



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL PATRIMONIO CULTURAL
CHILENO: ESTUDIO DE IGLESIAS PATRIMONIALES DE VALPARAÍSO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

GUILLERMO IGNACIO GONZALEZ TAPIA

PROFESOR GUÍA:

ADOLFO OCHOA LLANGATO

PROFESORA CO-GUÍA:

JULIETTE MARÍN RÍOS

COMISIÓN

RUBÉN BOROSCHEK KRAUSKOPF

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: GUILLERMO IGNACIO GONZÁLEZ TAPIA
FECHA: 01/12/2020
PROFESOR GUIA: ADOLFO OCHOA LLANGATO

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL PATRIMONIO CULTURAL CHILENO: ESTUDIO DE IGLESIAS PATRIMONIALES DE VALPARAÍSO”

En el contexto de la conservación patrimonial en Chile, se requiere contar con un plan de acción ante desastres, que evite el deterioro del patrimonio cultural inmueble. En ese sentido, la ingeniería estructural se hace cargo del estudio de estas construcciones de manera de garantizar su conservación, principalmente ante la acción sísmica. Hoy en día la manera de evaluar la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras presenta una serie de dificultades, generalmente asociadas al poco conocimiento de la materialidad y técnicas constructivas. Con la motivación de contribuir en la búsqueda de una herramienta de evaluación unificada para edificios patrimoniales chilenos, el objetivo de este trabajo de título es presentar, aplicar y analizar la factibilidad de la utilización de la metodología correspondiente a los lineamientos de la normativa italiana de la *“Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale”*, que presenta tres niveles de evaluación cada uno de mayor complejidad y detalle en los resultados (LV1, LV2 y LV3). Adicionalmente se presenta y aplica una herramienta de evaluación llamada *“Ficha de evaluación y cuantificación de la vulnerabilidad constructiva sísmica en los bienes culturales inmuebles”*, que en este trabajo se considera un nivel previo de evaluación, por lo que se le denomina LV0.

Se estudian cinco iglesias de Valparaíso: La Matriz, San Francisco, Doce Apóstoles, Santa Ana e Iglesia Sagrado Corazón de Jesús, la cuales tienen en común su técnica constructiva: la albañilería simple. Se evalúa la vulnerabilidad sísmica de estas cinco iglesias aplicando la metodología denominada LV0, la cual entrega un índice de vulnerabilidad general de la estructura basado en parámetros característicos del edificio. Además, se evalúa las cinco iglesias con el primer nivel de la *Linee Guida* (LV1), que de manera similar al LV0, entrega un índice de vulnerabilidad a partir de la identificación de 28 macroelementos característicos de la estructura. Finalmente se aplica el nivel LV2 a una de las iglesias (Doce Apóstoles). En este nivel se estudia de manera localizada cada macroelemento existente de la estructura (reconocidos en el nivel previo) y su posible falla ante la acción sísmica en términos de aceleración de colapso.

Luego de evaluar las cinco iglesias, se obtiene que tanto el nivel LV0 como LV1, tienen una utilidad a nivel territorial, ya que cada uno con su metodología permiten identificar cuáles son las iglesias más vulnerables dentro del conjunto. En la aplicación del nivel LV2 a la iglesia Doce Apóstoles, se obtuvo resultados con respecto a la vulnerabilidad de cada mecanismo de colapso presente en la estructura, estos resultados se contrastaron con la experiencia post terremoto de 2010, identificando similitudes entre el cálculo realizado y las fallas presentadas. Finalmente se concluye que, salvo ajustes en cuanto a la manera de determinar la amenaza sísmica, es factible la utilización de estas metodologías en edificios patrimoniales en Chile.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	2
1.2. ALCANCES	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	5
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES GENERALES	7
2.1. LA CIUDAD DE VALPARAÍSO	8
2.2. CONDICIONES SÍSMICAS DE LA CIUDAD	8
2.3. PATRIMONIO CONSTRUIDO	16
2.4. GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO ANTE RIESGO SÍSMICO.....	18
CAPÍTULO 3 CASOS DE ESTUDIO.....	23
3.1. ELECCIÓN DE LOS CASOS.....	24
3.2. IGLESIA LA MATRIZ	26
3.3. IGLESIA SAN FRANCISCO DEL BARÓN	32
3.4. IGLESIA SANTA ANA.....	38
3.5. IGLESIA DOCE APOSTOLES.....	44
3.6. IGLESIA DEL SAGRADO CORAZÓN DE JESUS	50
CAPÍTULO 4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	55
4.1. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA	56
4.2. MÉTODO ITALIANO DE LA LINEE GUIDA	58
4.3. METODOLOGIA DE LOS NIVELES DE EVALUACIÓN A UTILIZAR.....	60
4.4. DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA ESPERADA PARA VALPRAÍSO	73
CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	81
5.1. APLICACIÓN DEL LV0.....	82
5.2. APLICACIÓN DEL LV1	104
5.3. APLICACIÓN DEL LV2.....	138
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES.....	157
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA	161

ANEXO A FICHAS DE EVALUACIÓN	165
A.1. FICHA DE EVALUACIÓN LV0.....	166
A.2. FICHA DE EVALUACIÓN LV1.....	176
A.3. ESQUEMAS MECANISMOS DE COLAPSOS	180
ANEXO B EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LV1 EN CASO ITALIANO	184
B.1. APLICACIÓN LV1 IGLESIA SS MARIA DELLA BRUNA	185
B.2. COMENTARIOS DE LA APLICACIÓN LV1 A UN CASO ITALIANO	193

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

En el año 2003, el centro histórico de Valparaíso es incluido en el listado de sitios de Patrimonio Mundial por la UNESCO. Esta condición hace que la ciudad requiera un plan de acción contra distintos tipos de amenazas a los que pueda estar expuesta (sismos, incendios, inundaciones, deslizamientos de tierras, etc.) y que causen daños o pérdidas en los bienes patrimoniales.

Existiendo diversas definiciones para patrimonio, la Cámara Chilena de la Construcción en 2017 menciona que: *“El patrimonio es un bien social cuya conservación y permanencia producen externalidades positivas para la sociedad en su conjunto; y dado que son únicos, su pérdida se vuelve irreversible”*. Bajo este postulado, se reafirma la importancia de contar con un plan que proteja las construcciones patrimoniales, no sólo como un requisito particular de la ciudad de Valparaíso ante la condición de Patrimonio de la Humanidad, sino que también por la importancia que este tipo de construcciones significan para la ciudad y el país.

Al considerar los distintos tipos de amenazas a los que puede estar expuesta la ciudad, los terremotos son una de las principales causas de pérdida del patrimonio cultural, y teniendo en cuenta que Chile es uno de los países más expuestos a sismos en el mundo, es natural el interés que se genera por contar con una evaluación del riesgo sísmico que podría provocar la pérdida de este tipo de bienes.

Dentro de las edificaciones patrimoniales existentes en el país, alrededor del 40% de estas, están construidas con técnicas que utilizan la tierra cruda como materialidad principal, predominando la albañilería simple de adobe (MOP, 2001). Este tipo de estructuración presenta baja resistencia mecánica ante sollicitaciones sísmicas, además, esta resistencia se ve disminuida en la medida que no haya sido objeto de planes periódicos de conservación y mantenimiento, o haya sido sometido a intervenciones poco adecuadas desde el punto de vista técnico y formal (Contreras, Bahamondez, Hurtado, Vargas, & Jorquera, 2011). De hecho, en la normativa vigente en Chile, esta estructuración no es considerada como un sistema sismo resistente, haciendo difícil su evaluación frente a sollicitaciones de este tipo, debido a la utilización de distintos criterios para llevarla a cabo. Otra dificultad a la hora de estudiar un edificio patrimonial es la poca información que se tiene en cuanto a la configuración estructural, materialidad y técnicas constructivas, ya que en general no se cuenta con mayores detalles (documentos y/o planos) lo que genera incertidumbre a la hora de abordar el problema.

Contemplando la exposición constante a eventos sísmicos del país, y las características antes mencionadas de las construcciones patrimoniales nacionales, es evidente la necesidad de manejo del riesgo sísmico, enfocado en el patrimonio construido. El riesgo sísmico se define como una medida que combina la probabilidad de que ocurra un evento sísmico en un cierto periodo de tiempo, la vulnerabilidad de las estructuras y las consecuencias negativas que pueda ocasionar en cuanto a las pérdidas humanas y materiales. Esto usualmente se expresa como:

$$[\text{Riesgo}] = [\text{Peligro}] ** [\text{Vulnerabilidad}]**[\text{Consecuencias}]$$

Desde el punto de vista de la ingeniería estructural, el riesgo sísmico sólo puede ser disminuido mediante el estudio y reducción de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras, ya que el peligro sísmico no puede ser controlado y la gestión de las potenciales consecuencias corresponde a otras áreas de estudio (sociales, económicas, antropológicas, histórica y patrimoniales, entre otros).

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura y depende de sus características y ubicación. A lo largo de la historia se han desarrollado variados métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica, con distintos alcances y grados de complejidad. En este ámbito, Italia ha sido uno de los países más activos en estudios y desarrollo de técnicas de conservación patrimonial. Actualmente, cuenta con directrices específicas para la reducción del riesgo sísmico en el patrimonio cultural (MiBACT, 2011), en la cual se encuentra una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de distintos tipos de bienes patrimoniales.

Las iglesias son una de las tipologías más reconocibles y de mayor interés dentro de los bienes patrimoniales. Desde épocas pasadas la arquitectura religiosa ha sido la piedra angular en el desarrollo de las civilizaciones, y desde la legalización del cristianismo en el imperio romano, las iglesias formaron parte fundamental en la conformación de las ciudades de gran parte de Europa y el mundo occidental en general. Mismo caso encontramos en nuestro país, donde la influencia de la iglesia católica ha estado presente desde la fundación de nuestras ciudades y por lo tanto gran número de nuestros bienes patrimoniales corresponden a construcciones religiosas y en particular las iglesias, siendo esta la tipología estudiada en este trabajo de título.

La principal motivación de la implementación de este método, es la búsqueda de una herramienta que sistematice la evaluación de los bienes patrimoniales en Chile, ya que al día de hoy no existe una metodología formal y normalizada que contemple el estudio de este tipo de construcciones. Es así que este trabajo de título pretende aportar en el desarrollo de una metodología de evaluación e intervención estructural que garantice la conservación del patrimonio cultural.

1.2. ALCANCES

En este trabajo de título se estudiarán 5 iglesias patrimoniales de Valparaíso: “Iglesia La Matriz”, “Iglesias San Francisco del Barón”, “Iglesia Sagrado Corazón de Jesús”, “Iglesia Santa Ana” e “Iglesia de los doce Apóstoles”. Estas construcciones presentan la característica en común que su estructura consiste en mampostería simple, sistema constructivo que no es considerado como sistema sismo resistente en las normas chilenas, por lo que se presenta como desafío la implementación del método italiano de la *Linee Guida* y utilización de distintos criterios para ajustar el método a la realidad local.

El método de evaluación a utilizar presenta 3 diferentes niveles, que tienen un nivel cada vez mayor de complejidad, precisión y fiabilidad de los resultados (Laterza, D'Amato, Diaz, & Chietera, 2017). El primer nivel (LV1) tiene un carácter territorial de evaluación

en donde se estudian un conjunto de estructuras, mientras que el segundo y tercer nivel (LV2 y LV3) analizan estructuralmente un edificio particular.

En este trabajo de título se aplicarán los dos primeros niveles de la metodología italiana, el nivel LV1 dada la motivación de buscar una herramienta sistematizada de evaluación de bienes patrimoniales, y la evaluación en nivel LV2 a una de las cinco iglesias la cual entrega un ejemplo de metodología para una posible evaluación en detalle de las estructuras.

Se deja fuera de este trabajo de título la evaluación en el nivel LV3 de la normativa italiana, ya que esta se refiere al estudio particular de una estructura a nivel de detalle de la planificación y desarrollo de un proyecto de intervención.

Adicionalmente, se empleará una ficha de evaluación y cuantificación de la vulnerabilidad constructiva sísmica en los bienes culturales inmuebles (Diaz, 2016), la cual permite la estimación de un indicador de vulnerabilidad basado en parámetros cualitativos, además de identificar las debilidades intrínsecas de un bien ante amenaza sísmica. Se utilizará debido a que es un análisis de vulnerabilidad sísmica simplificado, que permite comparar y priorizar un conjunto de edificios sometidos a una misma amenaza. Dado su carácter de evaluación territorial y la simplicidad de aplicación, esta ficha se puede considerar como un nivel previo de evaluación con respecto al método italiano, denominándolo LV0.

En resumen, lo niveles de evaluación de este trabajo de título serán:

- LV0 (Diaz,2016): Evaluación cualitativa de las propiedades intrínsecas de la estructura.
- LV1 (Nivel 1): Presenta un enfoque cualitativo que analiza las vulnerabilidades de todos los posibles macroelementos de la iglesia, proporcionando un índice de vulnerabilidad global.
- LV2 (Nivel 2): Define el grado de vulnerabilidad de cada macroelemento de la estructura, asociándolo a una aceleración a la cual este macroelemento fallará.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar la vulnerabilidad sísmica de cinco iglesias patrimoniales en la ciudad de Valparaíso, utilizando métodos de diagnóstico adaptados de la *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, y así determinar la factibilidad de la utilización de este método en iglesias chilenas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar estructuralmente las iglesias en estudio (“Iglesia La Matriz”, “Iglesias San Francisco del Barón”, “Iglesia Sagrado Corazón de Jesús”, “Iglesia Santa Ana” e “Iglesia de los doce Apóstoles”), mediante planos, visitas a terreno y recopilación de información secundaria disponible.
- Presentar y aplicar la metodología italiana (LV1, LV2) de evaluación de vulnerabilidad sísmica en iglesias patrimoniales chilenas.
- Presentar y aplicar la metodología de la *Ficha de evaluación y cuantificación de la vulnerabilidad constructiva sísmica en los bienes culturales inmuebles* (LV0) y comparar su aplicación con la metodología italiana (LV1).
- Analizar la factibilidad de la utilización del método italiano en Chile, evaluando la efectividad de los niveles de evaluación del método utilizado.
- A partir de la discusión propuesta, establecer conclusiones y recomendaciones para la implementación de estrategias y políticas públicas de protección de los edificios patrimoniales y la reducción de riesgo de desastre en Chile.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

A continuación, se presentan los capítulos que componen esta memoria de título, con una breve descripción de cada uno.

Capítulo 2: Antecedentes Generales

En este capítulo se presenta una revisión de la literatura relacionada con el tema en estudio, estos antecedentes darán contexto al desarrollo de este trabajo de título.

Capítulo 3: Casos de Estudio

En este apartado se presentan las 5 iglesias que serán evaluadas, dando una pequeña reseña de su historia e importancia dentro de la ciudad de Valparaíso. Además, se presenta para cada iglesia su ficha de catastro, donde se describen tanto sus propiedades estructurales como estado actual.

Capítulo 4: Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

En este capítulo se presentan en detalle los niveles de evaluación de la vulnerabilidad sísmica (LV0, LV1 y LV2), que serán utilizados en el estudio de las iglesias patrimoniales, y su forma de aplicación.

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Se evalúa la vulnerabilidad sísmica de cada iglesia con las metodologías presentadas en el capítulo anterior, y se analizan los resultados obtenidos.

Capítulo 6: Conclusiones

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo de título.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES GENERALES

2.1. LA CIUDAD DE VALPARAÍSO

Valparaíso es una ciudad puerto en la costa central de Chile. No cuenta con una fecha formal de fundación, sin embargo, se estima que se comienza a desarrollar a partir del siglo XVI, teniendo un crecimiento espontáneo y sin un trazado planificado. (I. Municipalidad de Valparaíso, 2001).

Tiene una identidad propia, marcada principalmente por su entorno natural, el que cuenta con una bahía semicircular de aproximadamente 3 kilómetros de ancho, rodeada de cerros que conforman un anfiteatro natural que mira hacia el océano pacífico. En su geografía se distinguen tres componentes: La bahía, el plan y los cerros.

- La bahía: con forma de anfiteatro producto de los cerros aledaños.
- El plan: una estrecha planicie entre el borde mar y el pie de los cerros.
- Los cerros: surcados por una red de quebradas orientadas hacia el mar.

El crecimiento de la ciudad se adecuó a la disponibilidad de espacios, es así como se fue poblando radialmente los cerros aledaños al sector puerto, dando una de las características principales de la ciudad. Esta configuración se alcanzó en la segunda mitad del siglo XIX. (I. Municipalidad de Valparaíso, 2001). Otra característica de la ciudad es la utilización de rellenos artificiales de manera de “ganarle terreno al mar” aumentando la superficie del plan.

En el año 2003, el centro histórico de la ciudad de Valparaíso es incluido como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Bajo el criterio (iii): *“Valparaíso es un testimonio excepcional de la fase temprana de globalización, a fines del siglo XIX, cuando se convirtió en el puerto líder de las rutas marítimas de la costa del pacífico en Sudamérica”*.

Lo anterior describe el sello de la ciudad, que posterior a la independencia de Chile, se convierte en puerto principal del Pacífico sudamericano, hasta la construcción del Canal de Panamá. La ciudad se convierte en un núcleo de intercambios económicos y culturales siendo una zona de tránsito de navegantes e inmigrantes extranjeros, los cuales aportaron a la cultura y el desarrollo de la ciudad.

2.2. CONDICIONES SÍSMICAS DE LA CIUDAD

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica del mundo, referido a la frecuencia con que ocurren terremotos importantes. En promedio, un terremoto de magnitud superior a 8 se produce cada diez años en alguna parte del país (Madariaga, 1998). Además, fue afectado por el evento sísmico de mayor magnitud que se haya registrado: terremoto y tsunami de Valdivia en 1960. La gran mayoría de los eventos sísmicos chilenos se producen ya sea en la zona de acoplamiento entre las placas (Interplaca) o en el interior de la placa de Nazca (Intraplaca de profundidad intermedia) (Jorquera R. , 2014).

En la zona de Valparaíso se ha registrado grandes sismos que han superado los 8 grados en la escala de Richter, presentando un periodo de recurrencia de 83 ± 9 años. (Madariaga, 1998)

2.2.1. Descripción de los suelos de Valparaíso

En el trabajo de Sturm (2008), se describe la ciudad de Valparaíso como un relieve abrupto, donde las superficies llanas no son de gran extensión. Además, se indica que entre los sectores de Playa Ancha y Quebrada Verde hay gran cantidad de quebradas que desembocan en el mar. Estas quebradas se definen como cortas, angostas, profundas y de mucha pendiente.

Grimme y Álvarez (Grimme & Alvarez, 1964) caracterizaron los suelos de fundación de la ciudad Valparaíso, arrojando que estos están constituidos por las siguientes unidades:

Roca fresca: Aflora escasamente en comparación con los otros grupos de suelo de fundación, ya que está generalmente cubierta por una gruesa capa de roca meteorizada. Se encuentra en paredes casi verticales de la costa, en algunas pendientes fuertes de las quebradas profundas y, en pocos casos, en cortes profundos de algún camino.

Roca meteorizada: Cubre el área más grande, se clasifica en el grupo de las rocas sueltas, pero sus características de mecánica de suelos son diferentes de aquellas masas originalmente sueltas depositadas por el agua o por el viento, está constituida por un material pardo rojizo que se ha descompuesto totalmente formando un limo muy arenoso con escasas cantidades de arcilla. Los minerales que lo constituyen ya no tienen una ligazón fuerte entre sí, lo que hace que la roca sea relativamente deleznable; este tipo de material se conoce como maicillo.

Relleno artificial: Este suelo cubre casi toda la parte plana de la zona urbana de Valparaíso. Además, constituye el relleno utilizado para la construcción de la costanera desde su comienzo en el barrio Las Torpederas hasta Viña del Mar.

Por su parte, Álvarez (1964), destaca en términos generales que la parte plana de la ciudad de Valparaíso está construida sobre depósitos de *arenas litorales cubiertas por relleno artificial* y *depósitos coluviales* en las partes ubicadas al pie de los cerros o quebradas.

Con el propósito de lograr una zonificación de los suelos de fundación en la zona plana de Valparaíso, Acevedo y Orozco (1986) hicieron un ordenamiento de las unidades geotécnicas presentes en la ciudad, las cuales caracterizaron según su rigidez, estas unidades se clasificaron como:

E-1 Roca Fundamental

Constituida por roca fundamental sana y/o parcialmente meteorizada, caracterizada por densidades y resistencias a la compresión simple altas y porosidades y permeabilidades bajas.

E-2 Roca Fundamental parcialmente meteorizada

El espesor de esta unidad varía entre los 0,15 y 0.50 m, los mayores espesores se localizan en aquellas zonas donde la roca está más superficial.

E-3 Roca meteorizada

Se presenta localmente como disgregable y erosionable, constituyendo un manto de espesor variable que cubre todos los cerros que conforman el anfiteatro porteño. Se le clasifica como arena limosa con índices de plasticidad que normalmente varían entre 1% y 10%. Generalmente se encuentra en los cerros con espesores que varían entre los 2 y 13 m; los mayores espesores se encuentran en aquellas zonas con menor pendiente y, a su vez, los espesores menores donde ésta es más pronunciada.

E-4 Sedimentos Aluviales y Coluviales

Sedimentos aluviales y coluviales (rellenos naturales) clasificados como arenas, limos y/o arcillas, acumulados preferentemente en superficies planas estrechas, desembocaduras de quebradas o al pie de acantilados. Actualmente estos materiales se siguen depositando al ser arrastrados como corrientes de barro.

E-5 Sedimentos Marinos Estuariales.

Estos sedimentos se han formado debido a la acción abrasiva del mar sobre los macizos rocosos, depositándose estas partículas en un ambiente de aguas someras, dando origen a sedimentos de arenas y gravas con distintos porcentajes de limos y arcilla que en algunos sectores presentan grados variables de cementación, en algunas zonas aparecen lentes de bolones o gravas dispersas con partículas micáceas y conchuelas. Su compacidad varía de densa a muy densa.

E-6 Arenas de Playas Antiguas.

Este estrato se extiende desde Av. Colón, Condell y Serrano hasta la costa actual. Está constituido por arenas de granos finos a gruesos que contienen porcentajes variables de grava, conchuelas, partículas micáceas y limos. Su compacidad varía de densa a muy densa. Se encuentra con humedad alta a saturada.

E-7 Arenas de Playas Modernas.

Estas arenas presentan granos gruesos a finos con limos en diferentes porcentajes y algo de grava. Su compacidad varía de suelta a media aumentando con la profundidad.

E-8 Relleno Artificial.

Rellenos artificiales que han alterado la topografía original determinando una terraza artificial que sobre yace a los sedimentos y a la roca fundamental sana y/o meteorizada. Este estrato se encuentra presente en todo el sector plano de Valparaíso, llegando hasta la cota +20 m adentrándose en algunas quebradas.

Como esta unidad ha sido el producto de una serie de rellenos parciales, su composición es variada, destacándose principalmente las arenas con escombros de demolición, trozos de ladrillos, losas de hormigón, bloques de rocas, gravas, bolones y diferentes porcentajes de finos limosos y/o arcillosos. Con menor frecuencia se encuentran materiales orgánicos, trozos de vidrio, escoria, carboncillo, trozos de madera en descomposición, latas, escombros, basura y restos de embarcaciones.

2.2.1.1. Zonificación según características del suelo de fundación

Con la caracterización geotécnica anterior, Acevedo y Orozco (1989) plantearon una zonificación acorde a la existencia, ordenamiento y extensión de cada una de las capas, dividiendo el plan de la ciudad en cinco zonas como se muestra en la Figura 2-1.

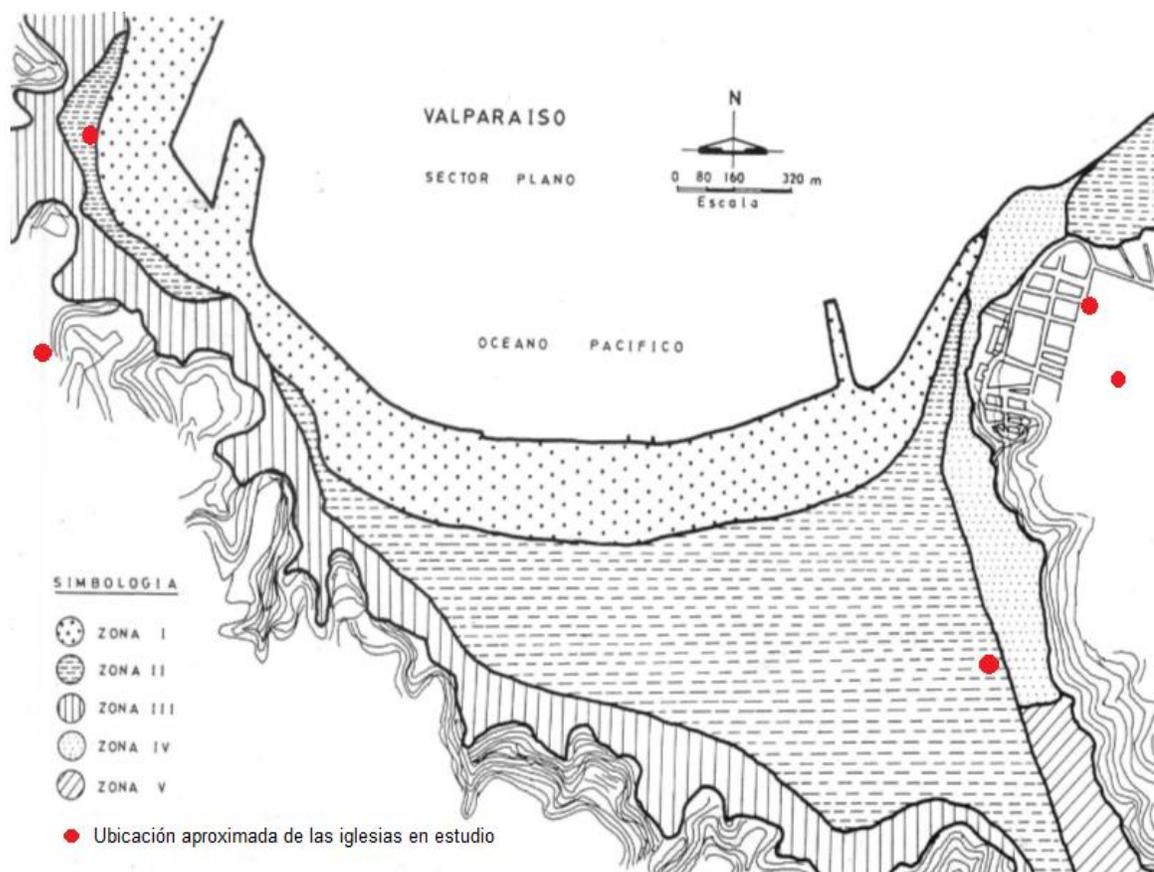


Figura 2-1 Zonificación de los suelos del plan de Valparaíso. Fuente: (Verdugo, 1995)

A continuación, se hace una descripción de las propiedades de cada zona.

Zona I:

Esta zona se extiende entre las líneas de costa actual y original, los estratos se distribuyen de la siguiente manera:

E-8	Relleno Artificial	Compuesto por distintos tipos de desechos, el espesor varía entre 2 y 1.5 [m], Dependiendo del sector en que se encuentran
E-7	Arenas Modernas	Espesor varía entre 5 a 21 [m]
E-6	Arenas Antiguas	Espesor varía entre 5 a 21 [m]
E-5	Sedimentos Estuariales	Espesor no definido. Difícil diferenciar del estrato superior
E-1	Roca Fundamental	Se encuentra a una profundidad entre 15 y 25 [m]

El agua subterránea se puede detectar a la profundidad de 5 m.

Zona II:

Esta zona se extiende de la línea de la costa original hasta las inmediaciones de los cerros de la ciudad.

E-8	Relleno Artificial	Tiene espesores máximos entre 4 y 5 [m] cerca de la línea de costa original y hasta 7 [m] en algunos cauces de quebradas.
E-4	Sed. Aluviales y coluviales	El espesor de esta capa aumenta hacia los cerros llegando a 8 [m], en la línea de la costa llega a 2 [m].
E-7	Arenas Modernas	Espesor varía entre 9-18 [m].
E-6	Arenas Antiguas	Espesor varía entre 9-18 [m].
E-5	Sedimentos Estuariales	Espesor varía entre 9-18 [m].
E-1	Roca Fundamental	La profundidad de la roca es mayor a 10 [m] llegando a 50 [m] en el sector de la iglesia Doce Apóstoles.

Zona III:

Esta zona se extiende a lo largo del barranco, formando una especie de anillo que se amplía en los sectores de la cañada y desaparece donde el barranco cae al mar. La napa se puede encontrar entre los 4 y los 7 m de profundidad.

E-8	Relleno Artificial	Los mayores espesores alcanzan los 9 [m]. La compacidad varía desde suelta en la superficie hasta muy densa.
E-4	Sedimento Aluviales y coluviales	El espesor varía entre 4 y 8.5 [m]. Llegan a 9 [m] en la zona de las quebradas.
E-5	Sedimento Estuariales	El espesor de este estrato no está definido.
E-1	Roca Fundamental	Se encuentra a una profundidad entre 8 -16.7 [m]

Zona IV:

Este sector está ubicado al noreste del sector plano.

E-8	Relleno Artificial	El espesor varía entre 0.5 y 5 [m]
E-2	Roca Meteorizada	Se encuentra a una profundidad entre 0.8 y 1.6 [m]
E-1	Roca Fundamental	Se encuentra a una profundidad entre 0.7 y 4.6 [m]

Zona V:

Está ubicada al sur de la Zona IV y es el área más pequeña.

E-4	Sedim. Aluviales y coluviales	El espesor varía entre 5 a 7 [m]. Está intercalado por un manto arcilloso de espesor 1 a 2 [m].
E-5	Sedim. Estuariales	Espesor no definido
E-2	Roca Meteorizada	Se encuentra a una profundidad entre los 5 y 7 [m]. El espesor es de 0.5 [m]
E-1	Roca Fundamental	Se encuentra entre los 5.8 y 8.8 [m] de profundidad.

2.2.2. Registro de sismos históricos en Valparaíso

En la zona central de Chile se han registrado algunos de los mayores terremotos de la historia. Algunos de los terremotos más destructores con epicentro frente a la costa de la región de Valparaíso han ocurrido los años 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985, provocando daños considerables a la ciudad (Sturm, 2008).

En la Tabla 2-1 se muestran las características de los sismos mencionados.

Tabla 2-1 Características de los terremotos históricos en la zona de Valparaíso. Fuente: (Sturm, 2008)

Año	Magnitud de Richter	Longitud de ruptura [km]
1647	8.5	365
1730	8.75	350 - 450
1822	8.5	200 – 250
1906	8.2	365
1985	7.8	170
2010 ¹	8.8	640

Los edificios patrimoniales estudiados en este trabajo de título han sido testigos de estos 3 últimos sismos (1906, 1985 y 2010) poniendo a prueba la vulnerabilidad sísmica de las iglesias. A continuación, se entregan algunos antecedentes de estos eventos.

2.2.2.1. Terremoto del 16 de agosto de 1906

Carvajal (1989) realizó un estudio de los daños provocados en Valparaíso por el terremoto de 1906, recopilando información de diarios de la época, en estos se evidencia

¹ Si bien el terremoto de 2010 no tuvo su epicentro frente a la costa de Valparaíso, los efectos de éste, si se sintieron en la ciudad, por lo que es pertinente considerar sus características.

que el daño producido en el sector el plan, se debió principalmente a la mala calidad de las construcciones, en general la albañilería funcionó de manera que lo elementos trabajarán como conjunto.

Además, en su trabajo Carvajal estudió la distribución por zonas de los daños producidos por el terremoto, elaborando un mapa de las intensidades en escala MKS-64 (Figura 2-2). En este mapa sobresale un sector del barrio El Almendral, llegando a tener una intensidad de 10; según los registros, esta zona quedó en ruinas colapsando casi en su totalidad.

El sector con la mayor intensidad calculada concuerda con las condiciones de suelos del sector, las cuales Verdugo (1995) describe como: *“basamento con una serie de singularidades como es la detectada en el sector de la calle Hontaneda”*. Este suelo correspondería principalmente a rellenos artificiales no controlados, lo que genera una amplificación en el movimiento producido por el sismo.



Figura 2-2 Intensidades en la ciudad de Valparaíso durante el terremoto del 16 de agosto de 1906.
Fuente: (Carvajal, 1989)

2.2.2.2. Terremoto del 3 de marzo de 1985

En el trabajo de Monge y Astroza de 1989, califican al terremoto del 3 de marzo de 1985 como característico sismo chileno de tipo Interplaca. Los mayores daños se registraron en las zonas costeras en comparación a las zonas cercanas a la Cordillera de Los Andes. El daño disminuye rápidamente hacia el norte del epicentro, habiendo una fuerte atenuación en la dirección este-oeste (Monge & Astroza, 1989).

Un mapa de las intensidades en escala MSK-64, por zonas en la ciudad de Valparaíso en el terremoto de 1985, fue elaborado por Canales y Perretta en 1988. Si bien este sismo

fue menor al ocurrido en 1906, nuevamente se destaca la zona del sector del barrio el Almendral con una intensidad mayor ($8 \frac{1}{2}$) al resto de las zonas, esta vez Canales y Perreta delimitan la zona más afectada entre las calles Victoria, Hontaneda, Rancagua y Uruguay (Canales & Perreta, 1988).

