOS NOTABLES	
	M*	106.349		Centro de masas (Yg) [m]	1.991
	e*	1.000		Desplazamiento de centro de masas (dk) [m]	0.622
	a*0 (g)	0.987		Max Desplazamiento espectral (d*0) [m]	0.622
	ag (g)	0.896		Desplazamiento último real del sistema (d*c) [m]	0.249
	Se(T1)z(z)/q (g)	0.496		Desplzamiento de estado límite (d*nc) [m]	0.210
	F.S estructura	1.992		Desplazamiento límite de daño (d*dI) [m]	0.105
				Aceleración límite elástico (a*y) [m]	0.105
				Desplazamiento elástico (d*y) [m]	0.000
		Periodo fundamental (Ta) [s]	0.267		
		Demanda de desplazamiento espectral (d*d) [m]	0.073		
		F.S desplazamiento	3.394		
Resultado	SI CUMPLE		Resultado	SI CUMPLE	