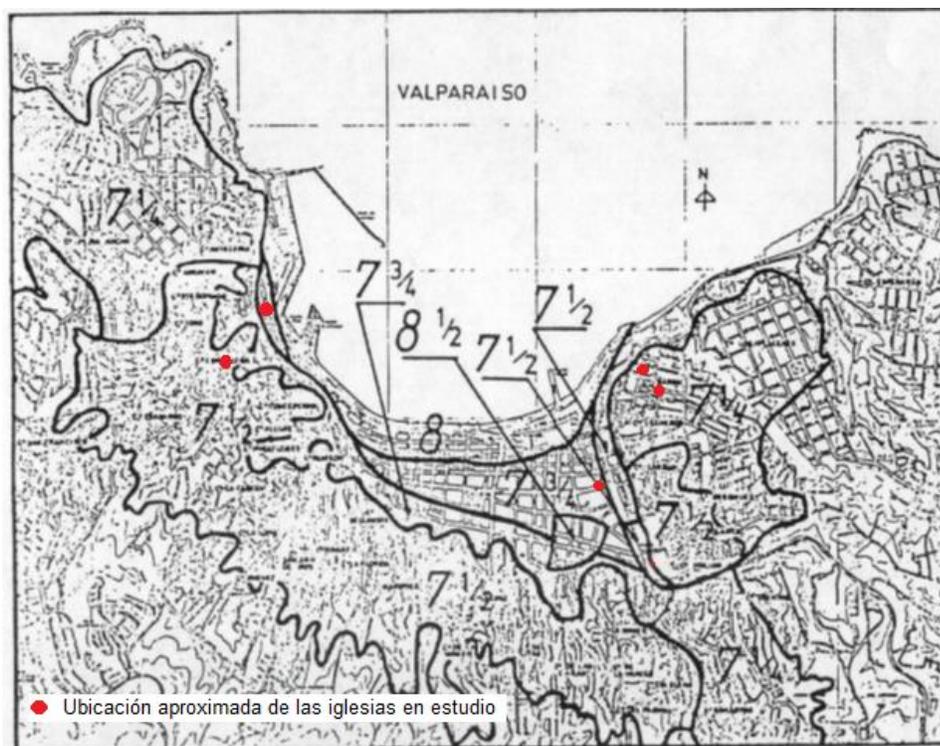


Figura 2-3 Intensidades en la ciudad de Valparaíso durante el terremoto del 3 de marzo de 1985.
Fuente: (Canales & Perreta, 1988)

Adicionalmente, para el terremoto de 1985 se contó con instrumentación que registraron aceleraciones. Específicamente dos estaciones, una estación ubicada en un barrio del sector de El Almendral y otra estación ubicada en roca en la Universidad Federico Santa María, cerro Los Placeres. Las características principales de los acelerogramas registrados se indican en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Características de los acelerogramas registrados en Valparaíso en el terremoto de 1985.
Fuente: (Carvajal, 1989)

Estación	Componente	A _{max} [g]	V _{max} [cm/s]	d _{max} [cm]
El Almendral	N50E	0.290	28.59	5.37
	S40E	0.163	16.89	2.81
	vertical	-	-	-
U.T.F.S.M	S20E	0.164	6.40	1.33
	N70E	0.179	14.70	3.26
	vertical	0.125	5.85	1.37

2.2.2.3. Terremoto del 27 de febrero de 2010

El 27 de febrero de 2010 ocurrió el terremoto de mayor magnitud en los últimos 50 años en el territorio nacional, este sismo afectó a la zona centro-sur de Chile entre las regiones de Valparaíso y Araucanía, concentrándose los daños principalmente en las zonas costeras.

En la ciudad de Valparaíso, los principales daños se registraron en el palacio Subercaseaux y el muelle Prat, además de 200 viviendas particulares, todo esto principalmente en el sector plano de la ciudad. Se estimó una intensidad de VII en la escala de Mercalli (CEPAL, 2010).

Las estaciones ubicadas en el sector el almendral y la U.T.F.S.M en el cerro los placeres, pertenecientes a la red de registros del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile registraron las siguientes aceleraciones:

Tabla 2-3 Aceleraciones registradas en el terremoto del 27 de febrero de 2010. Fuente: (Boroscheck, Soto, & León, 2010)

Estación	Azimut	Componente	A _{max} [g]
El Almendral	310	Long.	0.224
		Trans.	0.265
		vertical	0.146
U.T.F.S.M	180	Long.	0.137
		Trans.	0.304
		vertical	0.079

2.3. PATRIMONIO CONSTRUIDO

El patrimonio arquitectónico representa la identidad de una ciudad, es por eso que es motivo de estudios en distintas disciplinas, de manera de lograr su conservación. La UNESCO considera a los monumentos en su definición de patrimonio cultural como: “*Los monumentos: obras arquitectónicas, de escultura o de pintura monumentales, elementos o estructuras de carácter arqueológico, inscripciones, cavernas y grupos de elementos, que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia*” (UNESCO, 1972).

Por lo tanto, se considera que los edificios patrimoniales son aquellos que tienen algún valor histórico o artísticos y merecen ser conservado para el disfrute de las futuras generaciones. En general estos edificios son de gran antigüedad y por lo tanto su materialidad responde a la época en que fueron construidos, es por esto que gran número edificios patrimoniales chilenos tienen como técnica constructiva la albañilería. Más aun gran parte de los edificios patrimoniales construidos hace más de 100 años en la zona central de Chile, corresponden a estructuras de tierra, y en Valparaíso, según lo mencionado por Jorquera (2010) y datos del inventario del patrimonio cultural inmueble de Chile, el 60% de los edificios patrimoniales corresponde a esta técnica de construcción.

Existen vestigios, principalmente en el Norte de Chile, que la construcción en tierra ha existido desde tiempos precolombinos, no obstante, es con la conquista española cuando el adobe se convierte en la técnica principal en la fundación de ciudades. La mampostería de adobe fue una técnica muy usada por la posibilidad de prefabricar, almacenar y transportar las piezas para su uso posterior (Sánchez, 2013).

Guerrero (2007), define la arquitectura en tierra como: *“la serie de estructuras en las que el suelo natural es acondicionado mediante procedimientos de humidificación, transformación y secado al sol, para edificar elementos constructivos que hagan posible la habitabilidad de los espacios”*.

De las técnicas en construcciones en tierra destacan el adobe, el cual corresponde a ladrillos de tierra cruda y paja secados al sol, la tapia pisada (sistema de capas de tierra compactadas dentro de un molde de madera) y otros sistemas mixtos como la quincha y el adobillo (sistema que utiliza tabiquería de madera rellena de adobe).

Con respecto a la elaboración del adobe, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2005) hace una descripción del proceso, indicando que los ladrillos se fabrican colocando el barro humedecido en un punto cercano a la plasticidad en moldes de madera con las dimensiones deseadas. Luego de unos días, se retiran los moldes y las piezas se dejan secar al aire entre 15 a 30 días. La pega entre unidades se puede realizar con el mismo terreno del suelo, pero si este no entrega buena cohesión, se puede agregar otros elementos como cal. La adición de paja característica en el adobe se hace para aumentar la resistencia a la tracción de este.

La construcción en tierra se ve disminuida a mediados del siglo XX, con el desarrollo de nuevos materiales y sistemas constructivos, además de que luego del terremoto de Chillán en 1939, en el cual gran parte de la ciudad se derrumba, se señaló a las construcciones en adobe como las principales culpables de numerosas muertes. Sin embargo, hasta el día de hoy, están en pie grandes construcciones en adobe que han resistido el paso del tiempo.

2.3.1. Vulnerabilidad sísmica de las construcciones en tierra

Históricamente, las construcciones hechas en tierra han sufrido la acción de diversos sismos, demostrando un mal comportamiento frente a este tipo de sollicitación. Cuando este tipo de estructuras se ve sobrepasado por las fuerzas sísmicas, presentan un colapso súbito debido a la fragilidad del material.

Según lo indicado en el trabajo de Yamín et al., (2007) los factores que afectan la vulnerabilidad en las estructuras construidas en tierra son: las irregularidades en planta y altura, la falta de verticalidad de los muros, la mala conexión entre elementos perpendiculares, las filtraciones, la humedad, la presencia de entresijos pesados o la falta de diafragmas y la baja resistencia a la flexión de los muros debida a la poca resistencia a la tracción del material.

Otro factor de vulnerabilidad importante es la poca o nula mantención a este tipo de construcciones, la tierra es un material que además de las características recién mencionadas, es proclive al deterioro por condiciones ambientales como la humedad, lo que disminuye considerablemente sus propiedades mecánicas con el paso del tiempo.

La principal característica resistente de este tipo de estructuras es el comportamiento como conjunto, es decir, cada elemento aporta en mantener el equilibrio en el edificio completo. Por lo tanto, si algún elemento se ve alterado podría desconectarse del sistema resistente causando un colapso en la estructura, ya que los elementos desconectados resisten las solicitaciones de manera independiente.

2.3.2. Vulnerabilidad sísmica de las iglesias chilenas

Desde su llegada al país, las congregaciones religiosas utilizaron la albañilería de adobe como sistema constructivo en sus iglesias, con una tipología común en toda la zona central de Chile y particularmente en la ciudad de Valparaíso: planta basilical con tres naves, con una o dos torres campanarios en el frontis, gruesos muros de adobe, techumbre a dos aguas conformadas por estructuras de madera y cubiertas de tejas de arcilla. A mediados del siglo XIX se comienza a utilizar los sistemas mixtos adobe – madera, donde esta última aportaba en el objetivo de ganar altura y esbeltez en los templos.

Gran número de construcciones patrimoniales en Valparaíso corresponden a iglesias, las cuales siguen en pie al día de hoy, aunque en distintas condiciones. En un catastro post terremoto de 2010 (Contreras, Bahamondez, Hurtado, Vargas, & Jorquera, 2011) se observó que los principales daños en iglesias fueron: *“desaplomes, vaciamientos o desvinculación de contrafuertes. Las torres campanarios muy separadas del cuerpo general de las iglesias, y su mayoría construidas con técnicas y materiales distintos de la nave, fueron objetos especiales de colapso. Del mismo modo, la acumulación de daños por efecto de sismos anteriores es un factor que evidentemente debilita el sistema”*. Por lo tanto, del diagnóstico anterior, se desprende que los principales daños se deben a la esbeltez de los muros, la proporción de los recintos, las geometrías complejas, falta de trabazón entre elementos y las intervenciones en la estructura original (Contreras, Bahamondez, Hurtado, Vargas, & Jorquera, 2011).

2.4. GESTIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO ANTE RIESGO SÍSMICO

En la gestión del patrimonio ante riesgo sísmico, se distingue dos puntos de interés: la gestión patrimonial y la gestión del riesgo sísmico. Ambas en su conjunto contribuyen a la conservación de los bienes patrimoniales. La Cámara Chilena de la Construcción en 2017 postula la importancia de la conservación patrimonial, indicando que: *“El patrimonio es un bien social cuya conservación y permanencia producen externalidades positivas para la sociedad en su conjunto; y dado que son únicos, su pérdida se vuelve irreversible”* (CChC, 2017).

A menudo el riesgo de desastre es definido como el producto entre la amenaza y la vulnerabilidad, donde la amenaza es un fenómeno, sustancia o actividad humana, con capacidad de causar daño, y la vulnerabilidad es la exposición a dicha amenaza (UNESCO, 2014).

La amenaza puede tener un origen variado: geológico, meteorológico, hidrológico, etc. y algunas veces pueden actuar de manera combinada. En contexto técnico, se describe la amenaza de forma cuantitativa mediante la posible frecuencia de la ocurrencia de los diversos grados de intensidad en diferentes zonas, según se determinan a partir de datos históricos o análisis científicos (UNISDR, 2009).

Para el caso específico del riesgo sísmico de los bienes patrimoniales, la amenaza sísmica corresponde a los terremotos, mientras que la vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca del bien patrimonial, dependiente de sus características y ubicación. Bajo esta definición, no es posible eliminar el riesgo sísmico dado que no se puede eliminar la amenaza, por lo tanto, sólo queda hacer frente a la vulnerabilidad, de manera de reducirla y así reducir el riesgo sísmico.

2.4.1. Gestión del riesgo de desastres sísmicos

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR) entrega la definición de gestión del riesgo de desastres como: *“el proceso sistemático de utilizar directrices administrativas, organizaciones, destrezas y capacidades operativas para ejecutar políticas y fortalecer las capacidades de afrontamiento, con el fin de reducir el impacto adverso de las amenazas naturales y la posibilidad de que ocurra un desastre”* (UNISDR, 2009).

Para la UNESCO, la gestión del riesgo de desastres consta de tres etapas: el antes, el durante y después de los desastres. Siendo la de mayor interés en este estudio la etapa previa, de preparación contra los desastres. Es en esta etapa donde se ejecutan la evaluación del riesgo, las medidas de prevención y mitigación para amenazas concretas.

En la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres 2015-2030 celebrada en Sendai, Miyagi (Japón) en 2015, se acordaron un conjunto de acciones prioritarias con respecto a la reducción de riesgo de desastres:

Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastres: Apunta a que las políticas de gestión de riesgo de desastres deben basarse en comprender el riesgo de manera completa y así preparar estrategia de prevención y respuesta eficaz para casos de desastre.

Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo: Contar con objetivos y estrategias para la prevención, mitigación, preparación, respuesta, y recuperación. Además de fomentar la colaboración entre mecanismos e instituciones competentes en la reducción del riesgo de desastres.

Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia: Las inversiones para la prevención y reducción del riesgo de desastres pueden impulsar la

innovación, el crecimiento y la creación de empleo. Esas medidas son fundamentales para salvar vidas, prevenir y reducir las pérdidas, y asegurar la recuperación y rehabilitación efectivas.

Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción: La experiencia de desastres pasados ha demostrado que la fase de recuperación, rehabilitación y reconstrucción debe prepararse de manera anticipada al acontecimiento de desastre, y así asegurar una respuesta eficaz, haciendo a las naciones y comunidades resilientes a los desastres.

Finalmente, en el contexto particular de la gestión del riesgo de desastre sísmico, el objetivo apunta a reducir la vulnerabilidad sísmica de las construcciones, y, por lo tanto, la misión de la ingeniería estructural es reducir dicha vulnerabilidad mediante la evaluación e intervención de las estructuras de manera que sean seguras para sus ocupantes.

2.4.2. Gestión patrimonial

En la temática de intervención de bienes patrimoniales, actualmente existe una discusión en la manera de abordar el problema. Por un lado, está la visión de que la conservación corresponda fielmente a lo que el bien patrimonial fue en su momento. Mientras que por otra parte existe una corriente interpretativa, que busca mantener la identidad del bien patrimonial, pero utilizando materiales y tecnologías modernas. Ambas partes, buscan, la conservación y restauración de las construcciones patrimoniales que como se mencionó anteriormente representan la identidad del lugar en que se encuentra, a esto se le denomina gestión patrimonial (Macias, 2016).

En lo que respecta a la gestión patrimonial, la UNESCO posee un listado con sitios incluidos como Patrimonios de la Humanidad, los cuales son sitios excepcionales que le pertenecen a toda a la humanidad y son de gran importancia histórica y colectiva, es por esto que deben ser objetos de protección y conservación para las generaciones futuras. En la convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural de 1972, cada Estado presente reconoce la obligación de identificar, proteger, conservar, rehabilitar y transmitir a las generaciones futuras el patrimonio cultural situado en su territorio. Para lograr lo anterior, Los Estados se comprometen en términos generales a: adoptar políticas generales que integren la protección del patrimonio en los programas de planificación, instruir servicios de protección y conservación de patrimonio, y desarrollar investigación científica y técnica para perfeccionar los métodos de intervención que permitan hacer frente a los peligros que amenacen al patrimonio cultural y natural. (UNESCO, 1972)

En la década del 90, se genera un cambio de paradigma principalmente en Italia con respecto a la intervención de construcciones patrimoniales. De los catastros estructurales post eventos sísmicos producidos en esta época, se observó que edificios que habían sido intervenidos con normas y códigos modernos colapsaron parcial o totalmente, motivando cambios en la forma de realizar las intervenciones en construcciones

patrimoniales en este país. Luego de estudios y revisiones, la principal conclusión fue que hubo incompatibilidad entre estructura antigua y estructura actual por diferencias en el comportamiento de los materiales.

Muchos estudios en terreno (observación de estructuras dañadas), permitieron identificar daños típicos en las distintas tipologías de estructuras (edificios, iglesias, palacios, etc.) lo que permitió la sistematización de modelos mecánicos que describen específicos comportamientos a través de modelos cinemáticos. Así fue como el Departamento de Protección Civil y el Ministerio de Protección Cultural en Italia, publicó en detalle los patrones más importantes de los daños después de terremotos en iglesias y palacios, y a partir de esto el GNDT (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*) en 1999 desarrollo una metodología para la evaluación de emergencia post terremotos (Lagomarsino & Podestà, 2004)

2.4.2.1. Ámbito institucional y normativo en Chile

A nivel nacional, la protección del patrimonio está bajo el amparo de la Ley de Monumentos Nacionales (Ley N°17.288), cuyo objetivo es dejar bajo la tuición del Estado los inmuebles y lugares cuya conservación interesa a la historia, el arte o la ciencia nacional. El Consejo de Monumentos Nacionales es el organismo colegiado encargado del cumplimiento de dicha ley y entre sus funciones está nombrar y declarar los Monumentos Históricos y las Zonas Típicas o Pintorescas a ser protegidas.

En 1972 comienza a regir la primera norma antisísmica del país (primera versión de la NCh433 Diseño Sísmico de Edificios) y desde entonces Chile posee normas sísmicas de diseño y construcción que son revisadas y actualizadas periódicamente, como la NCh433 y la NCh2369 entre otras. Sin embargo, todas estas siempre dejan fuera de los sistemas resistentes al adobe, técnica constructiva muy común en edificios patrimoniales.

Luego de los informes de daños producidos por el terremoto del 2010, especialmente en construcciones históricas de adobe, se evidenció la deficiencia normativa en el ámbito patrimonial, motivando a las entidades competentes a crear documentos que dieran lineamientos al proceso de la reconstrucción e intervención de este tipo de estructuras. (Macias, 2016)

El primer paso fue la revisión en cuanto a la materialidad, ya que no se contaba con normativa específica en tierra cruda, que es el material más común en construcciones patrimoniales en Chile. Se establecieron los requisitos y condiciones mínimas para los proyectos de intervención en estructuras de tierra cruda, los cuales tienen como propósito: estandarizar los métodos de evaluación de los daños en la estructura resistente, orientar las intervenciones de las construcciones de tierra con valor patrimonial anteriores a las normas y ordenanzas vigentes; y mejorar las condiciones de seguridad estructural de las construcciones de tierra cruda con valor patrimonial. Así se dio origen a la norma técnica NTM 002 “Proyecto de intervención estructural de construcciones de tierra” (MINVU, 2013). Así mismo en el año 2013 a través del Comité Técnico de Construcción Patrimonial se publica la NCh3332 (INN, 2013), para establecer los

requisitos mínimos que debe cumplir un proyecto estructural para la intervención, renovación, recuperación, reforzamiento, restauración, rehabilitación o consolidación estructural de las construcciones de tierra con valor patrimonial. Algunos alcances de esta norma son:

- Establece con precisión los materiales, sistemas y elementos que abarca cada edificación.
- Insta consideraciones en las intervenciones, es decir, criterios patrimoniales y estructurales.
- Establece una metodología para llevar a cabo el diagnóstico estructural de las construcciones patrimoniales en tierra cruda.
- Establece criterios para realizar el levantamiento de la estructura de construcción patrimonial.
- Describe la metodología para realizar el análisis estructural y la determinación de esfuerzos frente a sollicitaciones sísmicas mediante un método estático el cual define un coeficiente sísmico, considerando las condicionantes externas.
- Define pruebas de campo y valores básicos de comportamiento mecánico del material.

Caracteriza la intervención estructural de la construcción estableciendo bases de diseño y cálculo, reparación y refuerzo.

CAPÍTULO 3

CASOS DE ESTUDIO

3.1. ELECCIÓN DE LOS CASOS

El objetivo de este trabajo es evaluar la vulnerabilidad sísmica de cinco iglesias patrimoniales de la ciudad de Valparaíso, utilizando la metodología presentada en las directivas de la normativa italiana. Las 5 Iglesias que se estudiarán son (Figura 3-1):

- Iglesia La Matriz
- Iglesia San Francisco del Cerro Barón
- Iglesia Santa Ana
- Iglesia de los Doce Apóstoles
- Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús



Figura 3-1 Ubicación de las 5 iglesias en entorno a la Bahía de Valparaíso. Fuente: Google Earth.

Se escoge la ciudad de Valparaíso para realizar una zonificación de vulnerabilidad patrimonial, ya que desde 2003 el centro histórico de la ciudad pertenece al listado de Patrimonios de la Humanidad de la UNESCO, y por lo tanto se requiere planes de acción que garanticen su conservación. Bajo este requerimiento, es importante contar con un estudio de vulnerabilidad sísmica de los edificios patrimoniales de la zona.

Cuando se habla de edificios patrimoniales, se refiere a construcciones antiguas que están arraigadas a la historia e identidad de la ciudad en la que se encuentran. Bajo este concepto, una de las tipologías más características son las iglesias, las cuales son edificios reconocibles que tiene elementos particulares, y que están fuertemente ligados a la cultura de la comunidad en donde están emplazadas. Desde su fundación, Valparaíso ha tenido importante influencia por las congregaciones religiosas en su conformación y

desarrollo arquitectónico, es por esto que existen variadas iglesias construidas en distintas épocas que forman parte importante del patrimonio de la ciudad. Dada la relevancia de este tipo de construcciones, en este trabajo de título se evalúa la vulnerabilidad sísmica del patrimonio cultural construido mediante el estudio iglesias patrimoniales de Valparaíso.

Para utilizar la metodología italiana de evaluación de vulnerabilidad sísmica, que está enfocada particularmente en construcciones de mampostería, se debió seleccionar construcciones que presentaran esta característica. Así, Las iglesias escogidas tienen la particularidad de estar estructuradas a través de muros de albañilería simple, ya sea adobe o ladrillo cerámico.

Las cinco iglesias escogidas tienen un carácter patrimonial, tanto por su antigüedad y técnicas constructivas, como por su importancia en las comunidades en las que están emplazadas (tres de estas han sido declaradas Monumentos Históricos por el Consejo de Monumentos Nacionales) y corresponden a iconos importantes, dignos de ser conservados en el tiempo. Aun así, la exposición a desastres (principalmente a sismos e incendios) a lo largo de su historia, ha provocado diversos daños a estas construcciones, y cuando no se realizan intervenciones de mejoramiento adecuadas, produce que estos edificios queden en desuso y abandono, condición que generalmente provoca un mayor deterioro en las estructuras.

En este capítulo se busca caracterizar estructuralmente las iglesias, para posteriormente estudiar la vulnerabilidad ante la acción sísmica, mediante la implementación de los lineamientos italianos de la *Linee Guida*, y analizar la factibilidad de esta metodología en el estudio de iglesias chilenas, de manera de desarrollar una herramienta para la evaluación, planificación y conservación del patrimonio cultural chileno.

En cuanto a la vulnerabilidad sísmica propia de cada estructura, cabe mencionar que todos los casos de estudio se encuentran inmersos en zonas urbanas, conviviendo a diario con las actividades normales de la ciudad, por lo que una alta vulnerabilidad de colapso no solo genera un peligro en la pérdida de patrimonio, sino que además pone en riesgo la seguridad de las personas que habitan a su alrededor.

A continuación, se presentan en detalle las iglesias que serán estudiadas, mencionando un poco de su historia, además de realizar un catastro estructural en donde se mencionan sus características y se describe el estado actual de cada una de ellas.

3.2. IGLESIA LA MATRIZ

Declarada Monumento histórico el 6 de octubre de 1971 por el D.S N°2412 del Ministerio de Educación. Es la iglesia más antigua de la ciudad, se sitúa a los pies del cerro Santo Domingo, entre las calles Santo Domingo, Santiago Severín, Matriz y Almirante Riveros, en el centro histórico de la ciudad. El templo con su atrio es uno de los lugares más reconocibles de la ciudad de Valparaíso.



Figura 3-2. Frontis Iglesia La Matriz

El templo actual es la cuarta versión de la iglesia construida en el mismo lugar, las que fueron destruidas y reconstruidas sucesivamente producto de saqueos, salidas de mar y terremotos.

La primera capilla fue levantada en 1559, construida como una pequeña choza de adobe, quincha y techo de paja. Fue saqueada y quemada en 1568 por el corsario inglés Sir Francis Drake. Posteriormente la capilla es reconstruida por los vecinos de la ciudad, presumiblemente a base de muros de adobe. Esta construcción perdura por más de 100 años hasta que es destruida por el terremoto y tsunami de 1730. En 1749 es levanta una vez más, en el marco de la administración del párroco José A. del Pozo y Silva. Esta tercera construcción presenta gruesos muros de adobe. En el terremoto y posterior tsunami de 1822 la iglesia es destruida junto a gran parte de los edificios de Valparaíso. La construcción de la cuarta estructura de la iglesia tardó 5 años, siendo inaugurada en el año 1842 por el párroco José Antonio Riobío. Esta iglesia es la que está en pie hasta el día hoy, habiendo resistido numerosos sismos y siendo objeto de distintas intervenciones estructurales. En el año 2012 se llevó a cabo un proyecto de reparación y consolidación estructural de la iglesia, principalmente de los daños presentados post terremoto de 2010, se intervino la estructura de manera general, realizando

reconstrucción de muros de adobe, reparación de grietas y la instalación de geomallas, que le dieron mayor estabilidad a los muros. Además, se realizaron reparaciones locales en la techumbre y torre campanario. Luego de esta intervención quedó completamente operativa y prestando servicios eclesiásticos normales.

3.2.1. Descripción General de la Estructura

Se presenta una ficha de catastro estructural recopilando información de documentos y planos facilitados por la Ilustre Municipalidad de Valparaíso, correspondiente a fichas de catastros a lo largo de su historia, así como documentos propios del proyecto de reparación y consolidación estructural de la iglesia llevado a cabo en 2012. Además de la observación mediante visitas a la iglesia.

3.2.1.1. Geometría Básica

La estructura está compuesta por un volumen unitario con planta rectangular de dimensiones 46m x 10m a tres naves, con muros perimetrales constituidos de adobe y pilares de madera entre las naves.

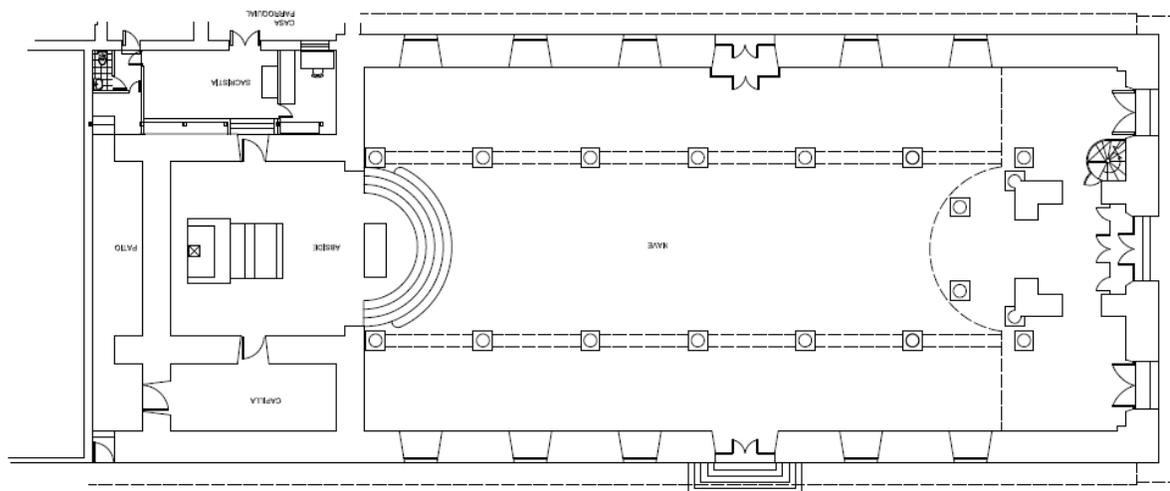


Figura 3-3 Planta iglesia La Matriz

Su fachada corresponde a un muro de albañilería simple de ladrillo cerámico, que cuenta con tres vanos con arcos de medio punto, sobre los cuales hay tres óculos (ventanas circulares), todo esto coronado por un frontón triangular (Figura 3-4). Sobre esta fachada nace una torre de madera de tres tambores octogonales que aloja las campanas en el tambor central, rodeado por un deambulatorio con 8 columnas dóricas de madera.

Las fachadas oriente y poniente, de adobe, muy sencillas, están marcadas por puertas de acceso formadas por arcos de medio punto y pequeñas ventanas con vitrales coloreados (Figura 3-5).

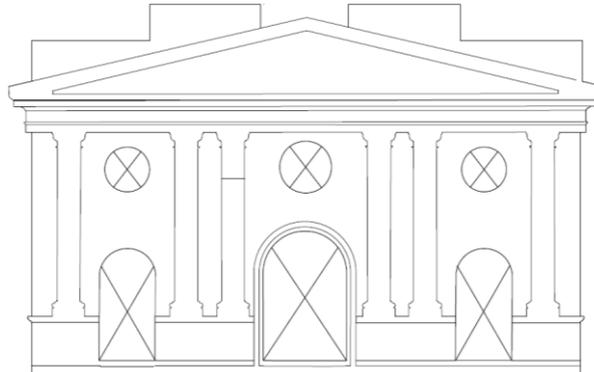


Figura 3-4 Fachada iglesia La Matriz

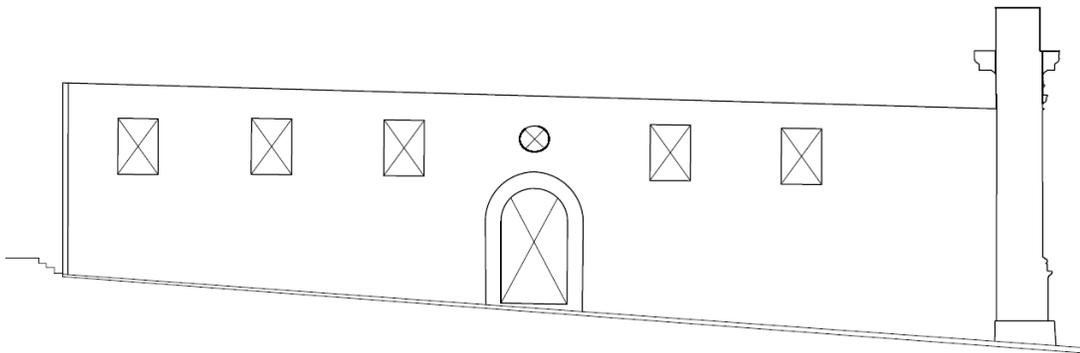


Figura 3-5 Fachada lateral iglesia La Matriz

La nave central es de cielo abovedado de madera, mientras las laterales son más bajas con cielo también de madera, pero plano.

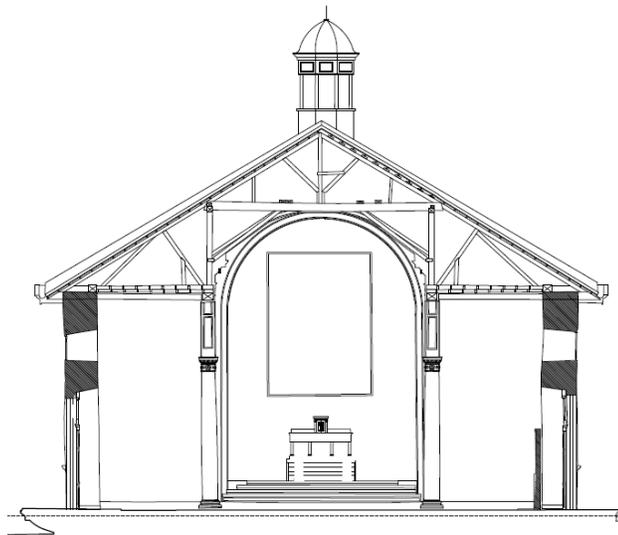


Figura 3-6 Corte transversal iglesia La Matriz

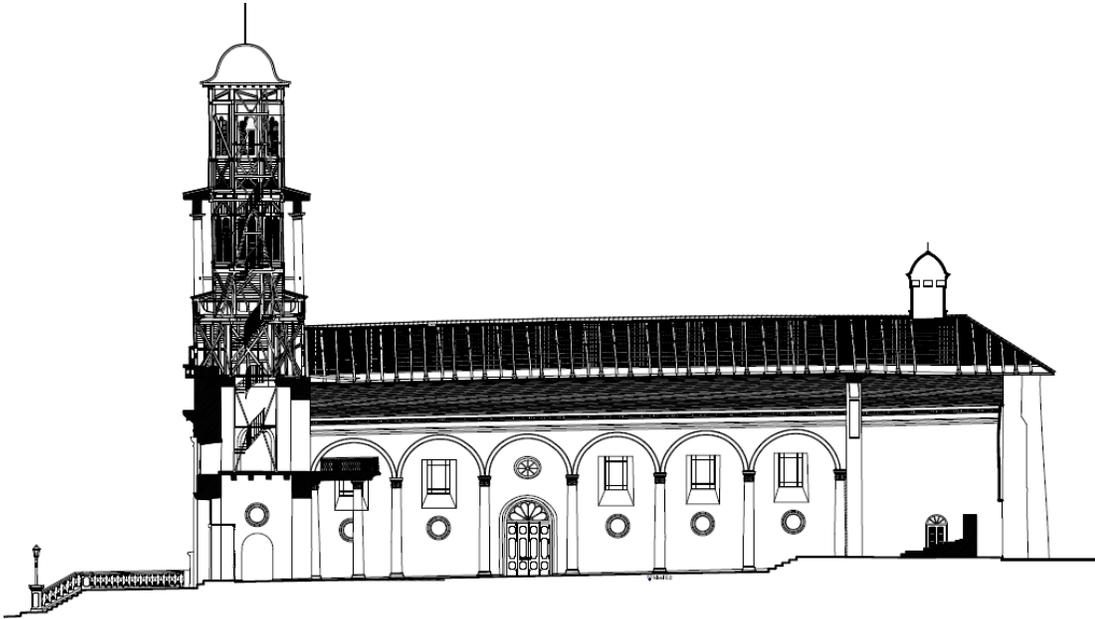


Figura 3-7 Corte longitudinal iglesia La Matriz

3.2.2. Caracterización Estructural

La estructura sismo resistente está conformada por muros gravitacionales de albañilería (muros perimetrales). Estos muros utilizan su gran masa para resistir las sollicitaciones horizontales producidas por el sismo. Las cargas verticales son transmitidas por las cerchas de madera a muros perimetrales y pilares de madera interiores.

3.2.2.1. Tipos de Muros

El muro de fachada tiene un espesor de 80 cm. y está construido de albañilería de ladrillo. Por su parte, los muros laterales y muro trasero están construido en adobe y presentan distintos espesores: 1.5m, 1.3m 1.0m. La pega entre unidades original es de barro.

3.2.2.2. Estructura de techo

El sistema de techumbre está basado en cerchas de madera a dos aguas, las que se apoyan en los muros de adobe y en las columnas de madera que ocupan la nave central. El material de la cubierta es tejas de arcilla.

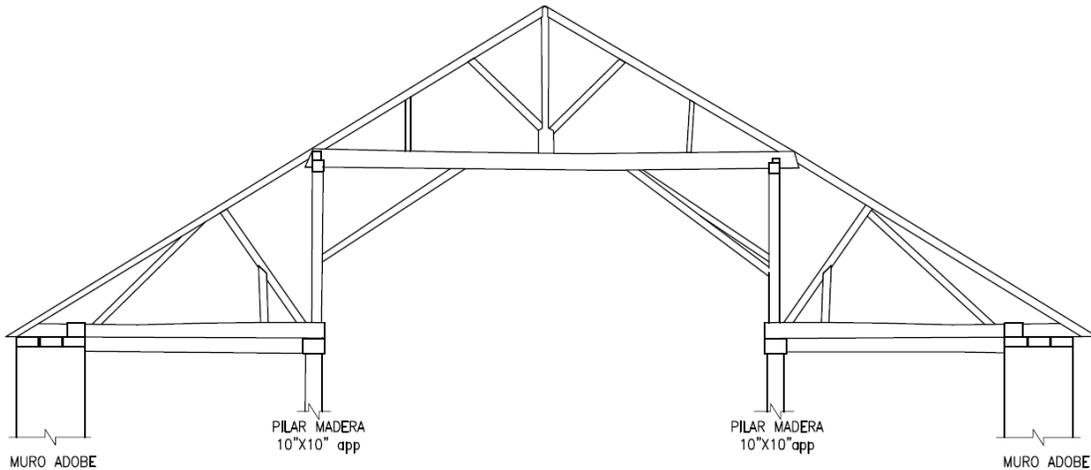


Figura 3-8 Estructura de techumbre iglesia La Matriz

3.2.2.3. Cimientos

La estructura presenta cimientos de piedra de 1.8 m de espesor.

3.2.2.4. Sistema de Piso

Se observan baldosas en el piso, por lo que se estima que debe tener estructura de pavimentación.

3.2.3. Estado Actual

3.2.3.1. Daños Visibles

En general la estructura se encuentra en buen estado, ya que luego de los daños sufridos por el terremoto de 2010, en el año 2012 fue objeto de un proyecto de restauración que permitió consolidar su estructura, se reconstruyeron los muros, se sellaron grietas e instalaron mallas para dar mayor resistencia, entre otras intervenciones al techo y campanario.

Sin embargo, se observan grietas en la fachada y que continúan en muros laterales, estas pueden deberse a un mecanismo de falla producto del peso de la torre, y una losa de hormigón en el coro

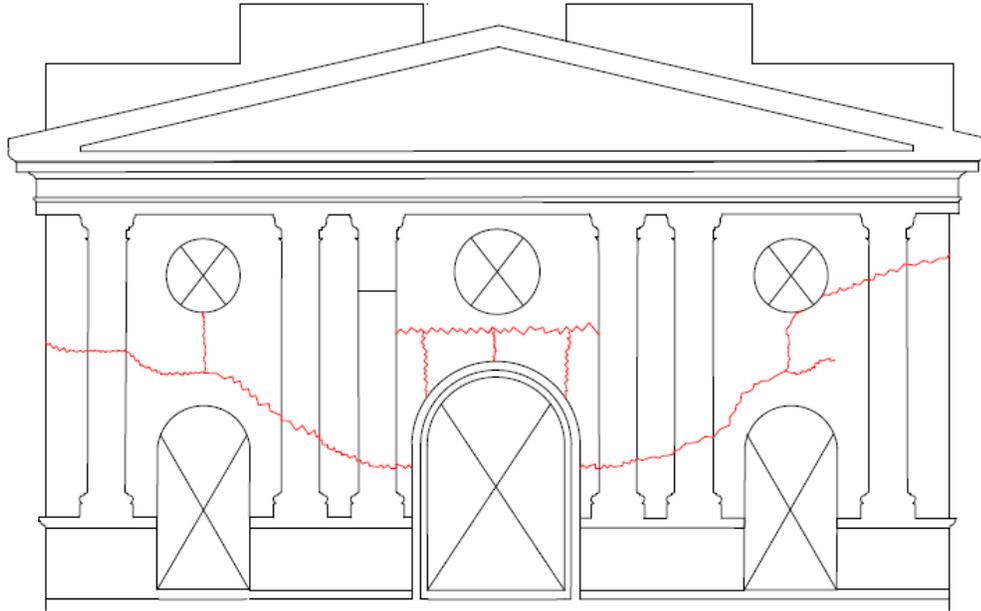


Figura 3-9 Cuadro fisurativo en fachada iglesia La Matriz

3.2.3.2.Estados de los muros

Lo muros se encuentran en buen estado, presenta estuco, por lo que no es posible ver la albañilería, sin embargo, esto se puede considerar como un indicador de que no presentan mayores daños.

3.2.3.3.Estado de la estructura de techo

El techo se encuentra en buen estado, lo que muestra un buen traspaso de las cargas de techo, sin embargo, debido al peso y al tipo de estructuración del techo no les da mayor estabilidad a los muros de la iglesia.

Según el estado actual de la iglesia, se esperaría una vulnerabilidad sísmica baja asociada el estado de conservación. Por otra parte, se tiene que la estructura es de forma regular que basa su estabilidad en sus muros gravitacionales. Aunque al ser grandes dimensiones (sobre todo en altura), la hace más vulnerable ante movimientos sísmicos.

3.3. IGLESIA SAN FRANCISCO DEL BARÓN

Ubicada en la calle Blanco Viel en el Cerro Barón, el conjunto del templo y monasterio fueron declarados Monumentos Histórico Nacional en 1983 por el Ministerio de Educación. La iglesia y particularmente su campanario se encuentran fuertemente arraigados al imaginario colectivo de Valparaíso, relacionado con el hecho de que lo marinos llamaban a la ciudad “Pancho” debido a la iglesia.

Fue inaugurada en 1846, luego de que los Franciscanos se mudaran desde el puerto al cerro Barón. Su particular fachada fue construida por el arquitecto Eduardo Provasoli en 1890. La alta torre de este templo, además de albergar las campanas de la iglesia incluía una maquinaria para el funcionamiento de un reloj, las cuales fueron quitados en una de sus intervenciones estructurales.



Figura 3-10. Iglesia San Francisco del Barón.

A lo largo de su historia la iglesia ha sido azotada por varios sismos, generando diversos daños en su estructura, sin embargo, se mantiene en pie hasta el día de hoy. No obstante, los eventos que más daño han causado a la estructura son los incendios. Tres veces ha sido atacada por el fuego. El primer incendio ocurrió en 1983 quemándose todos los elementos de madera quedando en pie sólo los muros de adobe. En 2010, es afectada por segunda vez por el fuego, dañándose la entrada y gran parte de la capilla. Un tercer incendio ocurre en 2013, en medio de los trabajos de restauración de los daños producidos en 2010, este último siniestro dejó a la iglesia con serios daños estructurales, asociados directamente al incendio, donde se quemaron elementos de refuerzo de madera que se habían dispuesto en los muros para dar estabilidad. Sin embargo, los mayores daños en la estructura son producto del abandono posterior al siniestro, al no contar con presupuesto para continuar con los trabajos. Esto ha provocado que hoy en día se encuentre totalmente cerrada.

3.3.1. Descripción General de la Estructura

El siguiente catastro estructural se confeccionó con información obtenida de la observación y mediciones hechas en terreno, complementadas con documentos proporcionados por la Ilustre Municipalidad de Valparaíso, correspondientes al proyecto de restauración llevado a cabo en 2013, previo al incendio. También se tomó como referencia el levantamiento hecho por Vargas (1998) en su trabajo de título.

3.3.1.1. Geometría Básica

La iglesia corresponde a una construcción de planta rectangular en base a muros de adobe, posee tres naves estructuradas sobre dos líneas de columnas y arcos que soporta la techumbre. El templo se encuentra adosado al convento que también está estructurado por muros de adobe.

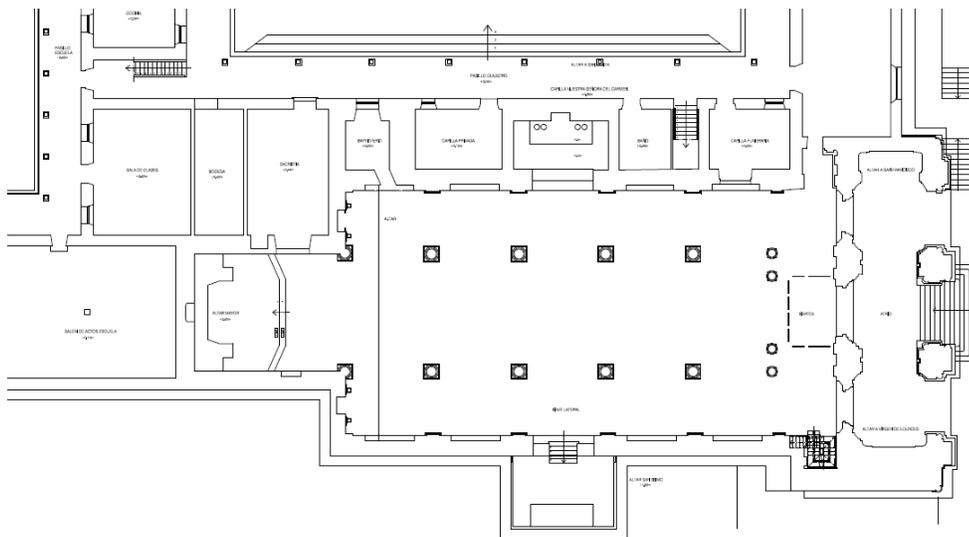


Figura 3-11 Planta iglesia San Francisco

Se suma al conjunto, la portada y campanario de ladrillo rojo construido con posterioridad, que alcanza los 40 metros de altura. El sistema estructural de esta torre consiste en muros, pilares y arcos de albañilería. Se pueden distinguir cuatro niveles (desde el punto de vista estructural), los cuales Vargas en su trabajo de título (Vargas, 1998) describe de la siguiente manera:

El primer nivel está construido por tres arcos de medio punto, la parte trasera del atrio está construida por seis arcos, tres hasta el nivel medio del piso y los otros hasta la altura máxima. Existe un arco por cada costado conjuntamente de muros exteriores.

El segundo nivel tiene una altura de 6.1 m, está conformado por tres arcos frontales y traseros (de los cuales solo el central está descubierto, los otros se encuentran tapados), y un arco lateral por ambos costados.

El tercer nivel tiene una altura de 9.26m posee un arco en cada costado y pilares en cada esquina.

El cuarto y último nivel corresponde a una cúpula más estructura superior de madera.

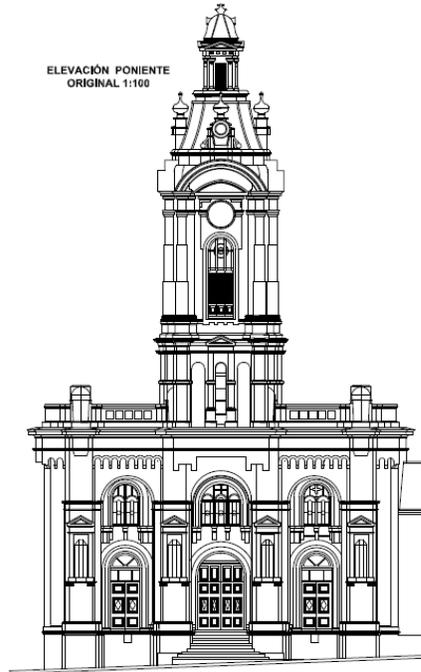


Figura 3-12 Fachada iglesia San Francisco

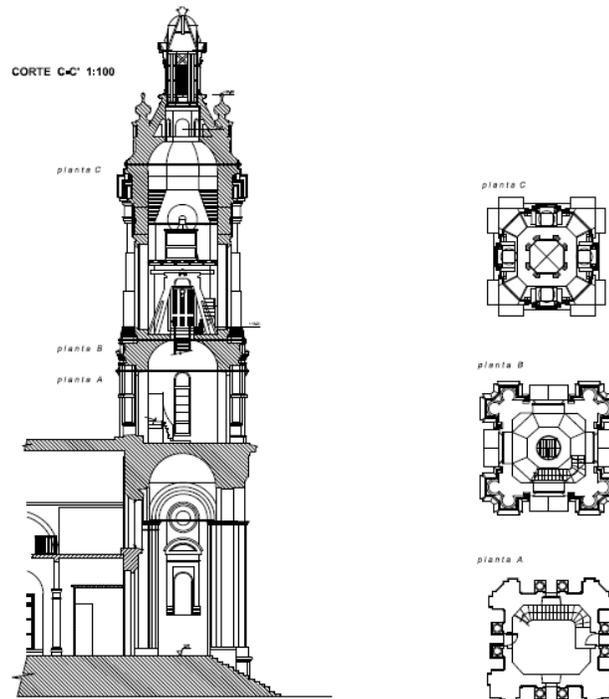


Figura 3-13 Detalle de la torre de la iglesia San Francisco. Fuente (Vargas, 1998)

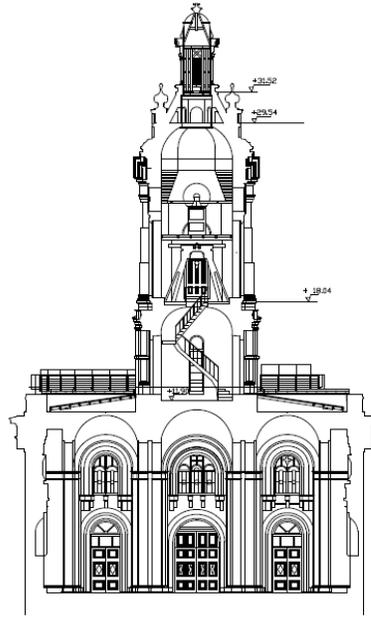


Figura 3-14 Corte Transversal iglesia San Francisco

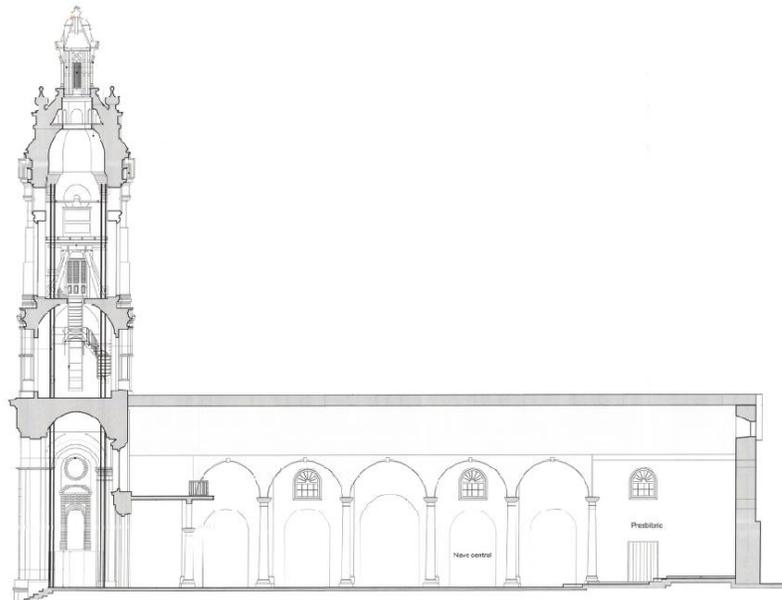


Figura 3-15 Corte longitudinal iglesia San Francisco

3.3.2. Caracterización Estructural

La estructura sismorresistente está compuesta por muros de albañilería simple, los cuales usan su peso para resistir las sollicitaciones horizontales producto del sismo, además utilizan el confinamiento dado por estructuras adosadas. Las cargas verticales son transmitidas desde el techo a muros y pilares interiores a través de las cerchas de madera.

3.3.2.1. Tipos de muros

Los muros del templo (así como del convento colindante) son de albañilería de adobe de 1.2 m de espesor. Mientras que la fachada y torre corresponde a albañilería simple con mortero de cal.

3.3.2.2. Estructura de techo:

Actualmente el templo no tiene techo. Sin embargo, de información disponible se sabe que la techumbre era de estructura de madera y tejas con pendiente a dos aguas.

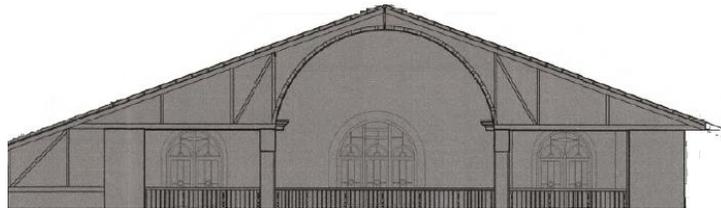


Figura 3-16 Estructura de techumbre iglesia San Francisco

3.3.2.3. Cimientos

Se estima que correspondiente a la técnica utilizada en la época, los cimientos sean de mampostería de piedra formando una especie de zapata corrida bajo muros y aisladas bajo pilares.

3.3.2.4. Sistema de Piso

Actualmente es suelo descubierto, aunque se sabe que el piso correspondía a entablillado de madera.

3.3.3. Estado actual

3.3.3.1. Daños visibles

Después del incendio en 2013, el templo quedó sin techo. Los muros perimetrales de adobe quedaron expuestos al ambiente, acumulando humedad, esta condición daña la consistencia estructural del material, provocando vaciamiento en algunos muros por este motivo.

Se observa estructuras de madera quemadas (estructuras correspondientes a la reconstrucción que se llevaba a cabo previo al incendio).

En la fachada se registraron reemplazo de ladrillos, presumiblemente de la última intervención.

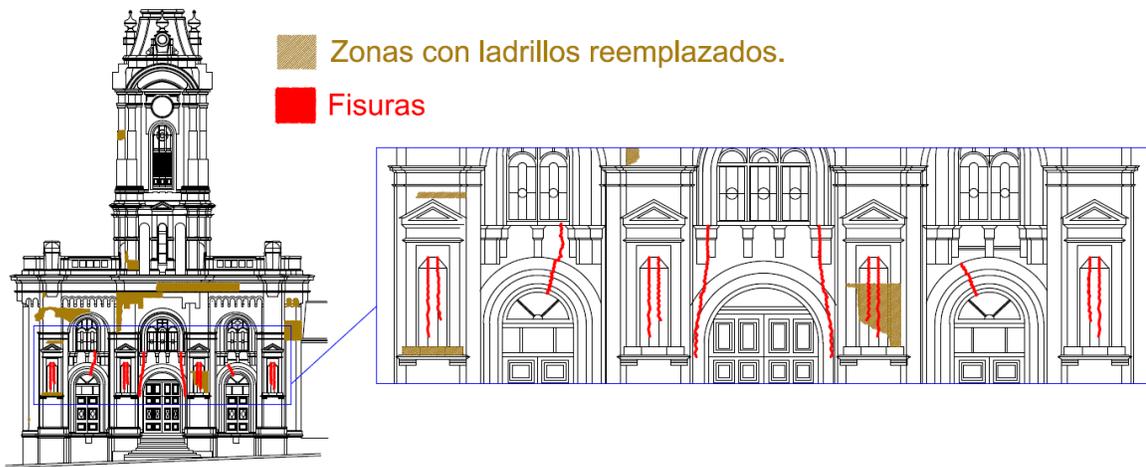


Figura 3-17 Registro de la fachada iglesia San Francisco

3.3.3.2. Estado de los muros

Los muros perimetrales de adobe quedaron expuestos al ambiente, esto provoca que acumulen humedad, hay muros que presentan vaciamiento por este motivo.

3.3.3.3. Estado de la estructura de techo

En estado actual no tiene estructura de techo.

3.4. IGLESIA SANTA ANA

Esta iglesia está ubicada calle Balmes #114-116 esquina Eyzaguirre, detrás del edificio de la población obrera en el Cerro Cordillera. Se comenzó a construir en 1880, bajo el diseño del arquitecto Víctor Romero Silva para prestar ayuda a los servicios eclesiásticos de la iglesia La Matriz. Fue terminada e inaugurada en 1882.

En 1922 pasa a depender de las monjas de Santa Ana de Juhani, hasta 1960, año en que el templo y el edificio vecino quedaron bajo la tuición de una organización laica de asistencia a niñas huérfanas, dejando de prestar servicios eclesiásticos a la comunidad.

Años después la iglesia queda completamente clausurada ante posible colapso debido a los daños que presenta, provocados por distintos agentes, principalmente sismos y el paso del tiempo sin mantenciones. Actualmente la iglesia y estructuras adyacentes son administradas por el Centro Comunitario Espacio Santa Ana, el cual ideó una estrategia de recuperación del espacio desde una lógica de "autogestión comunitaria", con el objeto de darle valor al inmueble para ser usado como centro cultural. En julio de 2013 la capilla sufre el derrumbe de uno de sus muros de adobe (muro posterior), el cual, en el año 2014 fue reconstruido utilizando materiales y técnicas similares a las originales. A la espera de su consolidación estructural completa y reapertura al público, el templo se utiliza como bodega y taller de construcción de la comunidad.



Figura 3-18 Iglesia Santa Ana

De estilo neoclásico, su estructuración básica consiste en cimientos de piedra, muros de adobe y estructura de techumbre de madera, con un pórtico de columnas circulares de albañilería de ladrillo y frontón triangular de madera cubierto por planchas de zinc. Sobre

el pórtico de la fachada se levanta una torre de madera, donde se encuentra el campanario.

3.4.1. Descripción General de la Estructura

La ficha de catastro estructural que se presenta a continuación fue elaborada principalmente con la información recopilada en terreno, mediante la observación y conversaciones con la organización del Centro Cultural Espacio Santa Ana, quienes cuentan con la administración de la iglesia. Complementado con la información presentada por Pajera (2011) en su trabajo título.

3.4.1.1. Geometría Básica

La estructuración básica está compuesta por cuatro muros perimetrales exteriores de adobe, mientras que los pilares interiores y techumbre constan de vigas y columnas de madera. Cuenta con aproximadamente 300 m² construidos en la base, y tiene una altura hasta la cumbrera del techo de 9 m., además de una torre sobre ésta de otros 6 m., llegando a una altura total de 15 m. desde la base de sus muros.

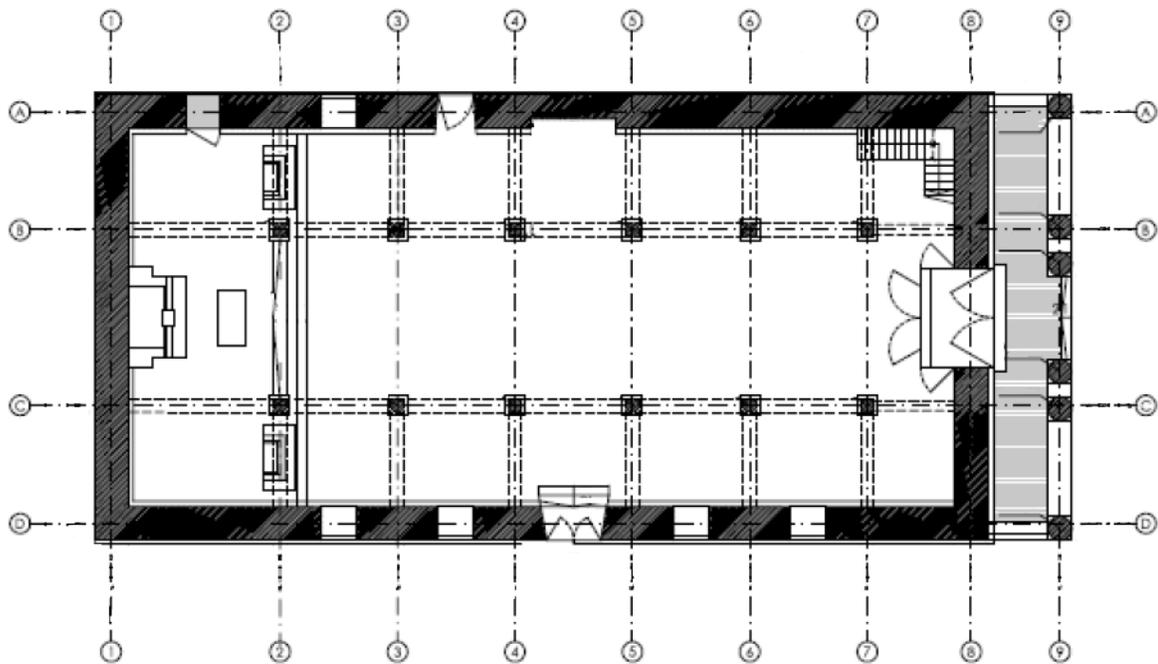


Figura 3-19 Planta iglesia Santa Ana

En la fachada tiene las 6 columnas circulares de albañilería pareadas con antepecho. Al medio de ellas una puerta doble de entrada principal. Lateralmente a ambos costados, presenta cuatro ventanas simétricas pareadas a una puerta secundaria. (Pajera, 2011)

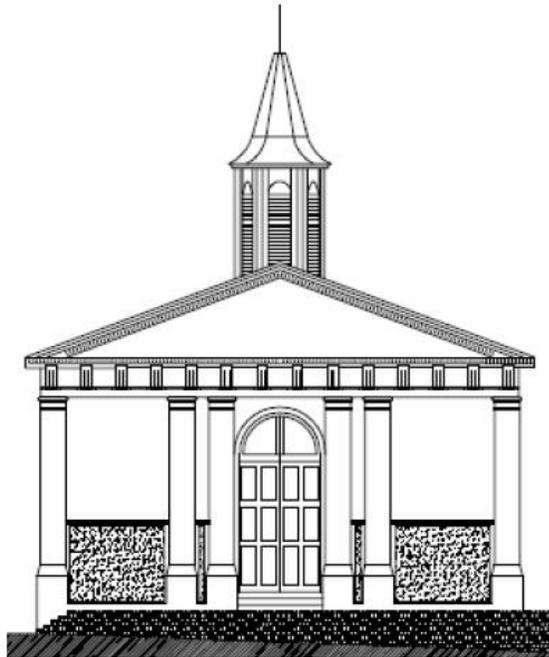


Figura 3-20 Fachada iglesia Santa Ana

La fachada oriente de adobe, presenta una puerta con forma de arco de medio punto (actualmente clausurada) y pequeñas ventanas.

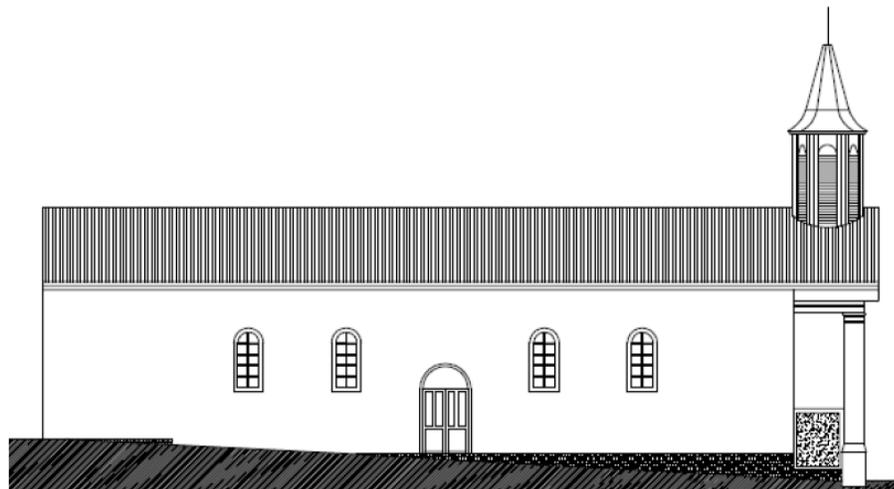


Figura 3-21 Fachada Esta iglesia Santa Ana

El interior consta de dos hileras de columnas longitudinales en arco, que determinan las naves, los cuales están conectados en arcos iguales transversalmente. El techo está estructurado con vigas de madera que descansan sobre los muros. La parte superior de la nave central consta de una terminación en forma de cañón que recorre la iglesia longitudinalmente y que une los ejes longitudinales de arcos semi circulares entre pilares.

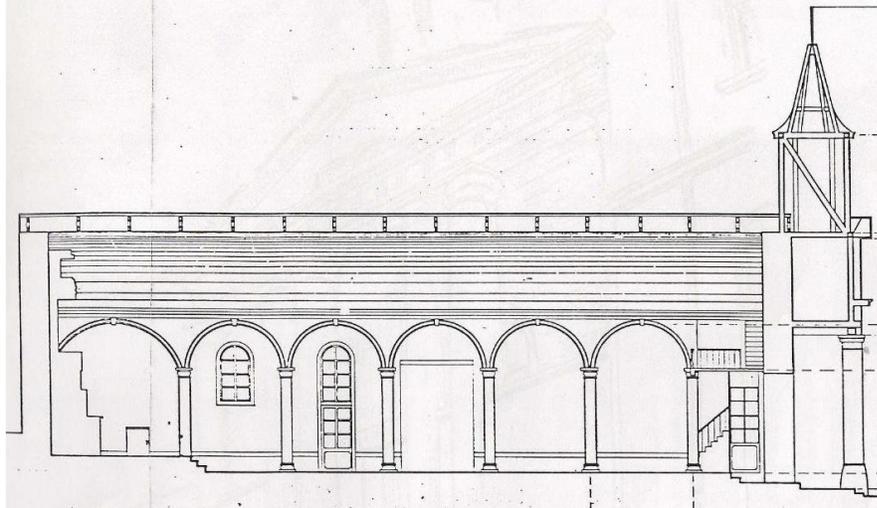


Figura 3-22 Corte longitudinal iglesia Santa Ana

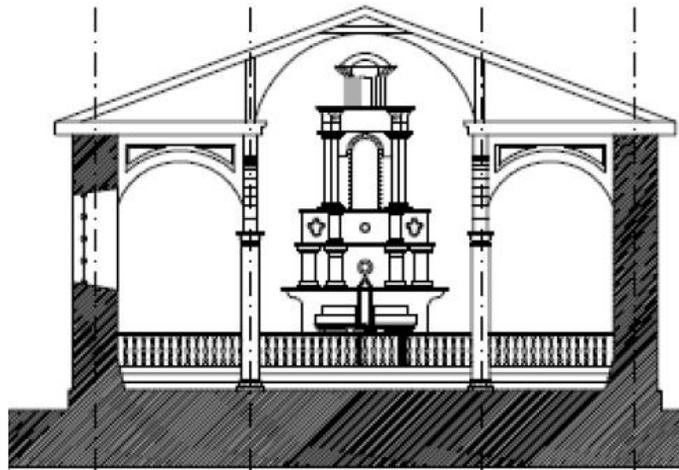


Figura 3-23 Corte transversal iglesia Santa Ana

3.4.2. Caracterización Estructural

La estructura sismo resistente corresponde a muros gravitacionales de adobe en su perímetro, los cuales utilizan su gran masa para resistir los esfuerzos horizontales producto del sismo. Además, utiliza el comportamiento conjunto, dado por la trabazón entre muros perpendiculares. Las cargas verticales son transmitidas a los muros perimetrales y columnas interiores de madera, a través de las cerchas.

3.4.2.1. Tipo de muros

Los muros corresponden albañilería simple de adobe de 1 metro de espesor en su perímetro. Las unidades de albañilería se pegaban con mortero de cal, extraída de las canteras de yeso, yeseras, o de cal, caleras, que se mezclaba con agua y arena

3.4.2.2. Estructura de techo

La estructura de techo corresponde a cerchas de madera a dos aguas, las cuales actualmente se encuentran descubiertas teniendo una configuración como la mostrada en la Figura 3-24. La cubierta observada está compuesta por planchas de zinc.

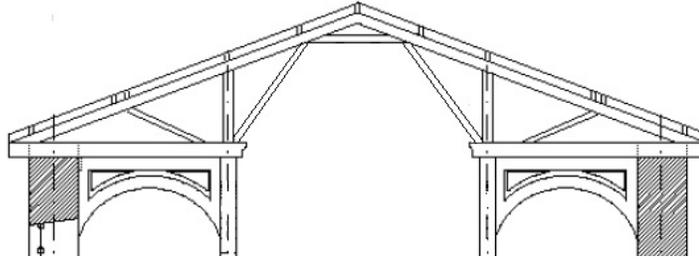


Figura 3-24 Estructura de techo iglesia Santa Ana

3.4.2.3. Cimientos

Se desconoce cómo son las fundaciones exactamente, pero se pueden hacer conjeturas según como se ha construido en la zona. Es muy probable que este edificio presente zapata corrida de mampostería de piedra ligada con un mortero de la época. Es posible que las dimensiones de la zapata sean las que son visibles en la parte frontal de la iglesia, manteniéndose pareja en dimensiones y nivel, ya que no presenta asentamientos diferenciales notorios. (Pareja, 2011).

3.4.2.4. Sistema de Piso

Actualmente es suelo descubierto, aunque se sabe que el piso correspondía a entablillado de madera. sobre suelo compactado.

3.4.3. Estado Actual

3.4.3.1. Daños visibles

Se observa una grieta vertical en columna de fachada (Figura 3-25), debida posiblemente al peso de la torre provocando mecanismo de falla de volcamiento de fachada.

Las maderas tanto de la estructura de techo como de la torre campanario se encuentran deterioradas debido a la humedad, lo que reduce sus propiedades mecánicas, afectando el desempeño de estas sub partes de la estructura.

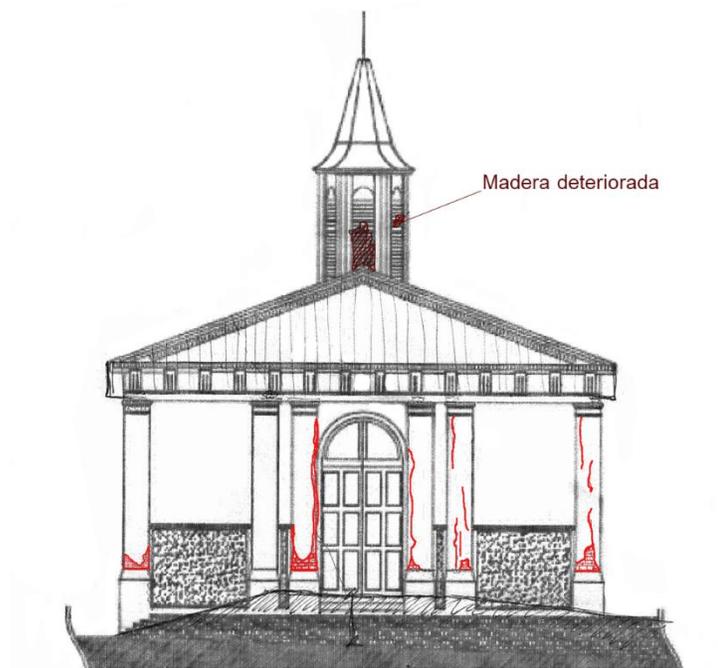


Figura 3-25 Cuadro fisurativo en fachada, iglesia Santa Ana

3.4.3.2. Estado de los muros

En el exterior los muros se encuentran cubiertos por planchas de zinc, presumiblemente para protegerlos del contacto con el ambiente, especialmente la lluvia, mientras que en interior se encuentran descubiertos pudiéndose observar deterioros como vaciamiento en algunos muros. En la mayoría de estos se colocaron mallas tipo ACMA para sostenerlos y dar estabilidad fuera del plano.

Durante los trabajos en 2013, el muro trasero de la iglesia se derrumbó, siendo reconstruido completamente utilizando material original y reforzado con malla ACMA.

3.4.3.3. Estado de la estructura de techo

En estado actual, la estructura no presenta cielo, por lo que es posible ver la estructura de techo, el sistema estructural de las cerchas se encuentra de manera íntegra, aunque la madera presenta ciertos deterioros propios al abandono y falta de mantención. Este deterioro afecta en la resistencia de la madera de las cerchas, sin embargo, actualmente no están sometidas a grandes solicitaciones verticales

3.5. IGLESIA DOCE APOSTOLES

Declarada Monumento Nacional en 2003, mediante DECRETO N° 355. Esta iglesia está ubicada en el barrio El Almendral de Valparaíso, específicamente en Avenida Argentina 550, a un costado del congreso nacional de Chile.

La construcción de esta iglesia se inició 1869, a cargo del arquitecto Juan Eduardo Ferhman, siendo inaugurada en el año 1875.

El proyecto original contemplaba una fachada con dos torres de gran altura, de las cuales se alcanzó a construir sólo una parte hasta que en el terremoto de 1096 la iglesia sufrió graves daños. Y en su posterior reconstrucción se adecuó la fachada siendo la que se mantiene hasta el día de hoy.



Figura 3-26 Iglesia Doce Apóstoles

En el año 2006, se hizo extracción del pavimento de madera del templo y fue reemplazado por baldosas micro- vibradas.

Debido al estado que se encuentra post terremoto del año 2010, actualmente la iglesia está completamente cerrada al público, a la espera de un proyecto de restauración.

3.5.1. Descripción General de la Estructura

El presente catastro estructural se realizó basado en la información entregada por la Ilustre Municipalidad de Valparaíso, correspondiente a los estudios hechos en el año 2017 para un proyecto de restauración de la iglesia.

3.5.1.1. Geometría Básica

El templo es de una planta basilical de tres naves, de 60 m de largo y 23 m de ancho. La nave mayor tiene una altura de 21.7 m hasta la cúspide.

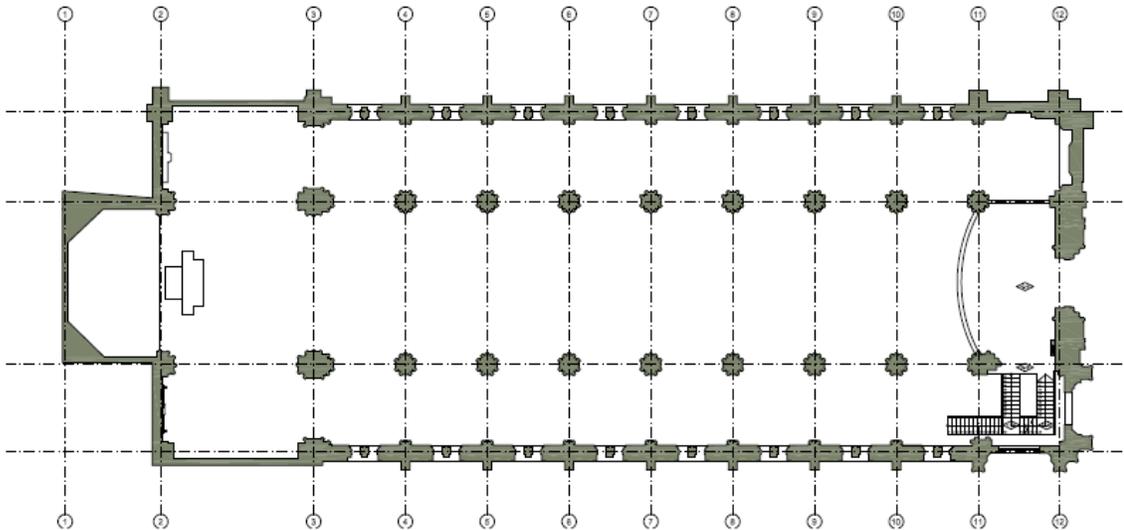


Figura 3-27 Planta iglesia Doce Apóstoles

En el altar mayor se alza una cúpula de 11 m de diámetro que llega a los 27 m sobre el suelo, naciendo una torre de madera de 11 m. (se puede observar en la Figura 3-28 fachada posterior)

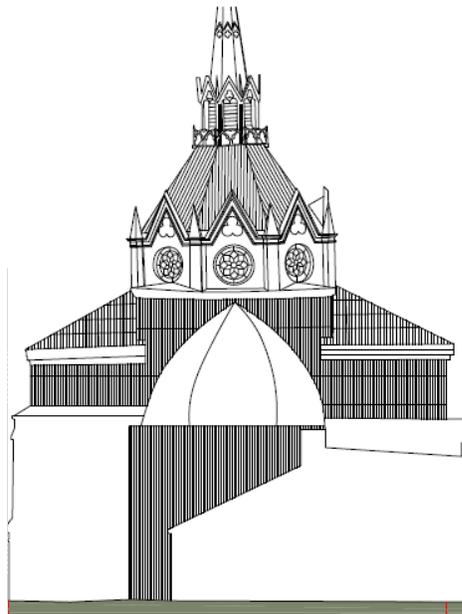


Figura 3-28 Fachada posterior (Poniente) iglesia Doce Apóstoles

La fachada principal de 21.7 metros de altura hasta la cúspide, consta de tres vanos correspondientes a las puertas, y sobre el vano central existe un óculo de 2.1 m de diámetro.

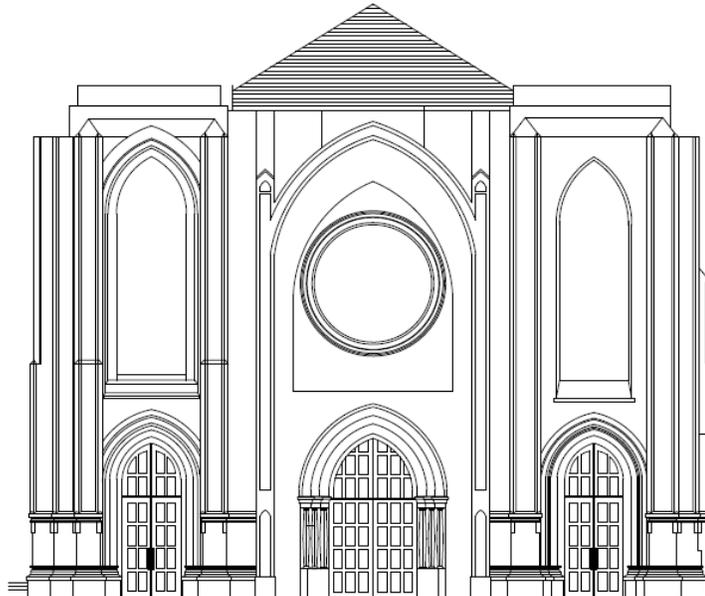


Figura 3-29 Fachada iglesia Doce Apóstoles

Las elevaciones (norte y sur) corresponden a muros de albañilería de ladrillo de 10 metros de altura, con abertura correspondiente a puertas laterales de la iglesia y vanos de ventanas como se muestran la Figura 3-30 y Figura 3-31

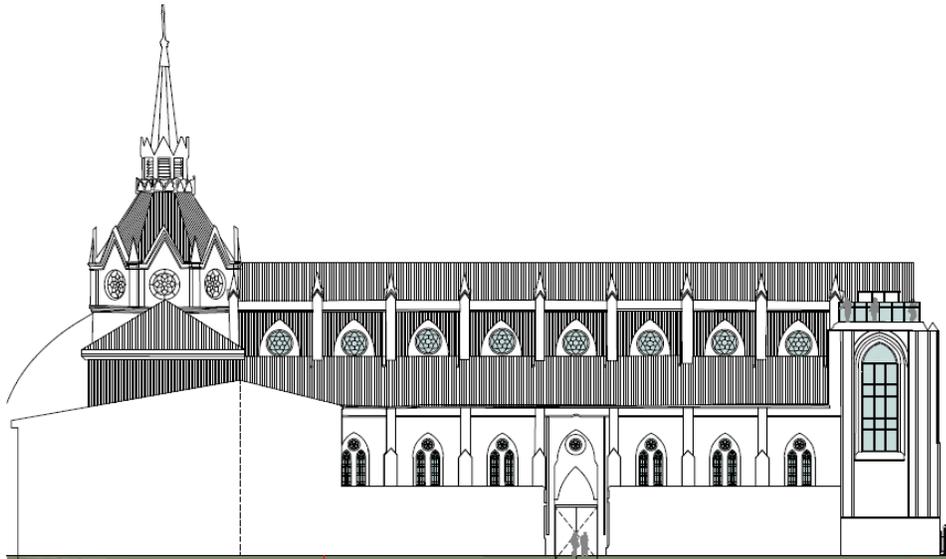


Figura 3-30 Fachada sur iglesia Doce Apóstoles

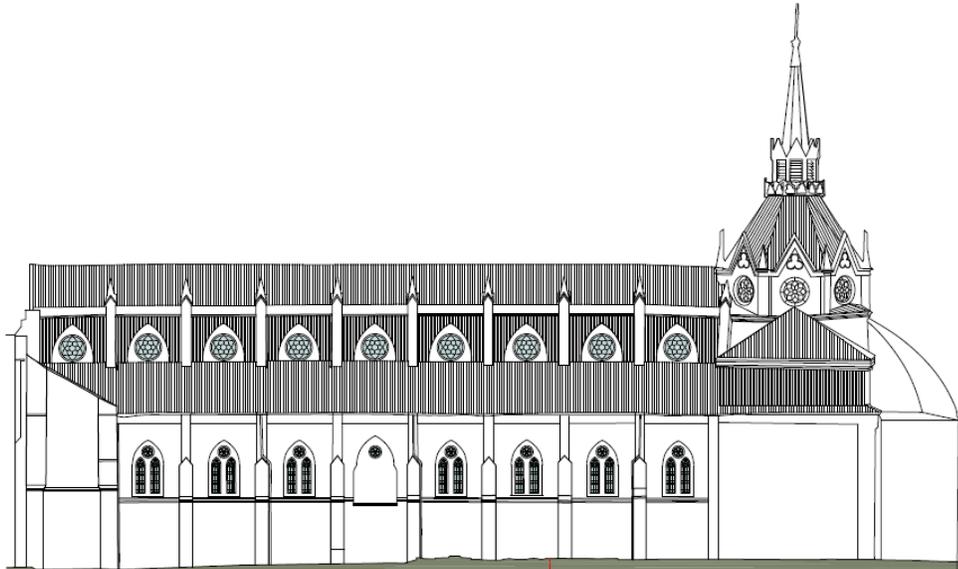


Figura 3-31 Fachada Norte iglesia Doce Apóstoles

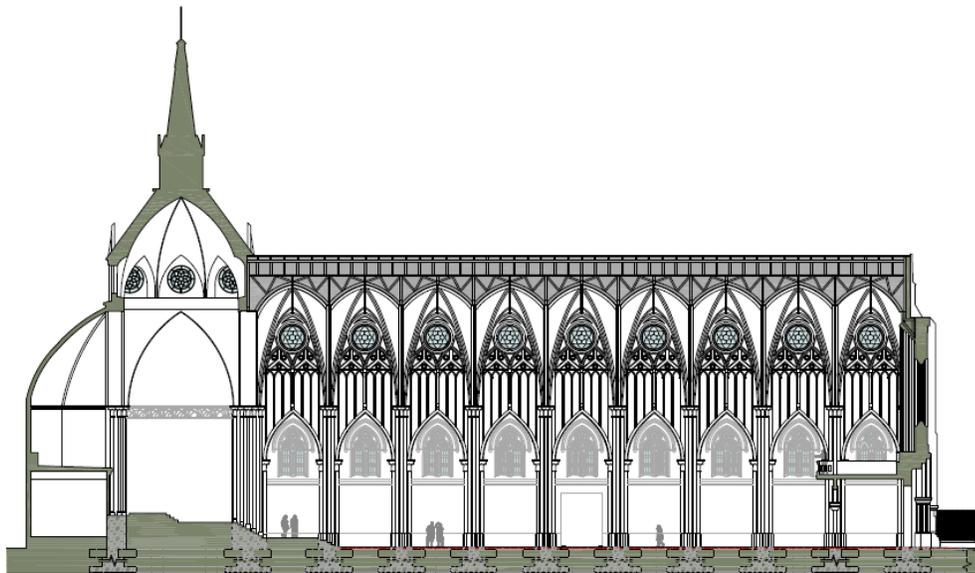


Figura 3-32 Corte longitudinal iglesia Doce Apóstoles

3.5.2. Caracterización Estructural

La estructura se conforma a través de muros perimetrales de albañilería de ladrillo y pilares interiores que dan formas a las tres naves.

Los muros de albañilería de ladrillo son arriostrados por contrafuerte del mismo material que coinciden con la modulación de los pilares de la planta, rigidizando el sistema estructural. Además, se cuenta con refuerzos metálicos como tensores que unen los contrafuertes, y perfiles metálicos empotrados en las fundaciones evitan el esfuerzo de corte.

3.5.2.1. Tipos de muros

Los muros perimetrales son de albañilería de ladrillo macizo de 1 metro de espesor. Mientras que los pilares de albañilería de ladrillo de 1m x1m.

3.5.2.2. Estructura de techo

El techo presenta bóvedas estructurales de madera y refuerzos metálicos (producto de intervenciones posteriores). La estructura de cerchas de madera de la techumbre se muestra en la siguiente figura.

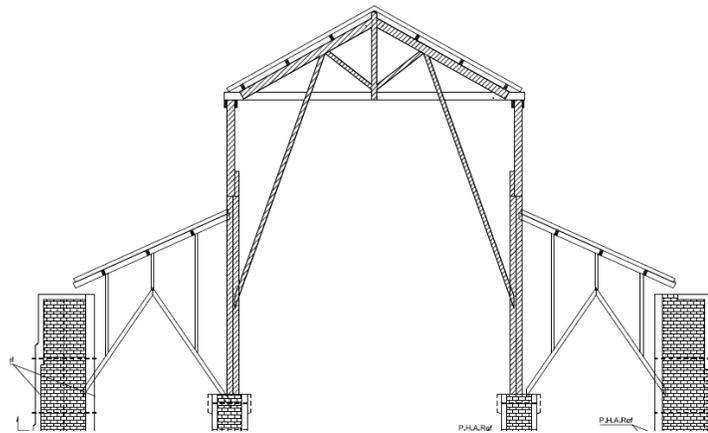


Figura 3-33 Esquema estructura de techo iglesia Doce Apóstoles

La cubierta corresponde a planchas de zinc.

3.5.2.3. Cimientos

Cimientos de mampostería de piedra aislado bajo pilares y corrida en muros.

3.5.2.4. Sistema de Piso

Según perfil de proyecto de restauración de 2017, en el año 2006, se hizo extracción del pavimento de madera del templo y fue reemplazado por baldosas micro-vibradas.

En sectores de altares si mantiene envigados de madera.

3.5.3. Estado actual

3.5.3.1. Daños visibles

Según levantamientos a lo largo del proyecto de intervención se han observado daños considerables tanto por acciones mecánicas como daños propios del abandono.

La Iglesia se encuentra con un deterioro significativo en su cubierta, ocasionando filtraciones permanentes.

3.5.3.2. Estado de los muros

En la fachada principal de acceso se pueden apreciar varias grietas de corte diagonal en torno a vanos de dinteles. Están localizadas en cercanías de arcos. Esta situación se repite por su interior.

Grietas en los vanos de puertas y ventanas atraviesan el espesor del muro y dan cuenta de daños estructurales. (GUIXE Arquitectos, 2017)

3.5.3.3. Estado de la estructura de techo

Se visualiza que la estructura de techumbre debe estar dañada por las humedades y además por la presencia de insectos horadores, los que han colaborado en el deterioro general que afecta a la Iglesia.

La cubierta de zinc del templo y cúpula se encuentra en mal estado, hojalatería de la cubierta deteriorada, como bajadas, canales y forros

Estructura de techumbre de madera presentaría posibles daños de termitas debido a la humedad por filtraciones. (GUIXE Arquitectos, 2017)

3.6. IGLESIA DEL SAGRADO CORAZÓN DE JESUS

Esta iglesia está ubicada en la calle Belgrano esquina Yussef, en el Cerro Barón. Está posicionada en el sector con más pendiente del cerro, haciendo que el edificio destaque con respecto a las construcciones que la rodean. Nace de la expansión natural de la iglesia en el territorio. A fines del siglo XIX, el Cerro Barón había aumentado considerablemente su población, por lo que los sacerdotes de la Iglesia Doce Apóstoles no daban abasto con los servicios religiosos del sector, es así como 1895 y luego de varias demandas de los sacerdotes, el Arzobispado de Santiago acepta la creación de una nueva parroquia en el Cerro Barón. Su construcción se inicia en 1904, bajo el diseño de Francisco Garham. La mayor parte de la estructura es construida antes del terremoto de 1906, en el cual la iglesia no sufre mayores daños. Entre 1906 y 1909 se finalizan las obras de construcción, dando paso a su inauguración. (Bustos, 1974)

La Iglesia es una estructura de corte basilical, con inspiración en la arquitectura gótica, pero privilegiando el lleno por sobre las grandes aberturas o grandes ventanales, probablemente por asuntos económicos.



Figura 3-34. Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús

La impresión de altura era dada por la torre exterior, que poseía una gran esbeltez, hoy en día la torre se encuentra truncada por deterioro de su parte superior. Salvo por la torre, el conjunto es compacto y actúa estructuralmente como un solo elemento.

3.6.1. Descripción General de la Estructura

La ficha de catastro estructural que se presenta a continuación fue elaborada con información recopilada mediante observaciones en terreno, complementada con la información contenida en el documento desarrollado por Bustos (1974).

3.6.1.1. Croquis de plantas y fachadas:

La planta tiene una forma semi rectangular de aproximadamente 700 m² con una proporción aproximada de 1:2, donde se distingue una nave central mucho más ancha que las naves laterales que a su vez son más bajas.

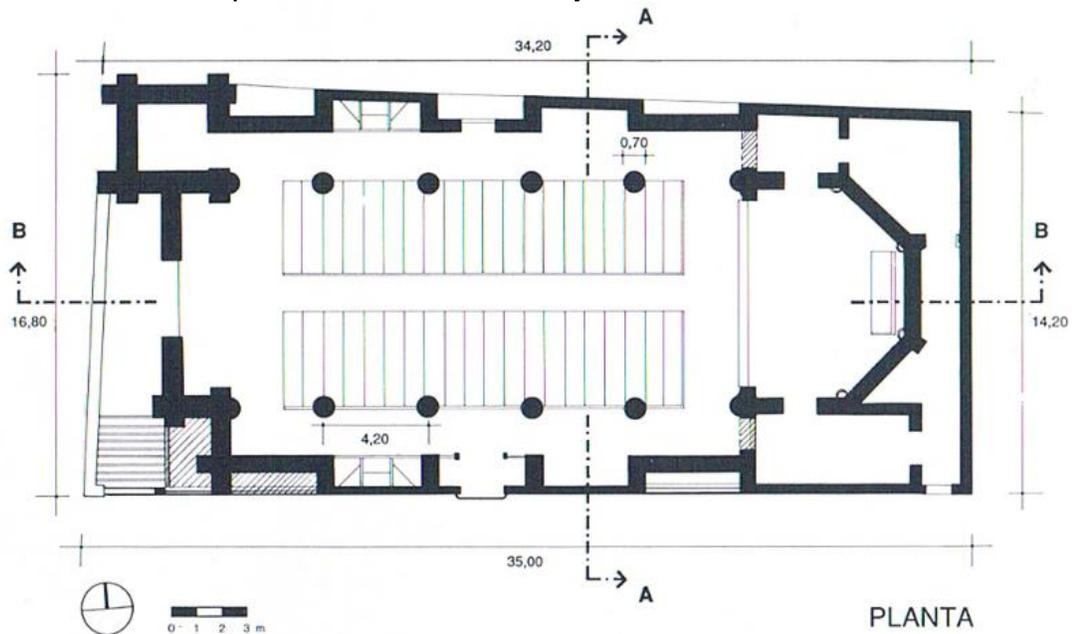


Ilustración 1. Planta Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús

La fachada principal presenta una forma asimétrica debida a la presencia de la torre. Con una puerta de acceso que representa una gran área respecto al muro de fachada junto una gran ventana que permite la entrada de luz. Presenta un frontón triangular de unos 3.5m de altura lo que le da una altura total de 15 m a la estructura de la iglesia.



Ilustración 2. Fachada principal iglesia Sagrado Corazón de Jesús

Las fachadas laterales presentan numerosas ventanas que se distribuyen a lo largo de los muros. Se puede apreciar dos niveles, las cuales representa la separación entre las naves de la iglesia.



Ilustración 3. Fachada lateral iglesia Sagrado Corazón de Jesús

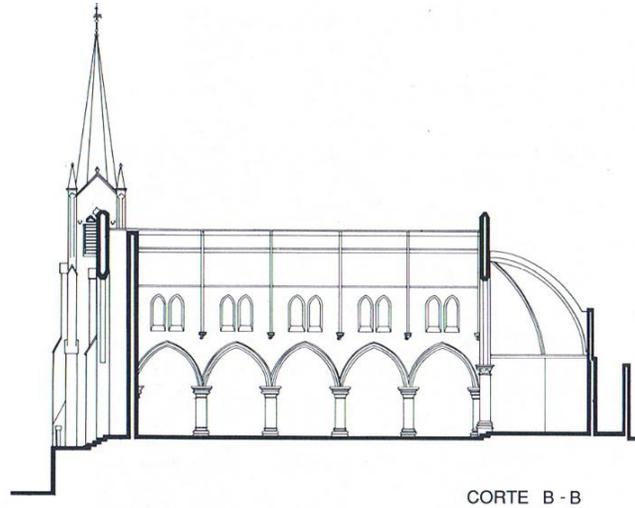


Ilustración 4. Corte Longitudinal iglesia Sagrado Corazón de Jesús

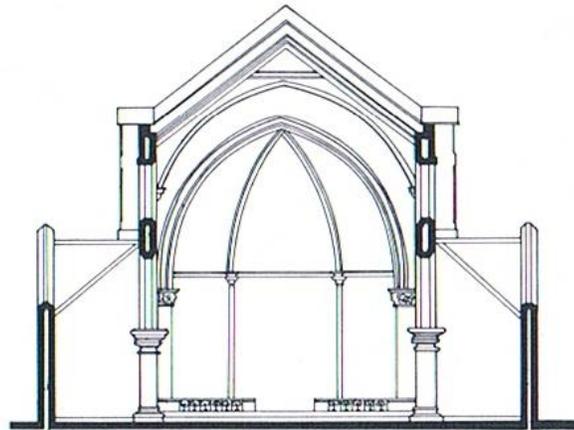


Ilustración 5. Corte transversal iglesia Sagrado Corazón de Jesús

3.6.2. Caracterización Estructural

El conjunto de la estructura descansa sobre gruesos muros de albañilería reforzados perimetralmente por contrafuertes. La techumbre de la nave central (más alta que la de las naves laterales) es sostenida por arcadas que descansan sobre columnas circulares.

La principal característica sísmo resistente de esta estructura está dada por la robustez de sus muros y lo compacto del conjunto, que resiste los esfuerzos horizontales producto del sismo de manera solidaria.

3.6.2.1. Tipo de Muros

Los muros perimetrales son de albañilería simple de aproximadamente 90 cm de espesor. Los laterales, debido a la inclinación que presenta la estructura, tienen una altura entre

5m (aprox.) en la parte más alta y 3m (aprox.) en la parte más baja. El muro de la fachada principal tiene una altura aproximada de 8.5 m.

Las naves están compuestas por columnas de 70 cm de diámetro y 3m de altura, los que sostiene una arcada (con arcos apuntados) que da la forma a la nave central, esta arcada presenta una sucesión de ventanas a lo largo de estas.

3.6.2.2.Estructura de techo

La estructura de techo corresponde a envigados de madera a dos aguas, que descansan sobre muros y pilares. Se observa que la cubierta está compuesta por planchas de zinc.

3.6.2.3.Cimientos

Los cimientos corresponden a mampostería de piedra.

3.6.2.4.Sistema de Piso

El piso presenta baldosas por lo que se infiere que este pavimentado.

3.6.3. Estado actual

3.6.3.1.Daños visibles:

En general no se observan mayores daños en la estructura. Existen desprendimiento de pintura y estuco en algunos sectores en el interior de la iglesia, presumiblemente por efectos de humedad. También se observan pequeñas fisuras en la punta de los arcos en muros de la nave central.

Actualmente la torre exterior se encuentra truncada, Se perdió toda la parte superior de esta, llegando a una altura de 11.5m aproximadamente.

3.6.3.2.Estado de los muros:

Los muros se observan en buen estado, presentan estuco, aunque en sectores tiene desprendimiento de pintura y estuco por efectos de la humedad.

3.6.3.3.Estado de la estructura de techo.

No se pudo observar el estado de la estructura del techo, pero se estima que debe estar en buen estado, debido al estado general de la iglesia.

CAPÍTULO 4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

4.1. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

Como se ha mencionado anteriormente, el riesgo sísmico de una estructura se define como la probabilidad de que ocurra un evento sísmico (amenaza sísmica) y las consecuencias negativas que este evento ocasione en la estructura (vulnerabilidad sísmica). Considerando que la amenaza sísmica no es controlable, la seguridad ante el riesgo sísmico sólo puede ser garantizada mediante la disminución de la vulnerabilidad sísmica. Esta vulnerabilidad es propia de cada estructura y depende de diversos factores como: materialidad, geometría, factores constructivos, estado actual, posición, y su interacción con el medio.

Al momento de diseñar una estructura, se consideran todos estos factores para garantizar una baja vulnerabilidad ante la acción de un sismo con una cierta intensidad durante un determinado tiempo de exposición. Sin embargo, las edificaciones patrimoniales fueron construidas con baja o nula noción de este concepto, por lo tanto, al abordar el tema de la seguridad estructural del patrimonio histórico, se busca calificar la respuesta de las estructuras ante posibles amenazas sísmicas, poniendo atención en: las propiedades de los materiales, el comportamiento de las formas estructurales típicas, los procedimientos de análisis con diferente nivel de refinamiento y los procedimientos de refuerzo estructural.

Los distintos métodos para evaluar la vulnerabilidad sísmica se pueden clasificar en dos grandes grupos, según sus enfoques: métodos mecánicos y métodos tipológicos. Los métodos mecánicos requieren de cálculos analíticos de respuesta del edificio o partes de éste, ante la acción de un sismo. Mientras que los métodos tipológicos son basados en la observación, sin requerir necesariamente de cálculos analíticos, se fundamentan en el reconocimiento de indicadores de vulnerabilidad característicos al tipo de edificio, materialidad y sistema constructivo.

En la práctica chilena, la forma de estimar la vulnerabilidad sísmica tiene un enfoque mecánico, en donde se realiza un levantamiento y posteriormente un análisis estructural, estimando la respuesta de la estructura ante las sollicitaciones provocadas por la acción sísmica, de acuerdo a las disposiciones de las normas de diseño sísmico (NCh433, DS61, NCh3332, NCh2369). Sin embargo, esta manera de evaluar las estructuras considera ciertas hipótesis que en el caso de construcciones patrimoniales conlleva bastante incertidumbre, como el desconocimiento de las propiedades de los materiales y técnicas constructivas. Sin ir más lejos, gran parte de las construcciones patrimoniales del país se estructuran por muros de albañilería simple, siendo el material más común el adobe, éste es un material no homogéneo y sus propiedades mecánicas varían con respecto a la manera y lugar en que fueron construidos. Otra dificultad en el modelamiento de construcciones patrimoniales es que en ocasiones no se cuenta con información completa como planos o documentos que muestren las características de la estructura, esto lleva a estimaciones que puede que no representen el comportamiento real de la estructura, o bien se requieran otro tipo de técnicas que sean costosas, como escaneo láser, o técnicas destructivas para el edificio. Todo lo anterior implica que el estudio de vulnerabilidad de un edificio patrimonial requiere bastante tiempo y trabajo, por lo tanto, si el objetivo es hacer un levantamiento territorial de la vulnerabilidad sísmica de las

construcciones patrimoniales, se requiere de métodos que sean más sencillos de implementar, de manera de aplicarlos a varias estructuras en poco tiempo, sin requerir análisis profundos y costosos a cada edificio.

Ante la inquietud de contar con herramientas rápidas y simples de evaluación, países como Japón, Estados Unidos e Italia, han desarrollado técnicas de evaluación basadas en la experiencia de sismos pasados y en la observación de los daños provocados, pudiendo identificar fallas recurrentes para las distintas tipologías arquitectónicas y constructivas. Así, se han desarrollado análisis cuantitativos, basados en parámetros cualitativos de la estructura. O, en otras palabras, se han desarrollado métodos que identifican elementos vulnerables y/o resistentes de la estructura y le dan una calificación, de manera de entregar un valor numérico de la vulnerabilidad sísmica.

Si bien estas técnicas simplificadas de evaluación se basan principalmente en la observación y se han desarrollado para evaluar de manera rápida y sencilla un grupo de edificaciones, discriminando cuales necesitan mayor atención, se requiere que quien los aplique, entienda el funcionamiento de la estructura y los factores que influyen en esta.

En general estos métodos de evaluación entregan un índice de vulnerabilidad que toma valores entre 0 y 1, para representar el grado de exposición que tiene la estructura a sufrir daños cuando se ve sometida a sollicitaciones sísmicas. Se han desarrollado distintos índices que cuantifican la capacidad de la estructura frente a la acción los sismos, rescatando alguna característica resistente del edificio. Un ejemplo de esto es el denominado *Índice de Meli*, (o densidad de muro). El cual está enfocado en estructuras con muros de albañilería, de baja altura (<13m), y de formas regulares. Evalúa la vulnerabilidad mediante la cantidad de muros en planta en cada dirección. Usa la lógica de la repartición del corte sísmico entre los muros de la base (Meli, 1991).

Otra manera de evaluar la vulnerabilidad sísmica es el índice de vulnerabilidad presentado por el GNDT (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*) (Lagomarsino & Podestà, 2004), el cual toma en cuenta variables como las características geométricas del edificio, los materiales y sistema constructivo. Les asigna clases de vulnerabilidad que van de la A a la C (de menos a más vulnerable) que tienen una calificación numérica correspondiente. Así, este método evalúa 10 características del edificio y les asigna un peso, que representa la importancia de la característica en comportamiento del edificio. Se realiza una suma ponderada por el valor de importancia a cada característica con su clase asignada, resultando en un índice de vulnerabilidad. Este método se comienza a utilizar a partir de 1993, pero se ha ido ajustando principalmente en la incorporación de categorías que representen el comportamiento de la estructura. Para llevar a cabo la evaluación con esta herramienta, se requiere de un levantamiento general y un conocimiento de la estructura. Ha sido utilizado en el estudio de estructuras en Chile, principalmente en investigaciones académicas, tomando consideraciones en las características locales, y las tipologías de estudio. Algunos ejemplos de estos son los trabajos de Gent K. et al. (2005), Pareja (2011), y Sánchez M.I. (2013)

Con respecto a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de bienes patrimoniales, Italia cuenta con un lineamiento específico para este tipo de estructuras basado en su norma

técnica constructiva (NTC, 2008). La *Linee Guida de la Directiva del presidente del Consejo de Ministros para la evaluación y reducción del riesgo sísmico en el Patrimonio Cultural, en línea con la normativa técnica para las construcciones del 14 de enero de 2008*. Esta Directiva presenta una metodología con distintos niveles para la evaluación y protección de bienes patrimoniales.

Con el objetivo de contar con una herramienta similar para evaluar las construcciones patrimoniales en Chile, en este trabajo de título, se implementará el método italiano de la *Linee Guida* a cinco iglesias patrimoniales de la ciudad de Valparaíso.

Cabe mencionar que la tipología “iglesia” es una de las más importantes cuando se habla de bienes patrimoniales y que éstas presentan una metodología particular en la *Linee Guida*, por lo que se justifica su utilización en este trabajo. Además, esta metodología fue escogida debido a que se ha utilizado en iglesias patrimoniales en el casco histórico de la ciudad italiana de Matera (“Sassi di Matera”) el cual es Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO desde 1993, punto coincidente con la ciudad de Valparaíso. (Laterza, D'Amato, Diaz, & Chietera, 2017).

4.2. MÉTODO ITALIANO DE LA LINEE GUIDA

La “*Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14 gennaio 2008*” (MiBACT, 2011) es una directiva italiana, que entrega indicaciones para la evaluación y reducción del riesgo sísmico de los bienes patrimoniales, basado en los lineamientos de la *Norma Técnica Constructiva de 2008* en aquel país (NTC 2008) (MIT, 2008).

Se diseñó con la intención de especificar la metodología para evaluar el nivel de seguridad contra acciones sísmicas y diseño de intervenciones de construcciones históricas. Esta directiva se refiere específicamente a construcciones de mampostería.

Estos lineamientos son el resultado del estudio sistemático de estructuras afectadas por sismos a partir de la década del 90 en Italia, y consistió en el levantamiento de daños, los cuales fueron agrupados según tipo de estructura, materialidad, intensidad de la sollicitación, entre otros. Así se determinó que el comportamiento de las estructuras se podría describir mediante el modelamiento de sub-partes características a cada tipología, denominadas macroelemento, que interactúan ente sí.

La metodología presenta tres niveles de evaluación de complejidad creciente, para determinar la seguridad sísmica de los bienes patrimoniales. El primer nivel tiene un enfoque tipológico, en donde se reconocen macroelementos característicos según tipología del edificio estudiado y sus correspondientes indicadores de vulnerabilidad. Por otra parte, los niveles 2 y 3 tienen un enfoque mecánico, donde se evalúa analíticamente la respuesta de la estructura o parte de ella (macroelementos) frente a una posible amenaza sísmica.

Siendo más específico, se puede mencionar lo siguiente de cada nivel de evaluación de la metodología presentada en la *Linee Guida*:

Nivel 1 (LV1): Se basa en un enfoque cualitativo para evaluar la seguridad sísmica a escala territorial y, por lo tanto, está principalmente dirigido a establecer una lista de prioridades para los planes de intervención sobre el Patrimonio Cultural. Analiza las vulnerabilidades de todos los posibles macroelementos del edificio, proporcionando un índice de vulnerabilidad global de la estructura, el cual se vincula a través de relaciones empíricas a una aceleración de terreno que provoca el colapso.

Nivel 2 (LV2): Mediante la recopilación de mayor información con respecto al método LV1, este nivel permite definir el grado de vulnerabilidad de las porciones individuales de la estructura (macroelemento) determinando la aceleración del terreno relacionada con la supuesta condición final (colapso del macroelemento).

Nivel 3 (LV3): Es el nivel de análisis más complejo ya que se refiere a un modelo global de la iglesia, lo que permite describir adecuadamente la distribución de cargas verticales y la interacción entre el mecanismo de respuesta local hasta la primera falla (Laterza, D'Amato, Diaz, & Chietera, 2017).

Por tanto, la *Linee Guida* sostiene que un edificio patrimonial puede ser estudiado en distintos niveles dependiendo del tipo información que se requiera. El nivel LV1 representa un análisis rápido para establecer prioridades a nivel territorial. El nivel LV2 se debe utilizar cuando se quiera hacer intervenciones en elementos localizados de un edificio en particular, sin que afecte el funcionamiento global de la estructura. Y el nivel LV3 está enfocado en el estudio acabado del edificio y se hace necesario para la planificación proyectos que intervengan la estructura principal del edificio.

Adicionalmente, en este trabajo de título, se considerará la herramienta propuesta por Díaz en 2016, denominada "*Ficha de evaluación y cuantificación de la vulnerabilidad constructiva sísmica en los bienes culturales inmuebles*", la cual permite una cuantificación de la vulnerabilidad sísmica basada en parámetros cualitativos del edificio, por lo que representa un método más simple en términos de implementación. Su utilidad viene dada por la posibilidad de evaluar un conjunto de iglesias sometidas a la misma amenaza, demostrando así sus debilidades frente a posibles eventos sísmicos, y ayudar a orientar las decisiones de conservación (Diaz, 2016).

En esta herramienta se plantea que la vulnerabilidad sísmica constructiva de las iglesias corresponde a tres causas principales:

1. La posición del edificio, desde el terreno de desplante a su posición geotopográfica.
2. Causas inherentes a la estructura del inmueble, por su conformación o su construcción.
3. Las alteraciones por causas antrópicas, tanto en el entorno como en el mismo inmueble.

Debido a las características de observación y discriminación de esta herramienta, se considera como un nivel previo a los presentados en la *Linee Guida* denominándose LV0.

4.3. METODOLOGIA DE LOS NIVELES DE EVALUACIÓN A UTILIZAR

De acuerdo con los alcances de este trabajo de título, en el desarrollo del presente estudio, se aplicarán tres niveles de evaluación de la vulnerabilidad sísmica a cinco iglesias patrimoniales de Valparaíso. Estos niveles son:

- LV0: Evaluación general de la vulnerabilidad sísmica constructiva de la edificación.
- LV1: Análisis de la vulnerabilidad global de la estructura mediante el estudio de todos los posibles macroelementos de la iglesia.
- LV2: Grado de vulnerabilidad particular de los macroelementos más importantes de la iglesia.

A continuación, se presenta la metodología de cada uno de los niveles a utilizar.

4.3.1. LV0

El nivel denominado LV0, corresponde a la ficha de evaluación y cuantificación de la vulnerabilidad constructiva sísmica en los bienes culturales inmueble, presentada por Diaz (2016), el cual permite la estimación de un indicador de vulnerabilidad basado en parámetros cualitativos, además de identificar las debilidades intrínsecas de un bien ante amenaza sísmica. Se considera un nivel previo al método de la *Linee Guida*, ya que es un análisis simplificado, basado en la observación general de inmueble estudiado.

Esta ficha de evaluación surge como una actividad post desastre y en un contexto de emergencia que ameritaba estudios rápidos. Su mayor característica es que permite comparar y priorizar un conjunto de edificios sometidos a una misma amenaza.

Este procedimiento, está basado en la metodología propuesta por la GNDT, pero actualizada a la realidad latinoamericana. De hecho, una de las consideraciones más importantes, es que incluye al adobe como parte de la evaluación, técnica constructiva que no es considerada en la metodología italiana, por no existir en aquel territorio.

Como se señaló anteriormente, la vulnerabilidad constructiva sísmica corresponderá a las causas de deterioro intrínsecas de los bienes inmuebles, que están ligadas al origen y a la naturaleza del edificio, y que responden a tres causas principales:

1. La posición del edificio, desde el terreno de desplante a su posición geo topográfica.
2. Causas inherentes a la estructura, por su conformación o su construcción.
3. Las alteraciones por causas antrópicas, tanto en el entorno como en el mismo inmueble.

Dadas estas categorías, los parámetros a estudiar en este nivel son:

1. Posición del edificio y cimentaciones.
2. Configuración planimétrica.
3. Configuración en elevación.
4. Configuración en elevación distancia entre muros.
5. Elementos no estructurales.
6. Tipo y organización del sistema resistente.
7. Calidad del sistema resistente.
8. Estructuras horizontales.
9. Cubierta.
10. Estado de conservación.
11. Alteraciones en el entorno.
12. Alteraciones negativas en el sistema constructivo.
13. Vulnerabilidad al fuego.

Según las condiciones observadas de cada edificio, cada parámetro se clasifica en cuatro posibles clases: A, B, C y D, donde A es un parámetro que implica una vulnerabilidad muy baja, y D uno que implica una vulnerabilidad muy alta. En el Anexo A de esta memoria se presenta en resumen la ficha de evaluación “LV0” que categoriza cada parámetro. Así, de acuerdo con la clasificación de cada parámetro, se obtiene un índice de vulnerabilidad de la estructura, mediante un promedio ponderado por el peso de cada uno de estos, lo cuales se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Valorización de clase y peso de cada parámetro LV0. Fuente: (Diaz, 2016)

Propuesta de valores por parámetro para el cálculo del índice de vulnerabilidad						
Parámetros		Clase				Peso
		A	B	C	D	
1	Posición del edificio y cimentaciones	0	1,35	6,73	12,12	0,75
2	Configuración planimétrica	0	1,35	6,73	12,12	0,5
3	Configuración en elevación	0	1,35	6,73	12,12	1
4	Distancia entre muros	0	1,35	6,73	12,12	0,25
5	Elementos no estructurales	0	0	6,73	12,12	0,25
6	Tipo y organización del sistema resistente	0	1,35	6,73	12,12	1,5
7	Calidad del sistema resistente	0	1,35	6,73	12,12	0,25
8	Estructuras horizontales	0	1,35	6,73	12,12	1
9	Cubierta	0	1,35	6,73	12,12	1
10	Estado de Conservación	0	1,35	6,73	12,12	1
11	Alteraciones en el entorno	0	1,35	6,73	12,12	0,25
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	0	1,35	6,73	12,12	0,25
13	Vulnerabilidad al fuego	0	1,35	6,73	12,12	0,25

De esta forma, los rangos que deberán ser validados con base en la aplicación de esta tabla en casos específicos, serían los siguientes:

- Vulnerabilidad baja: $0 < IV \leq 10.81$
- Vulnerabilidad media: $10.81 < IV \leq 55.52$
- Vulnerabilidad alta: $55.52 < IV \leq 100$

Esta herramienta de evaluación tiene la ventaja de ser de rápida implementación y no requiere de un análisis estructural mayor. Su utilidad está dada en una escala territorial ya que permite discriminar las edificaciones que requieren mayor atención por presentar un índice de vulnerabilidad más alto. En el trabajo de Díaz (2016) fue implementada en la zona norte de Chile en iglesias patrimoniales, en donde se identificaron cuáles de las características estudiadas generaban mayor vulnerabilidad, y se pudieron dar recomendaciones de intervenciones generales, para reducir la condición de vulnerabilidad existente.

La principal desventaja de esta herramienta es su carácter general, ya que si bien considera los factores que afectan a la vulnerabilidad sísmica de la estructura, no realiza cálculos analíticos que muestre el comportamiento real del edificio ante la acción sísmica, sino más bien una estimación global. En este sentido, el nivel LV1 de la *Linee Guida* también entrega un índice de vulnerabilidad, pero más enfocado en el comportamiento estructural del edificio.

4.3.2. LV1

Este nivel de evaluación de la vulnerabilidad sísmica pertenece a los lineamientos italianos para el estudio de iglesias patrimoniales de aquel país.

El estudio sistemático de daños en distintas construcciones después de una serie de eventos sísmicos evidenció que el comportamiento de las estructuras puede ser interpretado a través del comportamiento de partes arquitectónicas del conjunto denominadas macroelementos. Estos macroelementos corresponden a sub-partes de la estructura, los cuales se pueden modelar como cuerpos rígidos que interactúan entre sí, por lo que se pueden estudiar de manera independiente.

En particular para la tipología “iglesias”, se identificó a través de los daños observados luego de la acción de determinados sismos, que el comportamiento de este tipo de estructuras puede ser evaluadas mediante 28 mecanismos de colapsos, asociados a cierta cantidad de posibles macroelementos característicos, tales como fachadas, naves, transeptos, arcos, bóvedas, torre campanarios, etc. Estos mecanismos de colapso son:

1. Volteo de la fachada
2. Derrumbe de la parte superior de la fachada o frontón
3. Mecanismos en el plano de la fachada
4. Pórtico - Narthex
5. Respuesta transversal de la nave
6. Mecanismos de corte en muros laterales
7. Respuesta longitudinal del "colonnato".
8. Bóveda del pasillo central
9. Bóvedas de los pasillos laterales
10. Volteo de los muros traseros del transepto
11. Mecanismo de corte en la pared del transepto
12. Bóveda del transepto
13. Daño en arco triunfal

14. Cúpula y tambor
15. Linterna
16. Abertura del ábside
17. Mecanismo de corte en el muro del ábside
18. Bóveda del ábside
19. Mecanismos de los elementos de techo de la nave
20. Mecanismos de los elementos de techo - transeptos
21. Mecanismos de los elementos de techo - ábside y presbiterio
22. Abertura de la capilla
23. Mecanismos de corte en las paredes de la capilla
24. Volteo de la capilla
25. Interacciones en elementos de distinto comportamiento
26. Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)
27. Torre campanario
28. Celda campanario

Al estudiar cada uno de estos posibles mecanismos de colapso, identificando sistemas vulnerables y resistentes, es posible obtener un índice de vulnerabilidad de la estructura dado por la siguiente ecuación:

$$I_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2} \quad (4.1)$$

Este índice que varía entre 0 y 1, representa el promedio ponderado del comportamiento de cada mecanismo de colapso. Por lo tanto, este índice entrega un valor numérico de las características estructurales de la iglesia y acción conjunta de los macroelementos.

En la ecuación (4.1), para el mecanismo k-ésimo: v_{ki} y v_{kp} son, respectivamente, el puntaje obtenido por el levantamiento de los indicadores de vulnerabilidad y por los elementos sismorresistente (Tabla 4-2).

Tabla 4-2 Valor de los indicadores de vulnerabilidad. Fuente: (MiBACT, 2011).

Número de indicadores de vulnerabilidad o elementos sismorresistente	Valor de la efectividad	v_k
Al menos 1	3	3
Al menos 2	2	
1	2	2
Al menos 2	1	
1	1	1
0	0	0

Así mismo, ρ_k es el peso de cada macroelemento, el cual tiene un valor de 1, excepto los macroelementos 4 y 15 donde $\rho_k = 0.5$ y los macroelementos: 10, 11, 12, 18, 20, 22, 23, 24, 25, y 26 donde $0.5 < \rho_k < 1$ y el valor se escoge a criterio según la importancia del macroelemento en cada iglesia en particular.

Si un macroelemento no está presente en la iglesia o no se activará bajo la acción sísmica, el valor de ρ_k igual a 0.

Se puede mencionar que la asignación de puntaje a los mecanismos de colapso de la Tabla 4-2, tiene una parte netamente enfocada en la observación, donde se deben incorporar la existencia de elementos vulnerables o resistentes en cada macroelemento, sin embargo, existe un enfoque más subjetivo, que requiere de un juicio experto para evaluar la efectividad de los sistemas resistentes o la gravedad de los indicadores de vulnerabilidad. Esta asignación afectará directamente en el puntaje de cada macroelemento que conlleva a variaciones en valor final del índice de vulnerabilidad.

Un listado con los 28 macroelementos y sus respectivos indicadores de vulnerabilidad o resistencia sísmica es dado en el Anexo A de este informe, estos indicadores de vulnerabilidad pueden modificarse (agregar o quitar) dependiendo de las condiciones particulares de cada iglesia.

Una vez obtenido el índice de vulnerabilidad, este por si sólo indica una característica estructural propia del edificio y referida a la posible acción de un sismo. Esto es útil como una herramienta para catalogar un grupo de iglesias y poder mencionar cual es más o menos resistente ante una posible acción sísmica. Sin embargo, para tener una cuantificación concreta de la vulnerabilidad es necesario compararla efectivamente con la amenaza sísmica esperada.

La *Linee Guida*, presenta una correlación entre el índice de vulnerabilidad y la aceleración de suelo que provocaría la “activación” de los mecanismos de colapso, resultando en daño para la estructura, en otras palabras, sería la aceleración del suelo que es capaz de resistir la estructura antes de sufrir daños.

Esta correlación es el resultado del estudio de las intensidades sísmicas registradas en terremotos pasados en Italia, a la cual se le relaciona una cierta aceleración de piso en el sitio, en conjunto con los daños que estas provocaron en las estructuras.

Así las aceleraciones para el estado límite de daño (SLD por sus siglas en inglés) y el estado límite de colapso (SLV por sus siglas en inglés) con respecto al índice de vulnerabilidad están dadas por las ecuaciones (4.2) y (4.3) respectivamente.

$$S \cdot a_{SLD} = 0.025 \cdot 1.8^{2.75-3.44 \cdot I_v} \quad (4.2)$$

$$S \cdot a_{SLV} = 0.025 \cdot 1.8^{5.1-3.44 \cdot I_v} \quad (4.3)$$

El estado límite de daño (SLD) se refiere a un estado en que se activan los mecanismos de colapso, traduciéndose en daños para estructura, pero sin la pérdida de la integridad de esta. Por su parte, el estado límite de colapso (SLV) hace referencia al colapso parcial o total de la estructura, en que ésta deja de ser íntegra y representa un peligro latente de para sus ocupantes.

La verificación de la seguridad sísmica en este nivel permite evaluar la acción sísmica a través de dos métodos simplificados.

El primero de estos es el **índice de seguridad** (I_s) que está dado por la relación entre el periodo de retorno de la acción sísmica que lleva al estado limite y el periodo de retorno de referencia de la estructura.

$$I_{s,SLV} = \frac{T_{SLV}}{T_{R,SLV}} \quad (4.4)$$

Este índice de seguridad es útil para la planificación de intervenciones de mantenimiento en la estructura, ya que entrega la seguridad con respecto a un periodo de referencia.

Otra manera de evaluar la seguridad sísmica está dada por el **factor de aceleración** (F_a). El que relaciona la aceleración del suelo que provocaría el colapso de la estructura y la aceleración esperada en el sitio. En el periodo de referencia dado.

$$F_{a,SLV} = \frac{a_{SLV}}{a_{g,SLV}} \quad (4.5)$$

Este factor permite evaluar la seguridad sísmica de la iglesia desde el punto de vista de la resistencia.

Se define el periodo de referencia (V_R) como:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (4.6)$$

Donde, V_N es la vida nominal de la estructura y representa el periodo en que se proyecta que la estructura mantenga cierta integridad o bien sea objeto de alguna intervención de mantenimiento. La *Linee Guida* menciona que la vida nominal de los bienes culturales debe ser la mayor posible, para garantizar su integridad en el tiempo, sin embargo, esto se traduce en intervenciones de consolidación estructural que pueden ser muy invasivas o imposibles de ejecutar, por lo que deja a criterio del proyectista la elección de la vida nominal del edificio patrimonial estudiado, tomándose como referencia habitual para este tipo de construcciones $V_N = 50$ años.

C_U es el coeficiente de uso dado la por la NTC 2008 que depende de la categoría de utilización de la estructura. A grandes rasgos, estas clases de usos son:

- Clase I: Uso Ocasional o no utilizado
- Clase II: Uso frecuente con poca aglomeración de personas.
- Clase III: Uso Muy frecuente y/o con aglomeraciones importantes
- Clase IV: Edificio estratégico, de uso muy frecuente, y/o con mucha aglomeración de personas.

El valor del coeficiente de uso (C_U) para cada clase de uso se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-3 Valor del coeficiente de uso C_U

Clase de Uso	I	II	III	IV
Coeficiente C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

El periodo de retorno de referencia (T_R) asociado a un estado límite con una cierta probabilidad de excedencia (P_{V_R}) se expresa como:

$$T_R = \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})} \quad (4.7)$$

La probabilidad de excedencia para cada estado límite está dada en la siguiente tabla.

Tabla 4-4 Probabilidad de excedencia para cada estado límite

Estado Límite	P_{V_R} : Probabilidad de excedencia en el periodo de referencia V_R	
Estado límite de ejercicio	SLO	81%
	SLD	63%
Estado límite último	SLV	10%
	SLC	5%

Para evaluar la seguridad sísmica es necesario conocer el riesgo sísmico en el sitio, el cual es expresa en aceleración máxima esperada (a_g).

Las disposiciones de la NTC 2008, indican que el espectro de aceleraciones para cada periodo de referencia está definido por los siguientes tres parámetros:

a_g : Aceleración horizontal máxima del sitio

F_o : Valor del factor de amplificación del espectro de aceleración horizontal

T_c^* : Periodo de inicio de la velocidad constante.

En Italia se dispone con una microzonificación sísmica, que consiste en una malla con puntos separados en aproximadamente 5km en todo su territorio, en donde se entregan los tres parámetros que definen el espectro de aceleración horizontal de un suelo tipo A (según clasificación italiana) de cada sitio para 9 periodos de retorno (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 y 2475 años).

Conocidas las coordenadas geográficas del edificio en estudio, mediante interpolación se tendrá la aceleración máxima esperada para los estados límites de interés (SLD y SLV) y así evaluar el factor de aceleración (F_a , ecuación (4.5)).

$$a_1 = a_g \text{ (espectro en SLD)}$$

$$a_2 = a_g \text{ (espectro en SLV)}$$

A partir de estas aceleraciones y sus respectivos periodos de retorno, se puede calcular el periodo de retorno de la aceleración de colapso propia de la estructura para cada estado límite (SLD y SLV) mediante las siguientes ecuaciones y así obtener el índice de seguridad (I_s , ecuación (4.4)).

$$T_{R,SLV} = T_{R1} \cdot 10^{\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right) \frac{\log\left(\frac{a_{SLV} \cdot S}{F_c \cdot a_1 \cdot S_1}\right)}{\log\left(\frac{a_2 \cdot S_2}{a_1 \cdot S_1}\right)}} \quad (4.8)$$

$$T_{R,SLD} = T_{R1} \cdot 10^{\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right) \frac{\log\left(\frac{a_{SLD} \cdot S}{F_c \cdot a_1 \cdot S_1}\right)}{\log\left(\frac{a_2 \cdot S_2}{a_1 \cdot S_1}\right)}} \quad (4.9)$$

Con lo anterior es posible evaluar la seguridad sísmica de la estructura estudiada en términos del índice de seguridad y factor de aceleración, de manera que ambos indicadores deberían ser mayores a 1 para considerar que el edificio se encuentra seguro desde el punto de vista de la amenaza sísmica esperada.

4.3.2.1. Consideraciones para utilizar el método en la evaluación de iglesias patrimoniales en Valparaíso.

El coeficiente (S) toma en cuenta el tipo de suelo y las condiciones topográficas, de manera que:

$$S = S_s \cdot S_T \quad (4.10)$$

La *NTC 2018*, define cuatro categorías topográficas según las características del terreno en cual está ubicado el edificio, y le asigna un valor denominado coeficiente de amplificación topográfica (S_T) (Tabla 4-5). Estos coeficientes representan la amplificación sísmica, en parámetros de aceleración, según las características del terreno de fundación del edificio.

Capítulo 4: Métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

Tabla 4-5. Cat. Topográficas y coeficientes de amplificación topográfica. Fuente (MIT, 2008)

Categ.	Característica de la superficie topográfica	S_T
T1	Superficie plana, pendientes y relieves con una inclinación media de $\leq 15^\circ$	1.0
T2	Pendiente con inclinación media $> 15^\circ$	1.2
T3	Los relieves con una anchura de cresta mucho menor que en la base y una inclinación promedio de $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2
T4	Relieves con una anchura de cresta mucho menor que en la base y una inclinación promedio de $> 30^\circ$	1.4

Adicionalmente, La *NTC 2018*, considera el efecto del suelo y hace una clasificación según estudios de la velocidad de propagación de la onda de corte V_{s30} , así en la Tabla 4-6, se entregan los valores de los coeficientes de amplificación según el tipo de suelo.

Tabla 4-6 Valor del coeficiente de amplificación según tipo de suelo (MIT, 2008)

Categoría del Suelo	S_s
A	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.20$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.80$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.60$

Ahora bien, en Chile, según el DS61, se realiza una clasificación sísmica similar del tipo de suelo, en la que se mide la velocidad de propagación de la onda de corte V_{s30} . En la Figura 4-1 se muestra cómo se clasifican los tipos de suelo en Italia según la *NTC 2008* y en Chile según el decreto Supremo 61 de 2011 y la *NCh433 of96 mod.2009*.

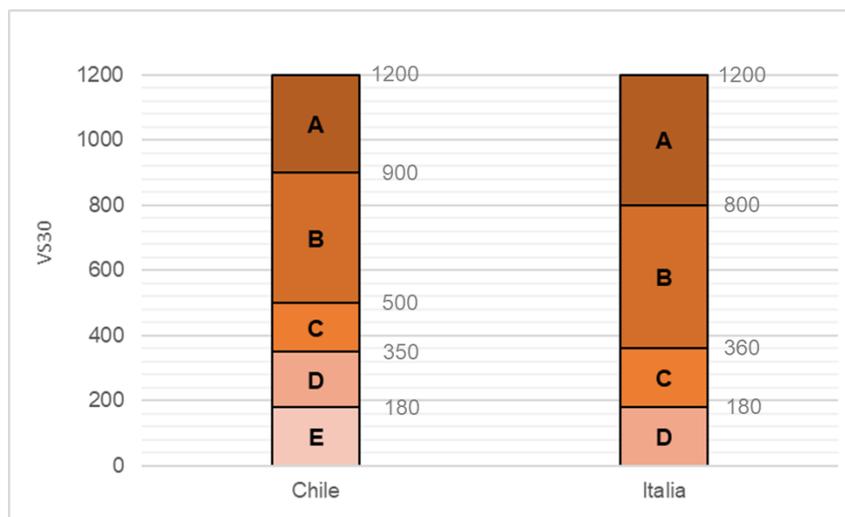


Figura 4-1. Comparación de la clasificación de suelos chilena e italiana

De esta manera, se puede hacer una relación entre la clasificación chilena e italiana. Pudiendo utilizar los coeficientes dados en la NTC 2008 conociendo la clasificación de suelo dada por la norma chilena.

Tabla 4-7 Correlación de la clasificación de suelos chilena e italiana

	DS61	NTC2008
Categoría de suelo	A	A
	B	B y A
	C	C y B
	D	C
	E	D

Se vio que la normativa italiana cuenta con una microzonificación sísmica, de donde se obtiene la aceleración horizontal máxima de suelo para distintos periodos de retorno. La norma chilena de manera similar, con un enfoque probabilístico, presenta 3 zonas que dividen el territorio en tres franjas a lo largo, con una aceleración esperada en cada sitio. Sin embargo, no cuenta con valores para distintos periodos con cierta probabilidad de excedencia, como en la normativa italiana. Esto dificulta la aplicación el método italiano a Chile ya que no sería posible obtener el índice de seguridad sísmica.

Por otra parte, si se considera la aceleración horizontal esperada, no existe normativamente una zonificación mayor que considere efectos de sitios particulares, por lo que, si se aplica esta zonificación, todos los casos de estudio están sometidos a la misma aceleración. La ciudad de Valparaíso corresponde a Zona sísmica 3, lo que implica una aceleración de $\alpha_o = 0.4 [g]$

Existen trabajos de investigación que realizan microzonificaciones del territorio nacional, pero aún no se logra que la información recopilada sea utilizada de manera consensuada a nivel nacional.

4.3.2.2.Comentarios de la metodología del nivel LV1

Al incorporar la amenaza sísmica (en términos de aceleración esperada de suelo) al estudio de edificios patrimoniales, se incrementa el alcance del estudio territorial de la vulnerabilidad sísmica, ya que es posible realizar comprobaciones de construcciones ubicadas en distintos lugares geográficos aun presentando un mismo índice de vulnerabilidad.

En conclusión, el índice de seguridad entrega un valor concreto de la exposición del edificio a la amenaza esperada. Sin embargo, este valor tiene las limitaciones claras de ser un indicador general, donde la aceleración de colapso del edificio es un resultado del índice de vulnerabilidad, el cual representa una media pesada del macroelemento de la iglesia, que representan un valor promedio y global de la iglesia, por lo tanto, habrá ciertos macroelementos que están afectado por aceleraciones distintas a este promedio. Sólo

entrega información a nivel territorial, y no representa una herramienta concreta para diseñar intervenciones en la estructura.

El problema de estudiar el comportamiento de algún macroelemento particular presente en la estructura es abordado en el segundo nivel (LV2) de evaluación de la *Linee Guida*.

4.3.3. LV2

El segundo nivel de evaluación (LV2) presentado en la *Linee Guida*, se refiere al estudio de las partes individuales de la estructura. Se deben identificar los macroelementos más importantes del edificio, y se estudian cada uno por separado. Este nivel se aplica generalmente en la planificación de intervenciones estructurales de una o varias partes del edificio patrimonial, pero sin que se intervenga en la estructura principal.

La *Linee Guida* permite distintos enfoques en la evaluación de los macroelementos en los cuales destacan: estáticos lineal, estático no lineal, modal, y modal no lineal.

En general para aplicar estos métodos, se requiere un modelo estructural del macroelemento en distintas complejidades. Según los objetivos de este trabajo de título, en donde se busca contar con un método unificado y de simple aplicación, se utiliza una metodología enfocada en edificios de mampostería, que tiene un enfoque cinemático, y se basa en el principio de trabajos virtuales (MIT, 2008).

En esta metodología se aíslan los macroelementos como cuerpos rígidos y se estudian individualmente con todas las fuerzas involucradas en la acción sísmica. Las fuerzas verticales y horizontales inerciales se relacionan mediante un coeficiente cinemático (λ_o) el cual se obtiene del equilibrio en el estado límite (ecuación (4.11)).

$$\lambda_o \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} + \sum_{i=1}^m F_{x,i} \cdot \delta_{x,i} + \sum_{i=1}^p F_{y,i} \cdot \delta_{y,i} = 0 \quad (4.11)$$

Donde,

- P_i : Fuerzas verticales sujetas a inercia.
- $\delta_{x,i}$: Desplazamiento virtual de la fuerza i en la dirección x
- $\delta_{y,i}$: Desplazamiento virtual de la fuerza i en la dirección y
- $F_{x,i}$: Fuerza horizontal no inercial
- $F_{y,i}$: Fuerza vertical no inercial

Luego de obtener el coeficiente cinemático que relaciona de manera proporcional las fuerzas verticales y horizontales, se calcula la aceleración del estado límite (α_0^*), que, en otras palabras, es la aceleración que activa el colapso en el macroelemento.

$$\alpha_0^* = \frac{\lambda_o \sum_{i=1}^n P_i}{M \cdot F_C} \quad (4.12)$$

Donde, (F_C) es un factor de confianza que depende de la información que se tenga del edificio, y M^* es la masa participante de macroelemento.

El factor de confianza (FC) se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{ck} \quad (4.13)$$

Donde los factores de confianza parciales F_{ck} se estiman según la siguiente tabla:

Tabla 4-8 Definición de los factores de confianza parciales asociados al nivel de información disponible de la estructura. (elaboración propia, fuente: Linee Guida)

Levantamiento geométrico	Identificación de los aspectos históricos y constructivos del edificio	Propiedades mecánicas de los materiales	Terreno y fundaciones
Levantamiento geométrico completo. $F_{c1} = 0.05$	Restitución hipotética de las fases constructivas basado en un levantamiento limitado de los materiales y elementos de construcción asociados con comprensión de los eventos de transformación (investigaciones documentadas). $F_{c2} = 0.12$	Parámetros mecánicos tomados de datos anteriores. $F_{c3} = 0.12$	Investigaciones limitadas sobre el terreno y fundaciones, en ausencia de datos geotécnicos y disponibilidad de información sobre fundaciones. $F_{c4} = 0.06$
Levantamiento geométrico completo, con restitución gráfica del cuadro fisurativo y de deformaciones. $F_{c1} = 0$	Restitución parcial de las fases constructivas e interpretación del comportamiento estructural basado en un levantamiento limitado del material y elementos constructivos asociado con la comprensión y verificación de eventos de transformación. $F_{c2} = 0.06$	Investigaciones limitadas sobre los parámetros mecánicos de los materiales. $F_{c3} = 0.06$	Disponibilidad de datos geotécnicos y de las fundacionales; investigaciones limitadas sobre el terreno y fundaciones. $F_{c4} = 0.03$
	Restitución completa de las fases constructivas e interpretación del comportamiento estructural basado en un levantamiento exhaustivo de material y de sistemas constructivos asociado con la comprensión de los eventos de transformación. $F_{c2} = 0$	Investigaciones detalladas sobre los parámetros mecánicos de los materiales. $F_{c3} = 0$	Investigaciones exhaustivas sobre el terreno y fundaciones. $F_{c4} = 0$

Por su parte la masa participante del macroelemento se estima con la siguiente ecuación.

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i})^2}{g \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i}^2} \quad (4.14)$$

Siendo g la aceleración de gravedad.

Para determinar la vulnerabilidad del macroelemento estudiado, se debe establecer la amenaza sísmica en términos de aceleración horizontal máxima esperada, mediante el método probabilístico para un determinado periodo de retorno (a_g). La manera de establecer la aceleración esperada es la misma que la utilizada en el nivel anterior.

Para el caso de macroelementos que se encuentran a nivel del suelo, la estabilidad de éste, se verifica si la aceleración de activación (α_0^*) es mayor o igual a la aceleración horizontal esperada en el sitio (a_g) amplificada por un factor S , que depende del tipo de suelo de fundación del edificio.

$$F_a = \frac{\alpha_0^*}{a_g \cdot S} \quad (4.15)$$

De la ecuación anterior se observa que el mecanismo de colapso estudiado no presenta vulnerabilidad ante la amenaza sísmica esperada cuando $F_a \geq 1$.

Luego de evaluar la vulnerabilidad sísmica de las cinco iglesias de Valparaíso a escala territorial con los niveles LV0 y LV1, se estudiarán los mecanismos de colapso más importantes de una de las cinco iglesias, determinando su posible activación ante la amenaza sísmica.

4.4. DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA ESPERADA PARA VALPRAÍSO

Para la utilización del método italiano de la *Linee Guida*, se requiere contar con una aceleración del suelo en el que se encuentra emplazada la estructura estudiada. Para esto, a continuación, se muestran algunos estudios de zonificación sísmica con respecto a la aceleración esperada en la zona de Valparaíso, con distintas metodologías y resultados.

4.4.1. Métodos de determinación del peligro sísmico

La estimación del peligro sísmico está dividido en 2 corrientes de estudio, diferenciadas por la metodología que utilizan para caracterizar la acción sísmica en el sitio requerido.

4.4.1.1. Método Determinístico

El método determinístico consiste en el desarrollo de una situación particular, en cual se obtiene algún parámetro sísmico (por ejemplo, la aceleración máxima del suelo) a partir de un sismo de control, de una fuente y distancia determinada al sitio en estudio.

A grandes rasgos, esta metodología identifica y caracteriza las fuentes capaces de afectar el sitio en estudio, identifica la distancia de esa fuente con el sitio, evalúa los efectos provocados y discrimina cual es el denominado sismo de control con el cual se construye un escenario en sitio estudiado para dicho evento.

4.4.1.2. Método Probabilístico

El método probabilístico, define la probabilidad de ocurrencia que un evento sísmico supere un cierto valor de intensidad sísmica en un periodo de tiempo dado.

La metodología, en general consiste en identificar y caracterizar las fuentes sismogénicas para establecer la tasa anual de ocurrencia de sísmica (generalmente mediante las ecuaciones Gutenberg-Richter), para tener la cantidad de sismos por año con magnitudes mayores o iguales una magnitud dada. Mientras, los efectos en el sitio estudiado, están dadas por las leyes de atenuación correspondientes para cada parámetro sísmico (por ejemplo, la aceleración máxima) para una magnitud y una distancia de la fuente determinada.

4.4.2. Ámbito normativo en Chile

Actualmente existen tres normas sísmicas en Chile:

- NCh433 Of96 Mod.2009 - Diseño sísmico de edificio, en conjunto con DS61 de 2011.
- NCh2369 of2003 - Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- NCh2745 of2013 - Análisis y diseño de edificio con aislación sísmica.

Estas 3 normas, siguen la misma filosofía donde la amenaza sísmica en términos de aceleración máxima del suelo esperada se estima de manera probabilística. Presentan tres zonas sísmicas a lo largo del país cada cual con su aceleración efectiva máxima de suelo. En este caso, la ciudad de Valparaíso se encuentra emplazada en la zona sísmica 3, con una aceleración efectiva de suelo máxima de 0.4 [g].

4.4.3. Estudios de zonificación sísmica

A continuación, se presentan los resultados de tres estudios de zonificación sísmica en términos de aceleración del suelo, que coinciden con el territorio de interés de este trabajo de título.

4.4.3.1. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile Central (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)

Este estudio utiliza 3 procedimientos probabilísticos para estudiar la amenaza sísmica en términos de la aceleración máxima de suelo para la zona central de Chile. Las metodologías de cálculo presentadas son las propuestas por: Algermissen y Perkins (1976), Anderson y Trifunac (1978), y Reiter (1990), denominados AP76, AT78 y R90 respectivamente.

Los 3 procedimientos de cálculo consideran la contribución de 3 fuentes sismogénicas, (fuente interplaca, intraplaca de profundidad media y cortical), para determinación del movimiento sísmico en la zona estudiada.

AP76 considera la contribución de todas las fuentes sismogénicas en un periodo de 1 año, de manera en que cada fuente tiene el mismo efecto en el sitio de estudio,

AT78 es similar a la anterior, sin embargo, le da un peso a cada fuente sismogénica, de manera que discrimina cuales fuentes tiene mayor efecto en el sitio estudiado, por lo tanto, AP76 y AT78 son iguales en el caso que el peso de cada fuente sea la misma e igual al promedio.

R90 es la combinación del aporte de todas las fuentes sismogénicas con todas las magnitudes posibles para el sitio en estudio, ponderadas por la probabilidad de la ocurrencia de esa magnitud en la fuente.

En la Figura 4-2 se muestran los resultados presentado por Leyton et al. (2010) de la aceleración máxima esperada en la zona central de Chile, para un periodo de vida útil de 50 años con probabilidad de excedencia 10% (equivalente a un periodo de retorno de 475 años) para las tres metodologías estudiadas.

Así mismo, en la Figura 4-3 se presenta la aceleración máxima esperada en la zona central de Chile, para un periodo de vida útil de 100 años con probabilidad de excedencia 5% (equivalente a un periodo de retorno de 1950 años) para las tres metodologías estudiadas.

Valores de aceleración en [g], se marca la ubicación de la ciudad de Valparaíso.

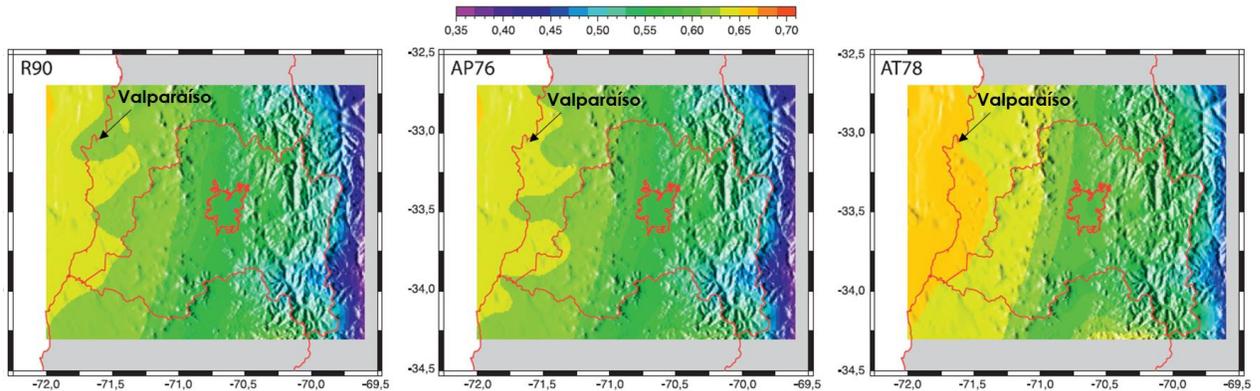


Figura 4-2 Aceleración máxima esperada para un periodo de retorno de 475 años utilizando metodología R90, AP76 y AT78. Fuente: (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)

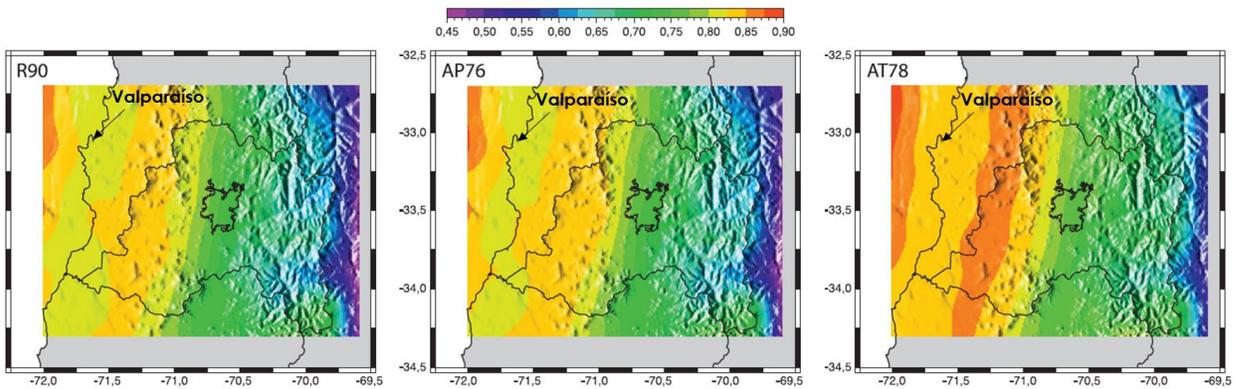


Figura 4-3 Aceleración máxima esperada para un periodo de retorno de 1950 años utilizando metodología R90, AP76 y AT78. Fuente: (Leyton, Ruiz, & Sepúlveda, 2010)

De las figuras anteriores se observa que para toda la ciudad de Valparaíso se tiene una misma aceleración esperada en cada caso, estas aceleraciones en [g], se muestran en a la siguiente tabla resumen.

Tabla 4-9 Aceleración esperada para Valparaíso - según el trabajo de Leyton et al. (2010)

Método	$T_R = 475$ años	$T_R = 1950$ años
R90	0.62	0.81
AP76	0.64	0.81
AT78	0.66	0.83

Es importante mencionar que este estudio no considera el efecto de sitio de topografía y tipo de suelo en la estimación de la aceleración esperada, sin embargo, se menciona que

estos resultados son válidos para suelo con $V_s \geq 360 \left[\frac{m}{s} \right]$, lo que corresponde suelos tipos A, B Y C según la clasificación del D61.

4.4.3.2. Nuevo peligro sísmico para Chile (Núñez, 2014)

Este trabajo presenta un estudio de zonificación sísmica para el país, considerando como parámetro la aceleración máxima del suelo.

Utiliza un enfoque probabilístico para estimar la probabilidad de excedencia de las aceleraciones en roca, caracterizando las leyes de Gutenberg-Richter para cada fuente sismogénica. Entrega dos resultados de zonificaciones ya que calcula los parámetros de las leyes Gutenberg-Richter mediante dos procedimientos estadísticos diferentes: mínimos cuadrado y máxima verosimilitud.

Genera mapas de aceleración máxima esperada para periodos de retorno de 475 y 2475 años, para lo métodos recurrencia sísmica de máxima verosimilitud y mínimos cuadrados, para distintas zonas del país.

En las figuras Figura 4-4 y Figura 4-5, se muestran los mapas de Isoaceleraciones en términos de aceleración máxima del suelo zona central de Chile (que contiene la ciudad de Valparaíso) para un periodo de retorno de 475 años (correspondiente al sismo con probabilidad de excedencia de 10% en 50 años), para los métodos cuadrados y máxima verosimilitud respectivamente.

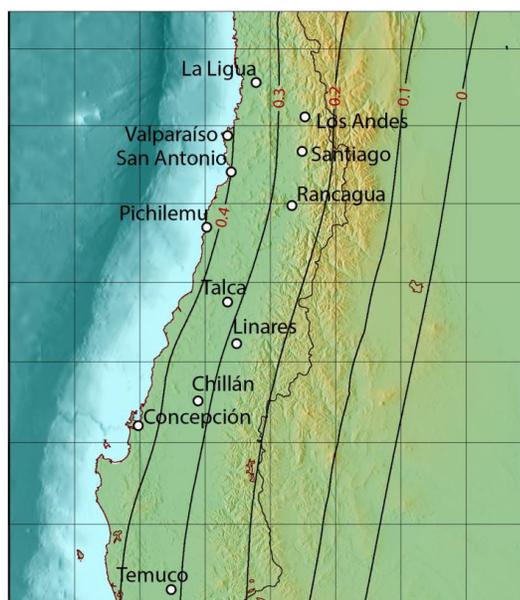


Figura 4-4 Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para $T_R=475$ años; Método de Mínimo cuadrados. Fuente: (Núñez, 2014)

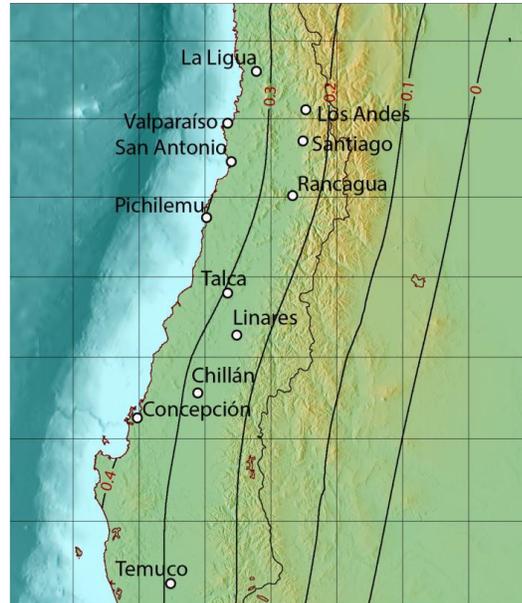


Figura 4-5 Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para $T_R=475$ años; Método de Máxima verosimilitud. Fuente: (Núñez, 2014)

De la misma manera en las figuras Figura 4-6 Figura 4-4 y Figura 4-7, se muestran los mapas de Isoaceleraciones en terminaos de aceleración máxima del suelo zona central de Chile, para un periodo de retorno de 2.475 años (correspondiente al sismo con probabilidad de excedencia de 2% en 50 años), para los métodos cuadrados y máxima verosimilitud respectivamente.

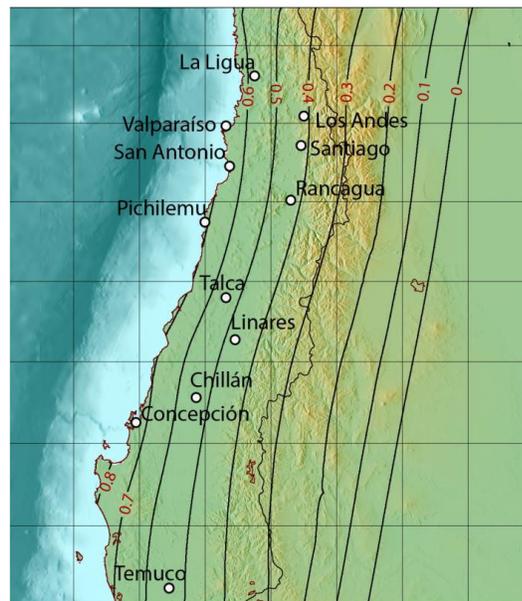


Figura 4-6 Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para $T_R=2475$ años; Método de Mínimos cuadrados. Fuente: (Núñez, 2014)

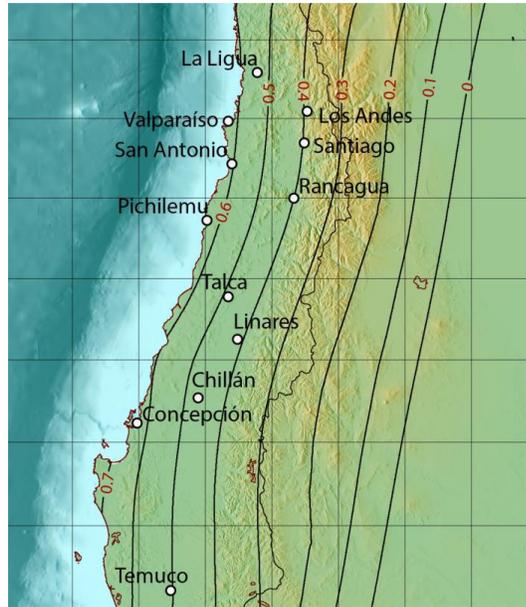


Figura 4-7 Mapa de Isoaceleraciones en términos de PGA; Zona Centro para $T_R=2475$ años; Método de Máxima verosimilitud. Fuente: (Núñez, 2014)

Nuevamente se observa que toda la ciudad de Valparaíso tiene una misma aceleración esperada en cada caso, estas aceleraciones en [g], se muestran en a la siguiente tabla resumen.

Tabla 4-10 Aceleración esperada para Valparaíso - según el trabajo Núñez (2014)

Método	$T_R = 475$ años	$T_R = 2475$ años
Máxima Verosimilitud	0.382	0.627
Mínimos Cuadrados	0.411	0.669

Cabe Mencionar que este estudio menciona que estas aceleraciones son válidas a nivel de roca por lo que no están considerados los efectos de sitios y tipo de suelo.

4.4.3.3. Proyecto MAR VASTO

Una de las aristas del proyecto “MAR VASTO” (Indirli, 2010) consistió en la evaluación del peligro sísmico de la ciudad de Valparaíso, en ese contexto es que se desarrollaron estudios para evaluar la acción sísmica en dicha ciudad.

En el documento “*Earthquake hazard in the city of Valparraíso*” (Romanelli, 2008) se presenta un método determinístico para la evaluación de la amenaza sísmica en la ciudad de Valparaíso, dando como resultado mapas de aceleración en el área urbana de la ciudad para diferentes escenarios.

Se menciona que la metodología usada, realiza una descripción realista del movimiento del suelo debido a un sismo de distancia y magnitud dada, basado en conocimiento del

proceso de generación y propagación de fuentes sismogénicas, por lo tanto, a partir de un catálogo de eventos sísmicos y en conocimiento de los daños provocados, se estiman los parámetros sísmicos en el sitio requerido.

Los resultados de este trabajo entregan parámetros del movimiento del suelo (aceleración, velocidad y desplazamiento) esperados en el lecho de roca, para distintos escenarios (magnitud del sismo), considerando dos tipos de ruptura (unilateral y bilateral N-S). Estos parámetros se entregan como mapas de la zona urbana de Valparaíso para una malla discretizada de aproximadamente 0.02 KM.

Tabla 4-11 Escenarios sísmicos para Valparaíso. Fuente: (Romanelli, 2008)

Magnitud	Escenario	Periodo de Ocurrencia	Categoría
7.5	Evento escenario	Ocasional: 120-140 años	Fuerte
7.8	Terremoto 1985	Esporádico: 200-250 años	Muy Fuerte
8.3	Terremoto 1906	Raro: ≈ 500 años	Desastroso
8.5	Evento escenario	Excepcional: >1000 años	Catastrófico

En la Figura 4-8 se muestra un ejemplo de los mapas obtenidos de este trabajo para uno de los escenarios estudiados.

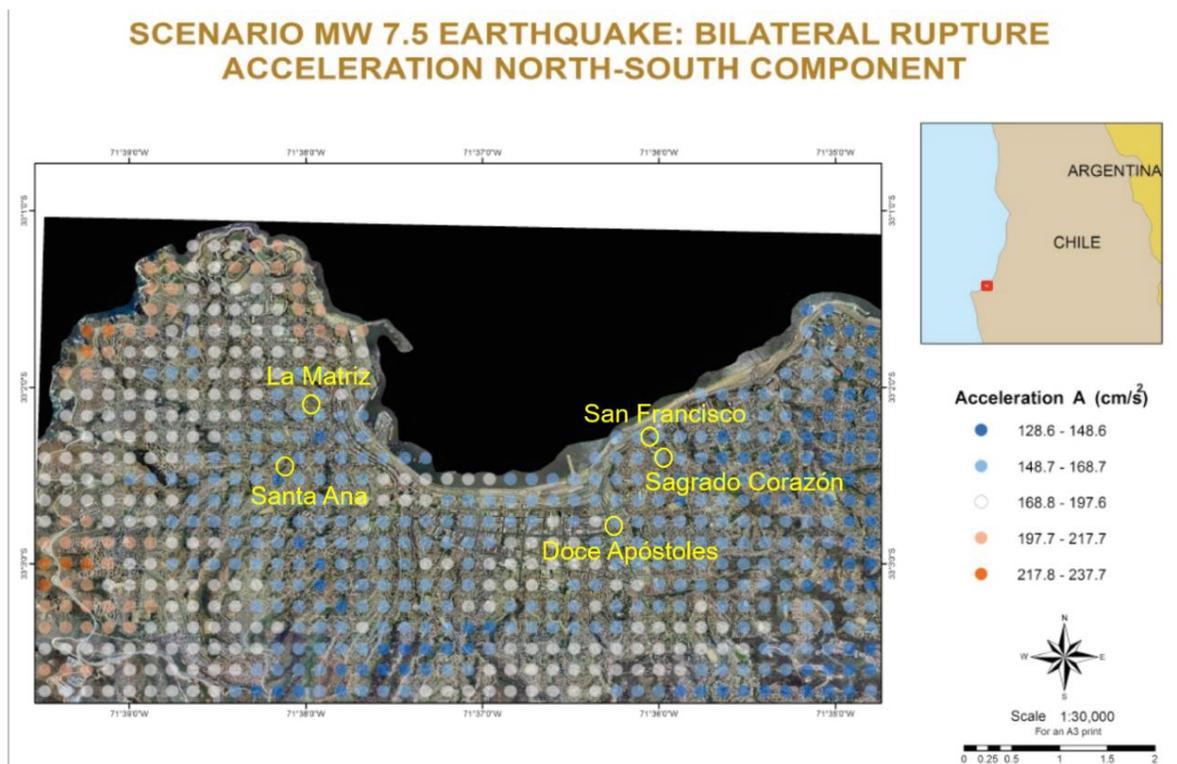


Figura 4-8 Aceleración N-S esperada en el lecho de roca en la zona urbana de Valparaíso, para el escenario de magnitud 7.5 para la ruptura bilateral. Fuente: (Romanelli, 2008)

Como se observa en la figura anterior, a los mapas obtenidos de este trabajo, se superpone la ubicación de las cinco iglesias estudiadas en este trabajo de título,

rescatándose así, una estimación de la aceleración esperada para cada una de estas estructuras en los distintos escenarios presentados. Estas aceleraciones horizontales en sus componentes N-S y E-W en [g] se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4-12 Resumen de la aceleración del suelo máxima para cada una de las iglesias estudiadas en cada uno de los escenarios estudiados en el Proyecto "MAR VASTO".

Escenario	La Matriz		San Francisco		Santa Ana		Doce Apóstoles		Sagrado Corazón		
	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	
M 7.5	Unilat	0.11-0.12	0.15-0.18	0.14-0.15	0.15-0.18	0.11-0.12	0.15-0.18	0.14-0.15	0.15-0.18	0.14-0.15	0.13-.15
	Bilat	0.15-0.17	0.20-0.25	0.15-0.17	0.13-0.16	0.15-0.17	0.16-0.20	0.15-0.17	0.17-0.20	0.15-0.17	0.13-0.16
M 7.8	Unilat	0.31-0.34	0.20-0.26	0.23-0.27	0.13-0.16	0.34-0.37	0.20-0.26	0.26-.031	0.13-0.16	0.23-0.27	0.13-0.16
	Bilat.	0.24-.032	0.18-0.22	0.24-0.32	0.18-0.22	0.19-0.23	0.15-.018	0.24-0.32	0.15-.018	0.24-0.32	0.15-0.18
M 8.3	Unilat	0.49-0.59	0.65-0.81	0.49-0.59	0.54-0.65	0.59-0.75	0.65-0.81	0.49-0.59	0.65-0.81	0.49-0.59	0.54-0.65
	Bilat	0.47-0.56	0.65-0.74	0.65-0.74	0.47-0.56	0.56-0.65	0.56-0.65	0.65-0.74	0.56-0.65	0.56-.065	0.47-0.56
M 8.5	Unilat	0.53-0.61	0.66-0.80	0.45-0.53	0.42-0.54	0.53-0.61	0.66-0.80	0.53-0.61	0.54-0.66	0.45-0.53	0.42.0.54
	Bilat	0.47-0.57	0.68-0.83	0.57-0.69	0.44-0.56	0.57-0.69	0.68-0.83	0.67-0.76	0.56-0.68	0.57-0.69	0.44-0.56

4.4.4. Conclusión de la amenaza sísmica a utilizar

De los estudios de peligro sísmico presentados anteriormente, se desprende que a pesar que den como resultado distintos valores según la metodología e hipótesis que se usen, la amenaza sísmica en términos de aceleración máxima de suelo es la misma en toda la ciudad de Valparaíso, y por lo tanto las 5 iglesias que se estudian en este trabajo de título serán comparadas con un mismo valor, y la única diferencia entre ellas será los efectos de sitio, dados por los factores topográficos y tipos de suelo de fundación.

Mencionado lo anterior, la aceleración dada por la normativa vigente (NCh433.Of96 Modificada en 2009) $A_o = 0.4$ [g] para la ciudad de Valparaíso, es la más idónea, dado su carácter normativo y de aplicación general, el cual es uno de los objetivos de este trabajo.

Ahora bien, el problema de escoger la aceleración dada por la norma chilena, es que sólo se podría calcular la vulnerabilidad sísmica de las iglesias mediante el factor de aceleración (ecuación (4.5)), ya que no se cuenta con datos en distintos periodos de retorno para estimar el factor de seguridad sísmica (ecuación (4.4)). Además, no necesariamente coincidirá con los periodos de retorno asociados a los estados límites que considera la norma italiana.

Los resultados presentados por Núñez (2014), son similares a los que entrega la norma chilena correspondientes a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años (periodo de retorno de 475 años), y teniendo como ventaja que presenta resultados para un segundo periodo de retorno de 2.475 años, entrega la posibilidad de calcular el factor de seguridad de la norma italiana. Por lo tanto, se escogen los resultados de este estudio para realizar la evaluación sísmica de las iglesias patrimoniales de Valparaíso.

CAPÍTULO 5 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

5.1. APLICACIÓN DEL LV0

5.1.1. Aplicación LV0 La Matriz

5.1.1.1. Posición del edificio y cimentaciones

Clase A: Edificio sobre roca con pendiente p inferior o hasta 10%.

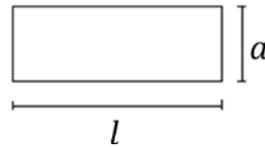
5.1.1.2. Configuración planimétrica

Clase C: $40 \leq \beta_1$; $\beta_2 = 0$

$$a = 20$$

$$l = 50$$

$$\beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 = 40$$



5.1.1.3. Configuración en elevación

Clase D: Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 40% de la altura total del edificio.

5.1.1.4. Distancia entre muros

Clase C: Edificios que presentan solo tres de las siguientes relaciones geométricas:

Espesor de muro (e): 1.5 metros

Altura (H): 9.50 metros

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima:

SI: Esbeltez = $H/e = 9.50 / 1.5 = 6.3 < 8$.

- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro:

SI: El vano más grande es el de acceso, de 3 m < 3.75m (2.5 m × 1.5 m).

- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor a tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo:

NO: Existen vanos a menos de 4,5 m (3 x1.5 m).

- La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro debe ser menor a seis veces el espesor del muro:

NO: La longitud supera los 9m

- La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor que 10% de su altura:

SI: La verticalidad del muro esta OK.

5.1.1.5.Elementos no estructurales

Clase A y B: Edificio sin accesorios, saliente o voladizos

5.1.1.6.Tipo y organización del sistema resistente

Clase A: Edificios existentes consolidados o reparados según los requisitos de la norma sísmica. Se determina en función de la eficacia obtenida con la intervención para garantizar el funcionamiento monolítico del edificio con materiales compatibles con los preexistentes.

5.1.1.7.Calidad del sistema resistente

Clase A: Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm.

5.1.1.8.Estructuras Horizontales

Clase B: Edificios con estructuras horizontales construidas con materiales compatibles en una época posterior al origen del edificio, pero que hayan agregado un peso importante a una mampostería de baja calidad en términos de resistencia y rigidez.

5.1.1.9.Cubierta

Clase A: Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

5.1.1.10.Estado de Conservación

Clase A: Mampostería o Adobe sin daños visibles.

5.1.1.11.Alteraciones en el entorno

Clase A: Edificio que no presenta ninguna de estas condiciones

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (NO).
- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (NO).
- Densidad demográfica: el edificio se encuentra en una zona densamente poblada (NO).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (NO).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (NO).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (NO).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (NO).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (NO)

5.1.1.12.Alteraciones negativas en el sistema constructivo

Clase C: Edificio con modificaciones en el sistema constructivo realizadas con materiales compatibles que hayan modificado la distribución de cargas del edificio.

Existe una modificación de una losa de hormigón y la incorporación de un “muro” (antepecho) que da mucha rigidez y peso al sistema bajo la torre.

5.1.1.13.Vulnerabilidad al fuego

Clase B: Edificios que cuenten con hasta tres de estas condiciones. (Presenta 1)

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables. SI
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas. NO
- Muros, pisos y puertas con Resistencia deficiente al fuego. NO
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas. NO
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras. NO

- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas. NO
- Instalaciones eléctricas defectuosas. NO
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa. NO
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza. NO
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio. NO
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina. NO

5.1.1.14.Resultados LV0 La Matriz

Tabla 5-1: LV0 iglesia La Matriz

La Matriz					
	Parámetros	Clase	Ponderación	Peso	Total
1	Posición del edificio y cimentaciones	A	0	0.75	0.00
2	Configuración planimétrica	C	6.73	0.5	3.37
3	Configuración en elevación	D	12.12	1	12.12
4	Distancia entre muros	C	6.73	0.25	1.68
5	Elementos no estructurales	A	0	0.25	0.00
6	Tipo y organización del sistema resistente	A	0	1.5	0.00
7	Calidad del sistema resistente	A	0	0.25	0.00
8	Estructuras horizontales	A	0	1	0.00
9	Cubierta	D	12.12	1	12.12
10	Estado de conservación	A	0	1	0.00
11	Alteraciones en el entorno	A	0	0.25	0.00
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	C	6.73	0.25	1.68
13	Vulnerabilidad al fuego	B	1.35	0.25	0.34
Total					31.3

5.1.2. Aplicación LV0 San Francisco

5.1.2.1.Posición del edificio y cimentaciones

Clase A: Edificios sobre roca con pendiente p inferior o hasta 10%.

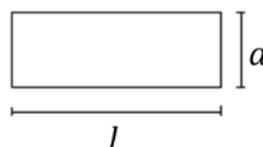
5.1.2.2.Configuración planimétrica

Clase C: $40 \leq \beta_1 \leq 60$; $\beta_2 = 0$

$$a = 14,4$$

$$l = 36$$

$$\beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 = 40$$



5.1.2.3. Configuración en elevación

Clase D: Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 40% de la altura total del edificio.

5.1.2.4. Distancia entre muros

Clase D: Edificios que presentan solo dos (sólo una) de las siguientes relaciones geométricas:

Espesor de muro (e): 1 metros

Altura (H): 10,7 metros

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima:

NO: Esbeltez= $H/e = 10,7 / 1 = 10,7 > 8$.

- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro:

NO: Existen vanos mayores a 2.5 m (2.5 m x 1 m).

- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor a tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo:

NO: Existen vanos a menos de 3 m (3 x 1 m).

- La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro debe ser menor a seis veces el espesor del muro:

NO: La longitud supera los 6m

- La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor que 10% de su altura:

SI: Se cumple.

5.1.2.5. Elementos no estructurales

Clase A y B: Edificio sin accesorios, saliente o voladizos

5.1.2.6. Tipo y organización del sistema resistente

Clase C: Edificios que están constituidos por paredes ortogonales bien trabadas entre sí, pero que no tienen una adecuada conexión entre los muros y los entrepisos.

5.1.2.7. Calidad del sistema resistente

Clase A: Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm.

5.1.2.8. Estructuras Horizontales

No cuenta con estructura horizontal, por lo que se escoge la categoría más desfavorable. Sin embargo, en su estructuración original, presenta estructuras horizontales propias del sistema constructivo ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, dotadas de una deformabilidad significativa en el plano, aunque bien conectadas a los muros.

Se clasifica como: Clase B

5.1.2.9. Cubierta

En estado actual (posterior al incendio) no cuenta con cubierta, por lo tanto se asigna categoría más desfavorable, sin embargo, El no tener cubierta implica que no se generan empujes en los muros, por lo que considerar categoría D podría ser muy restrictivo.

Ahora bien, considerando una situación sin el deterioro producto del incendio de 2013. Se estima que la cubierta no provoca grandes empujes laterales.

Se clasifica como: Clase B

5.1.2.10. Estado de Conservación

Edificios con un grave deterioro de sus materiales. Edificios que aun cuando no tienen daños, presentan un estado de conservación de la mampostería que determina una menor resistencia, como, por ejemplo, morteros disgregados.

Sin embargo, no considerando el estado posterior siniestro de 2013. Se clasifica como clase C

5.1.2.11. Alteraciones en el entorno

Clase A: Edificio que presenta hasta tres de estas condiciones (sólo 1):

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (NO).

- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (SI).
- Densidad demográfica: el edificio se encuentra en una zona densamente poblada (NO).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (NO).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (NO).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (NO).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (NO).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (NO)

5.1.2.12. Alteraciones negativas en el sistema constructivo

Clase A: Edificio con modificaciones en el sistema constructivo con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez, pero no reversibles.

5.1.2.13. Vulnerabilidad al fuego

Clase C: Edificios que cuenten con hasta seis de estas condiciones. (Presenta 4)

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables. NO
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas. SI
- Muros, pisos y puertas con resistencia deficiente al fuego. NO
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas. SI
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras. SI
- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas. SI
- Instalaciones eléctricas defectuosas. NO
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa. NO
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza. SI
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio. NO
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina. NO

5.1.2.14.Resultados LV0 San Francisco

Tabla 5-2: LV0 Iglesia San Francisco

San Francisco					
	Parámetros	Clase	Ponderación	Peso	Total
1	Posición del edificio y cimentaciones	A	0	0.75	0.00
2	Configuración planimétrica	C	6.73	0.5	3.37
3	Configuración en elevación	D	12.12	1	12.12
4	Distancia entre muros	D	12.12	0.25	3.03
5	Elementos no estructurales	A	0	0.25	0.00
6	Tipo y organización del sistema resistente	C	6.73	1.5	10.10
7	Calidad del sistema resistente	A	0	0.25	0.00
8	Estructuras horizontales	B	1.35	1	1.35
9	Cubierta	B	1.35	1	1.35
10	Estado de Conservación	C	6.73	1	6.73
11	Alteraciones en el entorno	A	0	0.25	0.00
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	A	0	0.25	0.00
13	Vulnerabilidad al fuego	C	6.73	0.25	1.68
Total					39.7

5.1.3. Aplicación LV0 Santa Ana

5.1.3.1.Posición del edificio y cimentaciones

Clase B: Edificio sobre roca con pendiente entre $10\% < p \leq 30\%$.

5.1.3.2.Configuración planimétrica

Clase C: $40 \leq \beta_1 \leq 60$; $\beta_2 = 0$

$$a = 13,2; l = 26,5 \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 = 50$$

5.1.3.3.Configuración en elevación

Clase C: Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 10% e inferior o igual a 40% de la altura total del edificio.

5.1.3.4.Distancia entre muros

Clase B: Edificios que no presentan alguna de las siguientes relaciones geométricas:

Espesor de muro (e): 1 metro
 Altura (H): 4.50 metros

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima:

SI: Esbeltez= $H/e = 4.50 / 1 = 4.5 < 8$.

- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro:

SI: El vano más grande es el de acceso, de 2,5 m < 3.75m (2.5 m × 1 m).

- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor a tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo:

SI: No existen vanos a menos de 3 m (3 × 1 m).

- La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro, debe ser menor a seis veces el espesor del muro:

NO: La longitud supera los 6m

- La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor que 10% de su altura:

SI: La verticalidad esta OK.

5.1.3.5.Elementos no estructurales

Clase A y B: Edificio sin accesorios, saliente o voladizos

5.1.3.6.Tipo y organización del sistema resistente

Clase B: Edificios que presentan una buena traba entre los muros ortogonales y una buena conexión entre los muros y los entrepisos, mediante estructuras horizontales continuas ejecutadas con materiales propios de los sistemas constructivos originales, o compatibles en cuanto a resistencia y rigidez.

5.1.3.7.Calidad del sistema resistente

Clase A: Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm.

5.1.3.8. Estructuras Horizontales

Clase C: Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo tradicional o ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, dotadas de una deformabilidad significativa en el plano, aunque bien conectadas a los muros.

5.1.3.9. Cubierta

Clase B: Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal de coronamiento de los muros que no conecta de manera eficiente la cubierta a los muros (por falta de continuidad, por su estado de conservación, porque no cubre toda la sección del muro, por su ejecución con materiales incompatibles, etc.).

5.1.3.10. Estado de Conservación

Clase D: Edificios con un grave deterioro de sus materiales.

Edificios que aun cuando no tienen daños, presentan un estado de conservación de la mampostería que determina una menor resistencia, como, por ejemplo, morteros disgregados.

5.1.3.11. Alteraciones en el entorno

Clase B: Edificio con hasta tres de estas condiciones (cuenta con una)

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (SI).
- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (NO).
- Densidad demográfica: el edificio se encuentra en una zona densamente poblada (NO).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (NO).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (NO).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (NO).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (NO).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (NO)

5.1.3.12. Alteraciones negativas en el sistema constructivo

Clase C: Edificio con modificaciones en el sistema constructivo con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

5.1.3.13. Vulnerabilidad al fuego

Clase C: Edificios que cuenten con más de seis de estas condiciones (presenta 7).

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables. SI
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas. SI
- Muros, pisos y puertas con Resistencia deficiente al fuego. SI
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas. SI
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras. SI
- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas. NO
- Instalaciones eléctricas defectuosas. SI
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa. NO
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza. SI
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio. NO
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina. NO

5.1.3.14. Resultados LV0 Santa Ana

Tabla 5-3: LV0 Iglesia Santa Ana

Santa Ana					
	Parámetros	Clase	Ponderación	Peso	Total
1	Posición del edificio y cimentaciones	B	1.35	0.75	1.01
2	Configuración planimétrica	C	6.73	0.5	3.37
3	Configuración en elevación	C	6.73	1	6.73
4	Distancia entre muros	B	1.35	0.25	0.34
5	Elementos no estructurales	A	0	0.25	0.00
6	Tipo y organización del sistema resistente	B	1.35	1.5	2.03
7	Calidad del sistema resistente	A	0	0.25	0.00
8	Estructuras horizontales	C	6.73	1	6.73
9	Cubierta	B	1.35	1	1.35
10	Estado de Conservación	D	12.12	1	12.12
11	Alteraciones en el entorno	C	6.73	0.25	1.68
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	C	6.73	0.25	1.68
13	Vulnerabilidad al fuego	D	12.12	0.25	3.03
				Total	40.1

5.1.4. Aplicación LV0 Doce Apóstoles

5.1.4.1. Posición del edificio y cimentaciones

Clase A: Edificios sobre terreno suelto no sometido a empujes, con pendiente menor o igual a 10%, y plano de apoyo de cimientos a una altura única.

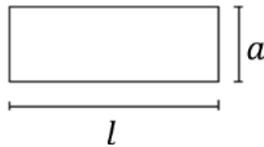
5.1.4.2. Configuración planimétrica

Clase D: $\beta_1 < 40$

$$a = 22,8$$

$$l = 58,8$$

$$\beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 = 38,7$$



5.1.4.3. Configuración en elevación

Clase D: Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 40% de la altura total del edificio.

5.1.4.4. Distancia entre muros

Clase C: Edificios que presentan solo tres de las siguientes relaciones geométricas:

Espesor de muro (e): 1 metros (en promedio)

Altura (H): 16.8 metros

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima:

NO: Esbeltez = $H/e = 16.8 / 1 = 16.8 > 8$.

- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro:

SI: El vano más grande es el de acceso, de 3.72 m < 2.5m (2.5 m × 1 m).
En general los vanos no superan 1 m de ancho.

- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor a tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo:

NO: Existen vanos a menos de 3 m (3 × 1 m).

- La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro, debe ser menor a seis veces el espesor del muro:

SI: En general los ejes de arriostramientos son menores a 6m

- La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor que 10% de su altura:

SI: La verticalidad esta OK.

5.1.4.5.Elementos no estructurales

Clase A y B: Edificio sin accesorios, saliente o voladizos

5.1.4.6.Tipo y organización del sistema resistente

Clase B: Edificios que presentan una buena traba entre los muros ortogonales y una buena conexión entre los muros y los entrepisos, mediante estructuras horizontales continuas ejecutadas con materiales propios de los sistemas constructivos originales, o compatibles en cuanto a resistencia y rigidez.

5.1.4.7.Calidad del sistema resistente

Clase A: Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm.

5.1.4.8.Estructuras Horizontales

Clase C: Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo o ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, dotadas de una deformabilidad significativa en el plano, aunque bien conectadas a los muros.

5.1.4.9.Cubierta

Clase A: Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal continua de coronamiento, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

5.1.4.10.Estado de Conservación

Clase D: Presenta daños evidentes, muros agrietados y fuera de plomo.

5.1.4.11.Alteraciones en el entorno

Clase B: Edificio que cuenta con hasta tres de estas condiciones (presenta dos)

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (NO).
- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (SI).
- Densidad demográfica se encuentra en una zona densamente poblada (SI).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (NO).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (NO).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (NO).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (NO).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (NO)

5.1.4.12.Alteraciones negativas en el sistema constructivo

Clase B: Edificio con modificaciones en el sistema constructivo con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez, pero no reversibles.

5.1.4.13.Vulnerabilidad al fuego

Clase B: Edificios que cuenten con hasta tres de estas condiciones. (Presenta dos)

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables. SI
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas. SI
- Muros, pisos y puertas con resistencia deficiente al fuego. NO
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas. NO
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras. NO
- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas. NO
- Instalaciones eléctricas defectuosas. NO
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa. NO
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza. NO
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio. NO
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina. NO

5.1.4.14.Resultados LV0 Doce Apóstoles

Tabla 5-4: LV0 Iglesia Doce Apóstoles

Doce Apóstoles					
Parámetros		Clase	Ponderación	Peso	Total
1	Posición del edificio y cimentaciones	A	0	0.75	0.00
2	Configuración planimétrica	D	12.12	0.5	6.06
3	Configuración en elevación	D	12.12	1	12.12
4	Distancia entre muros	C	6.73	0.25	1.68
5	Elementos no estructurales	A	0	0.25	0.00
6	Tipo y organización del sistema resistente	B	1.35	1.5	2.03
7	Calidad del sistema resistente	A	0	0.25	0.00
8	Estructuras horizontales	C	6.73	1	6.73
9	Cubierta	A	0	1	0.00
10	Estado de Conservación	D	12.12	1	12.12
11	Alteraciones en el entorno	B	1.35	0.25	0.34
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	B	1.35	0.25	0.34
13	Vulnerabilidad al fuego	B	1.35	0.25	0.34
				Total	41.8

5.1.5. Aplicación LV0 Sagrado Corazón

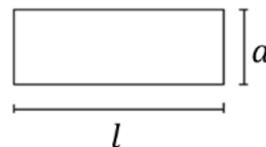
5.1.5.1.Posición del edificio y cimentaciones

Clase C: Edificios sobre roca con pendiente entre $30\% < p \leq 50\%$.

5.1.5.2.Configuración planimétrica

Clase C: $40 \leq \beta_1 \leq 60; \beta_2 = 0$

$$a = 16; \quad l = 35 \quad \rightarrow \quad \beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100 = 45.7$$



5.1.5.3.Configuración en elevación

Clase B: Edificios con arcadas, pórticos y balcones de dimensiones menores, afectando menos de 10% del área total del piso.

Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 10% de la altura total del edificio.

5.1.5.4. Distancia entre muros

Clase C: Edificios que presentan solo tres de las siguientes relaciones geométricas:

Espesor de muro (e): 0.9 metros
Altura (H): 5 metros

- La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima:

SI: Esbeltez= $H/e = 5.00 / 0.9 = 5.5 < 8$.

- Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro:

NO: El vano más grande es el de acceso principal, $3 \text{ m} > 2.25\text{m} (2.5 \text{ m} \times 0.9 \text{ m})$.

- Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor a tres veces el espesor del muro desde el borde libre más próximo:

SI: No existen vanos a menos de 2,7 m ($3 \times 0.9 \text{ m}$).

- La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro, debe ser menor a seis veces el espesor del muro:

NO: La longitud supera los 5.4m

- La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor que 10% de su altura:

SI: no se aprecia pérdida de verticalidad

5.1.5.5. Elementos no estructurales

Clase A y B: Edificio sin accesorios, saliente o voladizos

5.1.5.6. Tipo y organización del sistema resistente

Clase B: Edificios que presentan una buena traba entre los muros ortogonales y una buena conexión entre los muros y los entrepisos, mediante estructuras horizontales continuas ejecutadas con materiales propios de los sistemas constructivos originales, o compatibles en cuanto a resistencia y rigidez.

5.1.5.7. Calidad del sistema resistente

Clase A: Mampostería de ladrillo macizo. Buen aparejo y juntas de mortero horizontales y verticales. Mortero de buena calidad.

5.1.5.8. Estructuras Horizontales

Clase B: Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo tradicional ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, que cumple a) y b) pero no c)

- a) Deformabilidad despreciable en el plano del entrepiso.
- b) Conexiones eficientes entre la estructura horizontal y el muro.
- c) Ausencia de divisiones en el entrepiso.

5.1.5.9. Cubierta

Clase A: Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

5.1.5.10. Estado de Conservación

Clase A: Mampostería o adobe en buen estado, sin lesiones visibles. Edificios con daños moderados (amplitud de la lesión: 2-3 mm) o superficiales originados por sismo.

5.1.5.11. Alteraciones en el entorno

Clase A: Edificio que no presenta ninguna de estas condiciones

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (NO).
- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (NO).
- Densidad demográfica: el edificio se encuentra en una zona densamente poblada (NO).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (NO).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (NO).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (NO).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (NO).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (NO)

5.1.5.12. Alteraciones negativas en el sistema constructivo

Clase A: Edificio sin modificaciones en su sistema constructivo.

5.1.5.13. Vulnerabilidad al fuego

Clase B: Edificios que cuenten con hasta tres de estas condiciones. (Presenta 1)

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables. SI
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas. NO
- Muros, pisos y puertas con Resistencia deficiente al fuego. NO
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas. NO
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras. NO
- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas. NO
- Instalaciones eléctricas defectuosas. NO
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa. NO
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza. NO
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio. NO
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina. NO

5.1.5.14. Resultados LV0 Sagrado Corazón de Jesús

Tabla 5-5. LV0: Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús

Sagrado Corazón de Jesús					
	Parámetros	Clase	Ponderación	Peso	Total
1	Posición del edificio y cimentaciones	C	6.73	0.75	5.05
2	Configuración planimétrica	C	6.73	0.5	3.37
3	Configuración en elevación	B	1.35	1	1.35
4	Distancia entre muros	C	6.73	0.25	1.68
5	Elementos no estructurales	A	0	0.25	0.00
6	Tipo y organización del sistema resistente	B	1.35	1.5	2.03
7	Calidad del sistema resistente	A	0	0.25	0.00
8	Estructuras horizontales	B	1.35	1	1.35
9	Cubierta	A	0	1	0.00
10	Estado de Conservación	A	0	1	0.00
11	Alteraciones en el entorno	A	0	0.25	0.00
12	Alteraciones negativas en el sistema constructivo	A	0	0.25	0.00
13	Vulnerabilidad al fuego	B	1.35	0.25	0.34
				Total	15.2

5.1.6. Discusión de la aplicación del LV0

Luego de aplicar la ficha de evaluación de la vulnerabilidad constructiva sísmica a las cinco iglesias se hace el siguiente análisis con respecto a la metodología y resultado obtenidos.

Los resultados obtenidos con respecto al índice de vulnerabilidad de cada iglesia, concuerdan con la primera impresión que entregan las iglesias al ser observadas:

La iglesia Sagrado Corazón de Jesús, se encuentra totalmente operativa, sin daños visibles. Además, con respecto a su estructura, es una construcción compacta y poco esbelta, lo que hace que tenga una respuesta como conjunto frente a la sollicitación sísmica.

La iglesia La Matriz es otra construcción que está operativa y que en su estado actual no presenta daños, gracias la intervención estructural de la que fue objeto en 2012. La vulnerabilidad sísmica está mayormente dada por sus grandes dimensiones.

La vulnerabilidad de la Iglesia Santa Ana, esta mayormente asociado a su estado actual de abandono, el que provocan un deterioro acumulado, afectando la interacción con el medio, la materialidad y por consecuencia el comportamiento frente a sollicitación de cargas dinámicas.

Doce apóstoles, es una iglesia que actualmente presenta daños estructurales producidos por la acción sísmica. Su estado actual y sus grandes dimensiones afectan fuertemente su vulnerabilidad sísmica.

Caso particular es la iglesia San Francisco. Si bien, su estado actual y grandes dimensiones, prevé una alta vulnerabilidad sísmica, fue difícil aplicar la herramienta, ya que precisamente por su estado actual, se complica discriminar las categorías que se debe asignaren algunos casos.

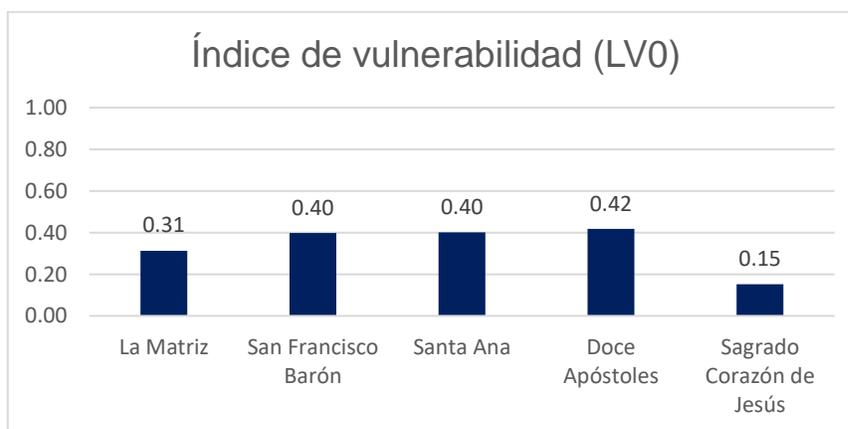


Figura 5-1: Gráfico resumen del índice de vulnerabilidad - LV0

El ordenamiento de los índices de vulnerabilidad concuerda con la impresión a priori de la necesidad de intervención en cada una de las iglesias, jerarquizando aquellas que requieren mayor atención desde el punto de vista estructural.

5.1.6.1. Conclusiones de la Metodología

La categoría 1 estudia la posición del edificio, en lo que refiere al suelo de fundación y la inclinación del terreno. Es sabido que el tipo de suelo es importante en la respuesta de la estructura ante la acción sísmica, así como lo son las condiciones topográficas. Esta metodología hace una clasificación simple del suelo dividiéndolo en roca o suelo blando y mide la posición en distintos rangos de pendientes. Bajo esta categorización, se considera que todas las iglesias están en buen suelo, siendo la que cae en peor categoría la iglesia Sagrado Corazón de Jesús debido a la inclinación del terreno en el que se encuentra. Un caso importante que mencionar en este punto es lo que sucede con la iglesia Doce Apóstoles (Categoría A). Esta iglesia, está ubicada en el sector El Almendral, el cual presenta un tipo de suelo de relleno no controlado, y donde son conocidos los efectos locales de amplificación del movimiento sísmico. La categorización hecha por esta metodología no recoge las características mencionadas, y por lo tanto esta sobre estimando la vulnerabilidad de la estructura.

Las categorías 2 y 3 clasifican la estructura según la geometría tanto en planta como elevación. Las iglesias estudiadas presentan una configuración similar en planta, con formas rectangulares, y su vulnerabilidad según esta herramienta está dada por las relaciones ancho largo, las cuales están relacionadas al comportamiento compacto de la estructura ante la sollicitación sísmica.

En elevación, se enfatiza la existencia de volúmenes con altura considerables. Aquí la vulnerabilidad de las iglesias está dada principalmente por la existencia de torres de gran altura. Las cuales tienen tanto o más altura que la parte maciza de la estructura principal.

En la categoría 4, se analiza la distancia entre los muros. Esto básicamente, trata de evaluar las zonas de debilidad de los muros, ya que analiza si existen porciones pequeñas de muro que puedan tener esfuerzos muy grandes, como el caso de que haya aberturas grandes cerca de intercesiones de muros.

En cuanto a la categoría 5, analiza la presencia de elementos no estructurales salientes. Se consideró que en las cinco iglesias no existían este tipo de elementos o no eran de importancia para estudio de la vulnerabilidad sísmica de cada estructura.

Las categorías siguientes, se refieren al tipo y calidad del sistema constructivo.

La categoría 6 estudia la calidad de la construcción en cuanto a materialidad y técnica constructiva y así su efectividad resistente ante la acción sísmica. Si no se cuenta con suficiente información con respecto a la técnica constructiva y disposición de los materiales, se requiere hacer una estimación subjetiva para valorar el comportamiento del sistema resistente, lo cual va a estar afectado por el criterio de quien esté evaluando.

Otra alternativa sería realizar un estudio acabado del sistema constructivo, lo cual escapa del objetivo del método.

Por su parte la categoría 7 se refiere más bien al material y manera en que está dispuesto. hace una clara clasificación y con respecto a las estructuras estudiadas se considera que todas tienen buena calidad en su sistema constructivo. Un punto importante a mencionar es que, en este punto, se considera el adobe como sistema constructivo, a diferencia de otros métodos o normas (ejemplo normas chilenas), lo que lo hace aplicable a estos casos particulares de estudio y a gran número de edificios patrimoniales de la zona.

El punto 8 del método, hace referencia a estructuras horizontales de entre piso. Este es un punto que entrega un alto índice de vulnerabilidad sísmica en general a las cinco iglesias. Ya que no se considera la presencia de una estructura que funciona como un diafragma rígido que distribuya los esfuerzos de manera solidaria a todos los elementos resistentes.

Punto similar al referido a la cubierta, está enfocado a que, si ésta es capaz de repartir el esfuerzo entre los elementos verticales, y si genera o no empujes importantes o ayuda a la estabilidad de los muros. Caso particular es la Iglesia San Francisco, ya que en su estado actual no presenta cubierta, lo cual podría ser considerado una condición de vulnerabilidad por lo desprotegidos que quedan los muros, pero a su vez esto implica que no existe empuje en ellos, como si ocurre en las iglesias Santa Ana o Doce Apóstoles.

Las siguientes categorías apuntan netamente al estado de conservación de las construcciones y no tanto a unas características estructurales.

El punto 10 categoriza según el estado actual de la construcción, ya que el deterioro de los materiales o el abandono provoca una alta vulnerabilidad. El índice de vulnerabilidad de las iglesias Santa Ana, San Francisco y Doce Apóstoles, se ve altamente afectado en esta categoría, ya que son las iglesias que se encuentran en abandono. A diferencia de La Matriz y Sagrado Corazón de Jesús que están completamente operativas.

El punto 11 considera las alteraciones del entorno, lo cual es considerado un punto más enfocado en la vulnerabilidad asociada a la pérdida del patrimonio y las consecuencias del movimiento sísmico, más que a una propiedad estructural como tal. Desde el punto de vista netamente estructural no debería tener mayor valor en la suma.

En el punto 12 se analiza si se han hecho intervenciones poco adecuadas a la estructura. Desde el punto de vista estructural, utilizar técnicas constructivas distintas a las originales provoca diferencias en las rigideces haciendo básicamente que las nuevas estructuras sean las portantes del edificio. Esto también genera una pérdida importante en el ámbito patrimonial ya que se le resta importancia al material original.

La vulnerabilidad al fuego, analizada en el punto 13, tiene gran importancia en los casos estudiados, ya que el fuego es uno de los agentes que ha causado grandes daños en la ciudad de Valparaíso y particularmente en la iglesia San Francisco (ha sido afectada tres veces por incendios a lo largo de su historia). Sin embargo, esta vulnerabilidad no responde a un comportamiento de la estructura ante el movimiento sísmico y está más

bien asociado a un desastre posterior producto de la acción sísmica, pero no tiene un enfoque netamente estructural.

Finalmente, luego de aplicar el nivel LV0 se tiene las siguientes conclusiones de la herramienta:

Está bien estructurada y hace una buena delimitación de las clases en cada uno los parámetros a evaluar. Sin embargo, tiene puntos muy enfocados en la pérdida del inmueble patrimonial, y que son difíciles de encajar una vulnerabilidad sísmica asociada al comportamiento netamente estructural.

Entregó resultados esperados con respecto a una observación simple, en cuanto al orden de los índices de vulnerabilidad.

Presenta importantes criterios que afectan el comportamiento estructural del edificio ante la acción sísmica, sin requerir cálculos analíticos, esto la hace ser una buena herramienta para la evaluación primaria de edificios patrimoniales, ya que es de aplicación simple y rápida. Es muy útil para una aplicación masiva, de modo de realizar un levantamiento territorial del estado actual del patrimonio inmueble chileno.

5.2. APLICACIÓN DEL LV1

A continuación, se presenta la aplicación del nivel LV1 de la *Linee Guida* para cada una de las iglesias estudiadas, se presenta la evaluación y consideraciones que se hicieron para cada macroelemento. Indicando el índice de vulnerabilidad de las estructuras.

5.2.1. Aplicación LV1 La Matriz

Considerando que esta iglesia fue objeto de un proyecto de consolidación estructural el año 2013, se estima que la conexión entre unidades perpendiculares de mampostería (fachada – muros laterales) es de buena calidad.

En la fachada se encuentran elementos que son indicadores de vulnerabilidad con respecto al mecanismo de separación de la parte superior de la fachada, que son las aberturas tipo “*rose windows*”, un gable en la parte superior, y la presencia de una losa de hormigón armado en el interior de la iglesia que debido a su gran masa genera un empuje importante fuera del plano de la fachada.



Figura 5-2 Fachada iglesia La Matriz indicando factores de vulnerabilidad.



Figura 5-3 Vista interior iglesia La Matriz (hacia salida) indicando losa de hormigón armado.

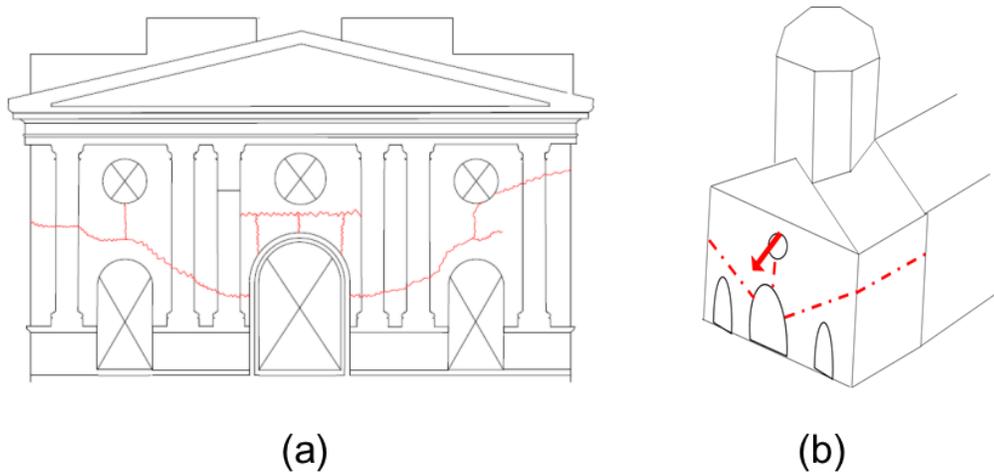


Figura 5-4 (a) Fisuras observadas en fachada de la iglesia La Matriz, (b) Mecanismo de falla estimado.

Un indicador desfavorable para los mecanismos en el plano de la fachada son las aberturas de grandes dimensiones de este muro, las cuales corresponden a las 3 puertas de acceso y sus correspondientes ventanas, además del “rose windows”.

La iglesia no presenta nártex, por lo que el mecanismo 4 no se considera.

El corte en los muros laterales es un mecanismo que puede presentarse en esta iglesia, sin embargo, se considera que la mampostería es de buena calidad, lo que es un indicador resistente, por otra parte, un indicador de vulnerabilidad sería las aberturas en los muros, pero para esta estructura se considera que no son de tamaño importante.



Figura 5-5 Vista exterior de muros laterales de la iglesia La Matriz.

Con respecto a la respuesta longitudinal de las columnas se debe mencionar que estas están conectadas entre sí por elementos mucho menos rígidos, por lo que no se espera que tenga un comportamiento en conjunto a los esfuerzos horizontales impuestos por un sismo, más bien reciben sólo la carga vertical del techo.

La bóveda de la nave central, no es realmente una bóveda que represente un mecanismo, ya que no es estructural y es más bien arquitectónica, por otra parte, las naves laterales no presentan bóveda. Esta iglesia no presenta transepto, arco triunfal, cúpula, ni linterna por lo que no se consideran los mecanismos del 10 al 15. Además de no poseer capilla.

Para la torre campanario, se consideran como elementos resistentes, las intervenciones realizadas en esta, por lo que se espera que tenga un mejor funcionamiento, ante sollicitaciones horizontales.

Tabla 5-6 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia La Matriz

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Buena conexión facha muro lateral	Efic. V_{kp} 2	Grav V_{ki} 0
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	-	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 1 1 2

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

3	Mecanismos en el plano de la fachada		
	Efic. V_{fp} 0	Aberturas grandes dim.	Grav V_{ki} 1 1 ρ_k 1 Valor fijo
4	Pórtico - nártex		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
5	Respuesta transversal de la nave		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
	Efic. V_{fp} Mampost. uniforme de buena calidad 2 2		Grav V_{ki} 0 ρ_k 1 Valor fijo
7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
8	Bóveda del pasillo central		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
10	Volteo de los muros traseros del transepto		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal		
	Efic. V_{fp} 0		Grav V_{ki} 0 ρ_k 0 No Presenta Mecanismo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

14	Cúpula y tambor			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
15	Linterna			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
16	Abertura del ábside			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	Posee contrafuertes ext. Techos arriostrados	2 1	0	1 Valor fijo
Mecanismo de corte en muro del ábside				
17	Mampost. uniforme de buena calidad			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	2	0	1	Valor fijo
18	Bóveda del ábside			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
19	Mecanismos de los elementos de techo de la nave			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	1	Valor fijo
20	Mecanismos de los elementos de techo del transepto			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
21	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
22	Abertura de la capilla			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
23	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo
24	Volteo de la capilla			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	
	0	0	0	No Presenta Mecanismo

25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
27	Torre campanario		
	Tirantes en varios niveles Efic. V_{kp} 2 2	-	Grav V_{ki} 0 ρ_k 1 Valor fijo
28	Celda campanario		
	Tirantes Efic. V_{kp} 1 1	-	Grav V_{ki} 0 ρ_k 1 Valor fijo

En la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (I_v) del nivel LV1 para la iglesia La Matriz, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla 5-7 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia La Matriz

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	2	0	1	-2
2	0	2	1	2
3	0	1	1	1
6	2	0	1	-2
16	2	0	1	-2
17	2	0	1	-2
19	0	0	1	0
27	2	0	1	-2
28	1	0	1	-1
		Σ:	9	-8

Con lo anterior da como resultado para el índice de vulnerabilidad de la iglesia La Matriz (según ecuación (4.1)):

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{-8}{9} + \frac{1}{2}$$

$$I_v = 0.35$$

5.2.2. Aplicación LV1 San Francisco

La evaluación siguiente corresponde al estado actual de la iglesia San Francisco, la cual se encuentra cerrada y en abandono, luego del incendio de 2013, en medio de trabajos de restauración post terremoto 2010. La estructura que se encuentra en pie actualmente es el edificio de fachada, y los muros perimetrales de la iglesia, aunque estos se encuentran en distintos grados de deterioro. El interior de la iglesia se encuentra sin techo y sin ninguno de sus elementos interiores.

La fachada de esta iglesia no es un muro como tal, sino que presenta una estructura de albañilería de ladrillo que conforma el frontis de la estructura, por lo tanto, se considera que el volteo en la fachada está bien controlado por la buena conexión de la albañilería de esta estructura.



Figura 5-6 Estructura del frontis de la iglesia San Francisco.

Dada la forma de la fachada, no se considera que pueda existir la separación de la parte superior de la fachada.

Para el mecanismo en el plano de la fachada se considera el hecho de que la iglesia tiene estructuras vecinas que le dan confinamiento, y como una condición de vulnerabilidad son las grandes aberturas, sin embargo, como se mencionó, la fachada no corresponde a un solo muro plano, sino que, a una estructura, por lo que su respuesta transversal está asociada al conjunto que la conforma.

La iglesia no presenta nártex. En su condición actual, no existen las naves, por lo que no se podría considerar ningún mecanismo asociado a estas.



Figura 5-7 Ejemplo del estado de los muros de la iglesia San Francisco

Para el mecanismo de corte de los muros laterales, los cuales son de adobe, se consideraría como mecanismo resistente, una mampostería uniforme en fase constructiva, sin embargo, en su estado actual, la calidad de esto se ve notoriamente mermado, el abandono de la iglesia provocó que los muros quedaran expuestos al ambiente, por lo que el adobe al contacto con la humedad pierde resistencia, convirtiendo esto en un importante indicador de vulnerabilidad.



Figura 5-8 Interior de la iglesia San Francisco: Fuente: Emol.com (22 de junio de 2017)

La iglesia no presenta transepto, cúpula ni linterna por lo que no se consideran los mecanismos asociados a estos elementos.

En cuanto al mecanismo asociado al ábside, en su estado actual no presenta techo que cause empujes, sin embargo, el factor de vulnerabilidad (igual a toda la estructura) es el debilitamiento de las paredes debido a la poca o nula protección al ambiente.

En cuanto al mecanismo de corte en muros del ábside, acá también se considera la calidad de la mampostería.

Por otra parte, no se considera capilla en este análisis, ni elementos que tengan distinto comportamiento. Tampoco existen proyecciones no estructurales que tengan riesgo de caídas.

La torre de campanario es un mecanismo importante, debido a su gran altura, sin embargo, se considera que está construida por una mampostería uniforme y de buena calidad, así como que está bien conectada a la estructura de fachada.

Tabla 5-8 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia San Francisco

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Buena conex. fachada muro lateral	Efic. V_{kp} 2 <input type="text" value="2"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> Valor fijo
3	Mecanismos en el plano de la fachada		
	Facha inserta en un agregado	Efic. V_{kp} 2 <input type="text" value="2"/> Aberturas grandes dim.	Grav V_{ki} 1 <input type="text" value="1"/> ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
4	Pórtico - nártex		
		Efic. V_{kp} <input type="text" value=""/>	Grav V_{ki} <input type="text" value=""/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
5	Respuesta transversal de la nave		
		Efic. V_{kp} <input type="text" value=""/>	Grav V_{ki} <input type="text" value=""/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
		Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/> Muros con aberturas y mala calidad	Grav V_{ki} 1 <input type="text" value="1"/> ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
8	Bóveda del pasillo central		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
10	Volteo de los muros traseros del transepto		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
14	Cúpula y tambor		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
15	Linterna		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
16	Abertura del ábside		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Debilitamiento de paredes 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
17	Mecanismo de corte en muro del ábside		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Debilitamiento de paredes 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

18	Bóveda del ábside			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
19	Mecanismos de los elementos de techo de la nave			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
20	Mecanismos de los elementos de techo del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
21	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
22	Abertura de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
23	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
24	Volteo de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
27	Torre campanario			
	Mampostería uniforme Buena conexión	Efic. V_{kp} 2 1	Grandes aberturas en varios niveles	Grav V_{ki} 1 1
		2	1	1 Valor fijo
28	Celda campanario			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
		0	0	1 Valor fijo

En la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (I_v) del nivel LV1 para la iglesia San Francisco, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla 5-9 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia San Francisco

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	2	0	1	-2
3	2	1	1	-1
6	0	1	1	1
16	0	1	1	1
17	0	1	1	1
27	2	1	1	-1
28	0	0	1	0
Σ:			7	-1

El resultado para el índice de vulnerabilidad de la iglesia San Francisco es:

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{-1}{7} + \frac{1}{2}$$

$$I_v = 0.48$$

5.2.3. Aplicación LV1 Santa Ana

La iglesia Santa Ana es una estructura bastante regular de planta cuadrada y no de gran altura, lo que la hace ser una estructura compacta.

La presencia de una estructura de columnas con techo de madera contribuye a impedir el volteo de la fachada de esta iglesia. Además, se considera la calidad de las conexiones de la albañilería entre la fachada y los muros laterales.



Figura 5-9 Estructura del frontis de la iglesia Santa Ana

El edificio de mampostería a un costado de la iglesia funciona como dispositivo resistente por el mecanismo en el plano de la fachada.



Figura 5-10 Edificio Adyacente a la iglesia Santa Ana

La estructura frontal de la iglesia corresponde a un nártex, por lo que este mecanismo de colapso es considerado para esta iglesia. En este caso, se consideran la contribución de las columnas y como indicadores de vulnerabilidad, se toma el peso de la estructura y torre de madera sobre esta.



Figura 5-11 Estado de los Muros Iglesia Santa Ana

El corte en los muros es resistido principalmente por la calidad de la albañilería. Si bien, este corresponde a adobe, material que tiene baja resistencia al esfuerzo de corte, su fase constructiva junto con los refuerzo de mallas metálicas dispuesta, representa buena estabilidad para los muros.

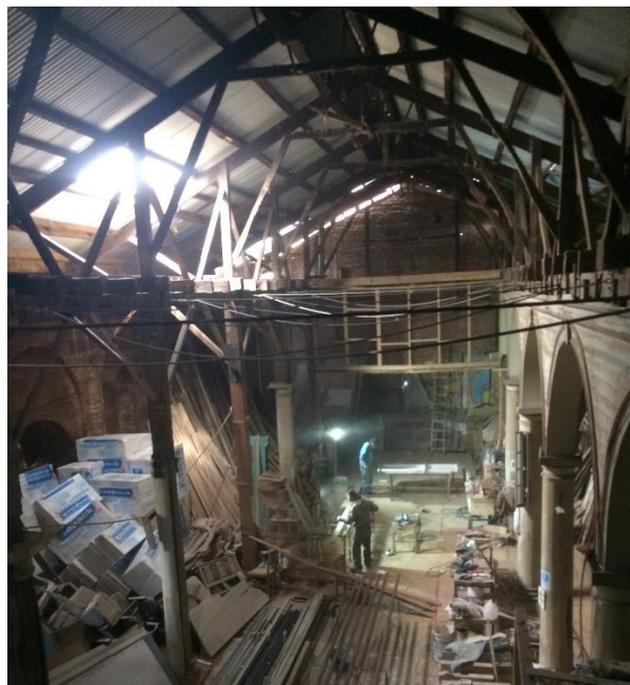


Figura 5-12 Vista Interior del estado actual iglesia Santa Ana

La torre campanario, es de una altura considerable con respecto al tamaño de la iglesia, por lo que es un mecanismo a tener en cuenta. Se considera que tiene una buena conexión a la estructura del frente de la iglesia, y que no tiene un peso excesivo al ser de madera, su vulnerabilidad está dado por su forma y dimensiones.

Tabla 5-10 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia Santa Ana

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Pres. de elemento de contraste Buena conex. fachada muro lateral	Efic. V_{kp} 1 <input type="text" value="2"/> 1 <input type="text" value="2"/>	Grav V_{ki} 2 <input type="text" value="2"/> ρ_k 1 Valor fijo
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> Valor fijo
3	Mecanismos en el plano de la fachada		
	Constraste lateral otro edificio.	Efic. V_{kp} 1 <input type="text" value="1"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
4	Pórtico - nártex		
	Columnas con rigidez adecuada	Efic. V_{kp} 2 <input type="text" value="2"/>	Grav V_{ki} 1 <input type="text" value="1"/> ρ_k <input type="text" value="0.5"/> No Presenta Mecanismo
5	Respuesta transversal de la nave		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
	Mamp. uniforme y de buena calidad	Efic. V_{kp} 1 <input type="text" value="1"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
8	Bóveda del pasillo central		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales		
	-	Efic. V_{kp} <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/> ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

10	Volteo de los muros traseros del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
14	Cúpula y tambor		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
15	Linterna		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
16	Abertura del ábside		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
17	Mecanismo de corte en muro del ábside		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
18	Bóveda del ábside		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
19	Mecanismos de los elementos de techo de la nave		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
20	Mecanismos de los elementos de techo del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

21	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
22	Abertura de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
23	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
24	Volteo de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
27	Torre campanario			
	Mampostería uniforme Buena conexión	Efic. V_{kp} 1 2	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1 Valor fijo
28	Celda campanario			
	Presencia de peq. Arcos	Efic. V_{kp} 1 1	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1 Valor fijo

En la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (I_v) del nivel LV1 para la iglesia Santa Ana, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla 5-11 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia Santa Ana

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	2	2	1	0
3	1	0	1	-1
4	2	1	0.5	-0.5
6	1	0	1	-1
27	2	0	1	-2
28	1	0	1	-1
		Σ:	5.5	-5.5

El resultado para el índice de vulnerabilidad de la iglesia Santa Ana (ecuación (4.1)) es:

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{-5.5}{5.5} + \frac{1}{2}$$

$$I_v = 0.33$$

5.2.4. Aplicación LV1 Doce Apóstoles

La fachada de la iglesia Doce Apóstoles es de grandes dimensiones, y esta afecta a sufrir volteo, ante esto se considera como principal mecanismo resistente la calidad de la conexión entre la fachada y las paredes laterales.



Figura 5-13 Fachada de la iglesia Doce Apóstoles

Además, en la fachada se encuentra una gran abertura de forma circular (“*rose window*”) que afecta en el comportamiento en la parte superior de la fachada, así como también en el comportamiento en el plano.

El comportamiento transversal de la nave es considerado debido a las grandes dimensiones de la iglesia, podrían ser altamente solicitados durante la acción de un sismo, sin embargo, se considera como dispositivo resistente la presencia de contrafuertes en los muros laterales.

El corte en los muros laterales se ve afectado por las aberturas correspondientes a puertas y ventanas, todo esto contrarrestado por muros que están contruidos por una albañilería de buena calidad.

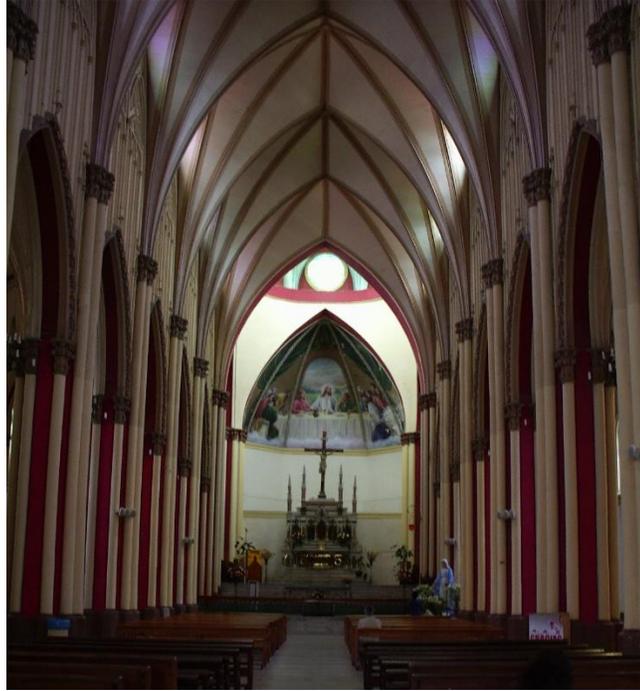


Figura 5-14 Vista interior Iglesia Doce Apóstoles

Un mecanismo de colapso importante es la respuesta longitudinal de las columnas que forman las naves, ya que sobre estas nacen los muros que forman un segundo volumen en altura de la iglesia, estos muros representan un peso considerable sobre las columnas.

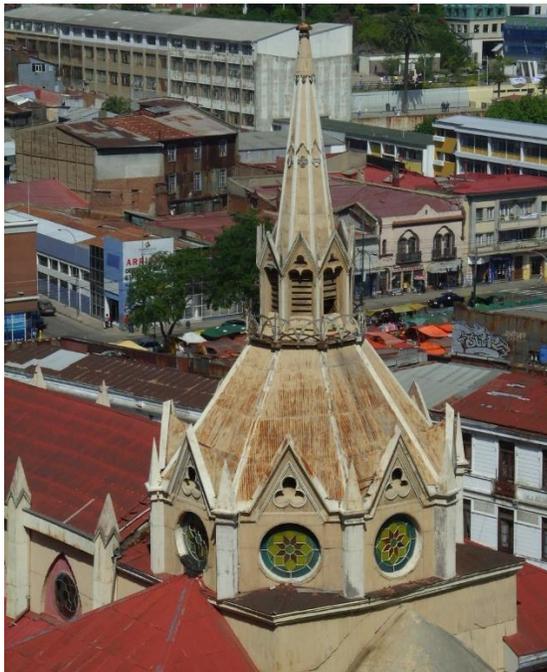


Figura 5-15 Elemento Saliente iglesia Doce Apóstoles

Esta iglesia cuenta con un volumen saliente considerable. Por esta razón es que está presente el mecanismo denominado “cúpula y tambor”

Otro elemento característico observable, es la presencia de ábside, el cual puede estar afecto a la abertura o corte en sus muros, sin embargo, se considera que tiene un techo confinante y una mampostería de buena calidad que ayudan reducir la vulnerabilidad de este elemento.

La iglesia no presenta otros posibles mecanismos, tales como, transepto, capilla o torre campanario.

Tabla 5-12 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia Doce Apóstoles

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Buena conexión facha muro lateral	Elementos que casuan empuje	Valor fijo
	Efic. V_{kp} 1 1	Grav V_{ki} 1 1	ρ_k 1
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	-	Grandes aberturas Presencia de gable	Valor fijo
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 2 2 1	ρ_k 1
3	Mecanismos en el plano de la fachada		
		Grandes aberturas "Rose Window"	Valor fijo
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 2 2	ρ_k 1
4	Pórtico - nártex		
			No Presenta Mecanismo
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0
5	Respuesta transversal de la nave		
	Contrafuertes externos		Valor fijo
	Efic. V_{kp} 1 1	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
	Mamp. uniforme y de buena calidad	Presencia de aberturas (ventanas)	Valor fijo
	Efic. V_{kp} 2 2	Grav V_{ki} 2 2	ρ_k 1
7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
		Bóvedas pesadas	Valor fijo
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 1 1	ρ_k 1

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

8	Bóveda del pasillo central			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
10	Volteo de los muros traseros del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
14	Cúpula y tambor			
	Efic. V_{kp}	Aberturas en tambor	Grav V_{ki}	ρ_k
	0	1	1	1 Valor fijo
15	Linterna			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0.5 Valor fijo
16	Abertura del ábside			
	Efic. V_{kp}	Techos que no produce empujes	Grav V_{ki}	ρ_k
	1	1	0	1 Valor fijo
17	Mecanismo de corte en muro del ábside			
	Efic. V_{kp}	Mamp. uniforme y de buena calidad	Grav V_{ki}	ρ_k
	1	1	0	1 Valor fijo
18	Bóveda del ábside			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

19	Mecanismos de los elementos de techo de la nave		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
20	Mecanismos de los elementos de techo del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
21	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
22	Abertura de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
23	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
24	Volteo de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
27	Torre campanario		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
28	Celda campanario		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo

En la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (i_v) del nivel LV1 para la iglesia Doce Apóstoles, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla 5-13 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia Doce Apóstoles

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	1	1	1	0
2	0	2	1	2
3	0	2	1	2
5	1	0	1	-1
6	2	2	1	0
7	0	1	1	1
14	0	1	1	1
15	0	0	0.5	0
16	1	0	1	-1
17	1	0	1	-1
Σ:			9.5	3

El resultado para el índice de vulnerabilidad de la iglesia Doce Apóstoles es:

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{3}{9.5} + \frac{1}{2}$$

$$I_v = 0.55$$

5.2.5. Aplicación LV1 Sagrado Corazón de Jesús

De la observación y análisis de la estructura, se determinó que existe una muy buena conexión entre la fachada y lo muro laterales, que estos incluso se cruzan.



Figura 5-16 Fachada y torre campanario de Iglesia Sagrado Corazón de Jesús.

Las aberturas en la fachada son indicadores de vulnerabilidad tanto en la parte superior de la fachada como en el corte de esta, sin embargo, esto es contrarrestado por los contrafuertes dispuestos.

la presencia de contrafuertes en el exterior se considera como dispositivos sísmicos resistentes para la respuesta transversal de la nave, siendo de gran importancia en la seguridad de la estructura general.



Figura 5-17 vista a muros laterales, iglesia Sagrado Corazón de Jesús

El corte en los muros laterales se ve afectado por las aberturas en estos muros, pero a su vez se considera una muy buena calidad de la mampostería.

Se considera la respuesta longitudinal de las columnas que forman las naves, ya que sobre estas nacen los muros que forman un segundo volumen en altura de la iglesia, y estos muros representan un peso considerable sobre las columnas. Por otra parte, elementos de contrafuerte en la fachada aportan a reducir la vulnerabilidad de este mecanismo.



Figura 5-18 Vista nave central iglesia Sagrado Corazón de Jesús



Figura 5-19 Vista arcos interiores y nave lateral iglesia, Sagrado corazón de Jesús

El ábside de esta iglesia se encuentra en el interior de la estructura, por lo que se considera para el análisis estructuras de contrastes eficientes. A pesar de tener un cielo abovedado, esta no es una bóveda como tal (es una estructura de madera), por lo que no representa un peso considerable.

Esta iglesia es la única de las cinco estudiadas en este trabajo de título, que presenta una torre campanario que es adyacente a la estructura principal, sin embargo, esta se encuentra bien conectada a la estructura y es de una albañilería de buena calidad, similar a de la iglesia en general.

La torre hoy en día representa una menor vulnerabilidad ya que disminuyó su altura con respecto a su configuración original.

Tabla 5-14 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia Sagrado Corazón de Jesús

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Efic. V_{kp} Elementos de contraste 1 <input type="text" value="3"/> Buena conexión facha muro lateral 3 <input type="text" value="3"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	Efic. V_{kp} - <input type="text" value="0"/>	Grav V_{ki} Grandes aberturas 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
3	Mecanismos en el plano de la fachada		
	Efic. V_{kp} Contras. lateral por cuerpos exter. 1 <input type="text" value="1"/>	Grav V_{ki} Grandes aberturas 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
4	Pórtico - nártex		
	Efic. V_{kp} <input type="text" value=""/>	Grav V_{ki} <input type="text" value=""/>	ρ_k <input type="text" value="0"/> No Presenta Mecanismo
5	Respuesta transversal de la nave		
	Efic. V_{kp} Contrafuertes externos 1 <input type="text" value="1"/>	Grav V_{ki} <input type="text" value="0"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
	Efic. V_{kp} Mamp. uniforme y de buena calidad 2 <input type="text" value="2"/>	Grav V_{ki} Presencia de aberturas (ventanas) 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo
7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
	Efic. V_{kp} Contrafuertes en fachada 1 <input type="text" value="1"/>	Grav V_{ki} Bóvedas pesadas 1 <input type="text" value="1"/>	ρ_k <input type="text" value="1"/> Valor fijo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

8	Bóveda del pasillo central			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
10	Volteo de los muros traseros del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
14	Cúpula y tambor			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
15	Linterna			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
16	Abertura del ábside			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	Contrafuertes externos 1 2 techos que no produce empujes 1 2		0	1 Valor fijo
17	Mecanismo de corte en muro del ábside			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	Mamp. uniforme y de buena calidad 2 2		0	1 Valor fijo
18	Bóveda del ábside			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo

Capítulo 5: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica

19	Mecanismos de los elementos de techo de la nave			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
20	Mecanismos de los elementos de techo del transepto			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
21	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
22	Abertura de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
23	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
24	Volteo de la capilla			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo
27	Torre campanario			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	Maposteria uniforme 1	2	0	1 Valor fijo
	Buena conex.con pared. De Iglesia 1			
28	Celda campanario			
	Efic. V_{kp}		Grav V_{ki}	ρ_k
	0		0	0 No Presenta Mecanismo

En la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (i_v) del nivel LV1 para la iglesia Sagrado Corazón de Jesús, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla 5-15 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia Sagrado Corazón de Jesús

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	3	1	1	-2
2	0	1	1	1
3	1	1	1	0
5	1	0	1	-1
6	2	1	1	-1
7	1	1	1	0
16	2	0	1	-2
17	2	0	1	-2
27	2	0	1	-2
		Σ:	9	-9

El resultado para el índice de vulnerabilidad de la iglesia Sagrado Corazón de Jesús es:

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{-9}{9} + \frac{1}{2}$$

$$I_v = 0.33$$

5.2.6. Discusión de la aplicación de LV1

El índice de vulnerabilidad recién calculado, reconoce los macroelementos característicos que podrían estar presentes en las iglesias, y reconoce las condiciones que generan vulnerabilidad sísmica en estos, así como también los dispositivos que ayudan a reducir esta vulnerabilidad. Por lo tanto, esta metodología valoriza las características propias de respuesta de la estructura ante la acción sísmica, pero de una manera cualitativa, ya que no incurre en cálculos estructurales propiamente tal, así que el valor entregado es sólo una estimación estadística.

Sin embargo, la simplicidad en su aplicación, lo convierte una buena herramienta, para un análisis territorial, conociendo el estado de los edificios patrimoniales y discriminando cuales requieren mayor atención ante la posible acción sísmica.

En este caso particular de estudio, las iglesias con menor índice de vulnerabilidad son las iglesias Santa Ana y Sagrado corazón de Jesús, ambas con índice de vulnerabilidad 0.33 y las más vulnerable es la iglesia doce apóstoles con un índice de vulnerabilidad de 0.55.

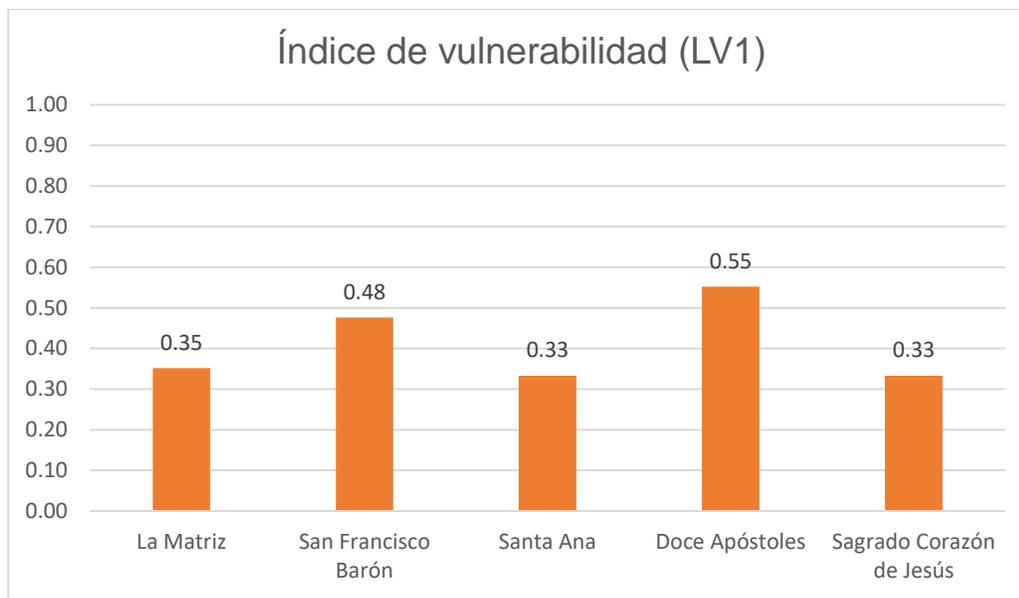


Figura 5-20: Gráfico resumen índice de vulnerabilidad LV1.

Estos resultados en el índice de vulnerabilidad eran esperados al considerar que la iglesia más vulnerable es la que presenta más daños estructurales. Mientras que por otra parte la iglesia Sagrado Corazón de Jesús, que tiene el índice de vulnerabilidad más bajo ha tenido pocos o nulos daños a lo largo de su historia, siendo su torre campanario su dispositivo sísmico más vulnerable, el que hoy en día ya no tiene una altura considerable en este aspecto.

La alta vulnerabilidad de la iglesia Doce Apóstoles se asocia a la cantidad de macroelementos que podrían activarse durante la acción de un sismo y que son considerados en la metodología. Así como también sus grandes dimensiones. De hecho, un resultado que se puede observar es que el índice de vulnerabilidad de las iglesias estudiadas está directamente relacionado al tamaño de la estructura, es decir a mayor tamaño mayor el índice de vulnerabilidad.

Cabe mencionar que, si bien esta evaluación considera el estado actual de la estructura, en lo que se refiere a la calidad del material, deterioros en conexiones y sistemas constructivos o intervenciones realizadas, en general el índice de vulnerabilidad está asociado a la presencia o no de elementos que pueden activar cierto mecanismo de colapso, por lo tanto, está más bien asociado a propiedades propias de la estructura más allá del estado actual.

5.2.6.1. Evaluación de la seguridad sísmica

La seguridad sísmica de las estructuras estará dada por la comparación de su vulnerabilidad, la que se puede traducir en aceleraciones de colapso en distintos estados límites (según las ecuaciones presentadas en el capítulo 4.), con la amenaza sísmica del sitio en el que están emplazadas. En la siguiente tabla se muestran las aceleraciones de colapso correspondiente a cada iglesia estudiada.

Tabla 5-16: Índices de Vulnerabilidad y aceleraciones de colapso de la aplicación de LV1

Parámetro	La Matriz	San Francisco Barón	Santa Ana	Doce Apóstoles	Sagrado Corazón de Jesús
I_v	0.35	0.48	0.33	0.55	0.33
a_{SLD} S [g]	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06
a_{SLV} S [g]	0.25	0.19	0.26	0.16	0.26

Se observa que el rango de aceleraciones de colapso para el estado límite de servicio (a_{SLD}) va entre 0,04 y 0,06 [g], y para el estado límite ultimo (a_{SLV}) el rango de aclaraciones de colapso para estas iglesias es entre 0.16 y 0.26 [g].

Se estima una vida nominal para las cinco iglesias de $V_N = 50$ años y una categoría de uso de III (según clasificación de la norma italiana) dada su importancia, uso frecuente y la posibilidad de aglomeración de personas, lo que implica un coeficiente de uso $C_U = 1.5$ por lo tanto, el periodo de referencia para las 5 iglesias será de $V_R = 75$ años.

A continuación, se especifica el tipo de suelo de cada iglesia estudiada según la clasificación del DS61 y su correlación con la norma italiana NTC2018.

- La Matriz: Tipo suelo B, según memoria de cálculo, proyecto restauración 2012.
- San Francisco: Tipo suelo B, según memoria de cálculo, proyecto de restauración 2010.
- Santa Ana: No hay datos. Se asume suelo Tipo B, por ser el tipo de suelo más común en los cerros de Valparaíso.
- Doce Apóstoles: Suelo tipo E, según informe de mecánica de suelo 2017.
- Sagrado corazón de Jesús: No hay datos, sin embargo, dada la cercanía a la iglesia de San Francisco (un par de cuadras) se podría asumir que tienen el mismo suelo tipo B.

Según la correlación mostrada la Tabla 4-7 la clasificación de suelos para las iglesias estudiadas en la normativa italiana (NTC2018) es:

Tabla 5-17 Tipo de suelo iglesias de Valparaíso según DS61, correlación con clasificación NTC2018.

Iglesia	Tipo de Suelo	
	NCh433	NTC2008
La Matriz	B	B
San Francisco	B	B
Santa Ana	B	B
Doce Apóstoles	E	D
Sagrado Corazón	B	B

Con respecto al factor topográfico, para las iglesias La Matriz, San Francisco, Santa Ana y Sagrado Corazón, se considera una categoría T2 dada la inclinación del terreno, y por su parte la iglesia Doce Apóstoles se considera categoría T1 por encontrarse en la parte más plana de la ciudad.

Como se determinó el punto 4.4 de esta memoria, la aceleración esperada (a_g) es la misma para toda la ciudad de Valparaíso y en este caso se utilizará los resultados presentados por Núñez (2014).

T_R [años]	A_g [g]
475	0.411
2475	0.669

Así, el estudio para los dos estados límites considerados por la norma italiana, SDL con probabilidad de excedencia de 63% y SLV con probabilidad de excedencia de 10% queda como sigue:

Tabla 5-18 Resultados de aplicación LV1 a las cinco Iglesias de Valparaíso.

Parámetro	La Matriz	San Francisco Barón	Santa Ana	Doce Apóstoles	Sagrado Corazón de Jesús
I_v	0.352	0.476	0.333	0.553	0.333
$a_{SLD} S$ [g]	0.062	0.048	0.064	0.041	0.064
$a_{SLV} S$ [g]	0.246	0.191	0.255	0.164	0.255
V_n [años]	50	50	50	50	50
C_U	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
V_R [años]	75	75	75	75	75
Tipo Suelo	B	B	B	D	B
Topografía	T2	T2	T2	T1	T2
S_s	1.18	1.18	1.18	1.56	1.18
S_T	1.20	1.20	1.20	1.00	1.20
S	1.41	1.41	1.41	1.56	1.41

$T_{R \text{ SLD}} (P_V=63\%)$ [años]	75	75	75	75	75
$T_{R \text{ SLV}} (P_V=10\%)$ [años]	712	712	712	712	712
$a_g \text{ SLD}$ [g]	0.239	0.239	0.239	0.239	0.239
$a_g \text{ SLV}$ [g]	0.463	0.463	0.463	0.463	0.463
$T_{R \text{ aSLD}}$ [años]	0.24	0.10	0.27	0.04	0.27
$T_{R \text{ aSLV}}$ [años]	26.0	11.1	29.5	4.7	29.5

f_a (SLD)	0.18	0.14	0.19	0.11	0.19
I_s (SLD)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

f_a (SLV)	0.38	0.29	0.39	0.23	0.39
I_s (SLV)	0.04	0.02	0.04	0.01	0.04

De los resultados se observa claramente que, al aplicar la metodología italiana en cuanto a la evaluación de la seguridad sísmica con los datos de las iglesias chilenas, tanto el índice de seguridad como el factor de aceleración en ambos estados límite, se encuentran muy por debajo de lo que se esperaría, con valores que no se condicen ni con lo observado ni con la historia de las estructuras.

Cabe señalar que el resultado anterior, no entrega información completa de qué tipo de daño o colapso presentará la estructura, dado que el índice de vulnerabilidad calculado y por ende la aceleración de colapso asociada a cada iglesia en este nivel, es un valor promedio y estadístico, y se refiere a un colapso “ponderado” de la estructura considerando todos sus macroelementos de posible activación. Por lo tanto, para determinar la seguridad sísmica, se debería realizar un análisis de manera independiente al comportamiento estructural de cada macroelemento, y así estimar la respuesta real de la estructura ante la sollicitación sísmica. Precisamente esto, es en lo que consiste el segundo nivel de la *Linee Guida* (LV2).

5.3. APLICACIÓN DEL LV2

Se escoge la Iglesia Doce Apóstoles para realizar la evaluación en el nivel LV2 ya que en esta se pueden identificar de manera clara los mecanismos de colapso de interés, además esta iglesia corresponde a la estructura con mayor índice de vulnerabilidad en el nivel LV1.

En este nivel se estudiarán de manera independiente los mecanismos de colapso identificados asociados a macro elementos característicos presentes en la iglesia.

5.3.1. Factor de Confianza

Como primer parámetro para estimar la vulnerabilidad de cada macroelemento se debe estimar en nivel de conocimiento de la estructura en cuanto a constructibilidad, geometría y materiales.

- Levantamiento geométrico: se considera un levantamiento geométrico completo
 $F_{C1} = 0$
- Aspectos constructivos históricos: el nivel de conocimiento histórico de las fases constructivas es limitado.
 $F_{C2} = 0.12$
- Propiedades mecánicas de los materiales: se utiliza estimaciones y datos anteriores:
 $F_{C3} = 0.12$
- Terreno y fundaciones: Se cuenta con datos geotécnicos y una estimación del tipo de fundaciones
 $F_{C4} = 0.03$

Por lo tanto, el factor de confianza a utilizar será:

$$F_C = 1 + 0 + 0.12 + 0.12 + 0.03 = 1.27$$

Estimado el factor de confianza F_C se procede al cálculo de los mecanismos de colapso asociados a cada macroelemento.

Los macroelementos de colapso que se analizarán son:

- La fachada
- Sección transversal de las naves
- Sección Longitudinal de las Naves
- Muros de fachadas laterales

5.3.2. Mecanismos de Fachada

La fachada de esta iglesia corresponde a un muro de albañilería donde se identifican tres puertas, la central siendo más ancha que las otras dos, en el centro del muro se encuentra

un rosetón de grandes dimensiones. Sobre esta fachada se alza un elemento de albañilería de menor espesor como coronación.



Figura 5-21 Fachada de la Iglesia Doce Apóstoles

Se estudian tres mecanismos en el plano de la fachada y tres fuera del plano.

MECANISMOS FUERA DEL PLANO

5.3.2.1. Volteo de la fachada.

Este mecanismo se refiere a la desconexión de la fachada de manera íntegra de los muros perimetrales perpendiculares, y una rotación en torno a la base. Similar al esquema de la figura.

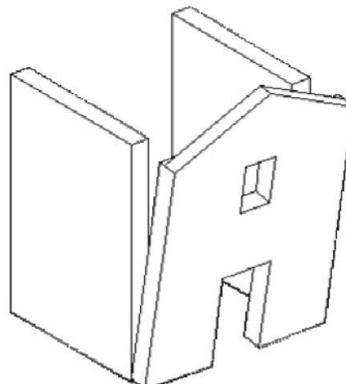


Figura 5-22 Esquema mecanismo de volteo simple de la fachada (Fuente: Linee Guida)

En la Figura 5-21 se muestra el esquema de las fuerzas involucradas en este mecanismo.

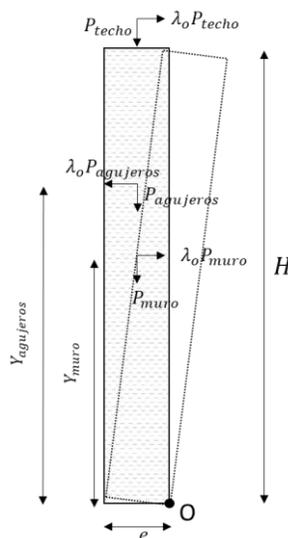


Figura 5-23 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo simple de la fachada

Se consideran como momentos negativos los pesos imaginarios de los agujeros en el muro de la fachada (puetas y rosetón).

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum \lambda_o P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	46	16.5	0.82
Muro	1218	8.25	0.82
Rosetón	60	12	0.82
Puerta Central	58	6	0.82
Puerta Izq.	38	6	0.82
Puerta Der.	38	6	0.82

$$\lambda_o = 0.09$$

$$M^* = 1069 [ton]$$

$$\alpha_o = 0.07 [g]$$

Sin embargo, para que este mecanismo se active es necesario que el muro de fachada se desconecte de los muros perpendiculares (muros laterales de la iglesia) por lo tanto se debe considerar además el esfuerzo de corte del muro para que esto suceda.

Entonces el cálculo queda,

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum \lambda_o P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot Y_{corte}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot Y_{corte}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}}$$

$$\lambda_o = 0.39$$

$$M^* = 1069 [ton]$$

$$\alpha_o = 0.31 [g]$$

5.3.2.2. Volteo de la facha con buena conexión a muros laterales

Este mecanismo al igual que el anterior indica la desconexión de la fachada provocando giro de esta en torno a un punto en la base. La diferencia es que en este caso se considera una falla en forma de cuña, el vuelco no solo afectará la fachada sino también una parte de las paredes transversales como se muestra en la figura:

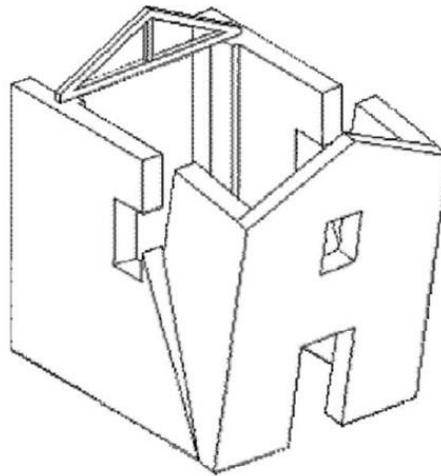


Figura 5-24 Esquema mecanismo de volteo de la fachada con buena conexión a paredes laterales
(Fuente: Linee Guida)

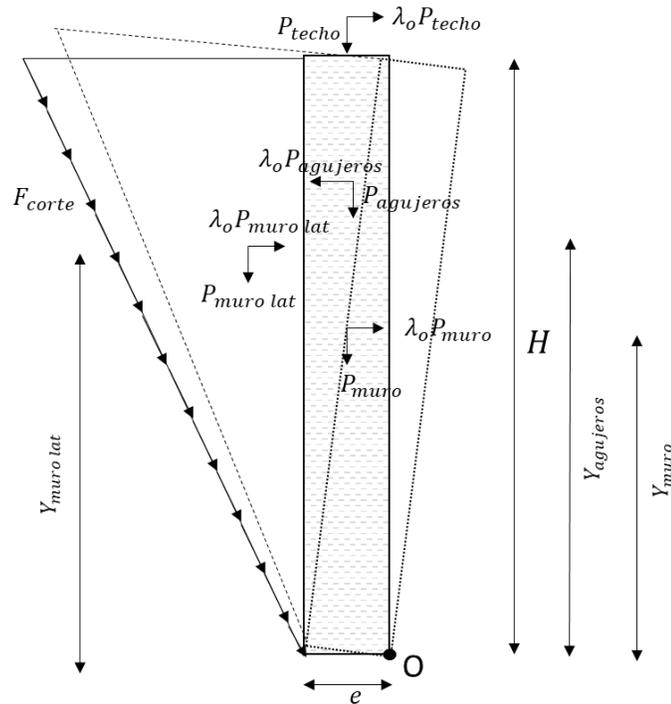


Figura 5-25 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo de fachada con conexión a muros laterales

Se consideran momentos negativos los pesos imaginarios de los agujeros en el muro de la fachada (puetas y rosetón).

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{muro} \cdot Y_{muro} + \lambda_o P_{muro\ lat} \cdot Y_{muro\ lat} - \sum \lambda_o P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} + \lambda_o P_{muro\ lat} \cdot Y_{muro\ lat} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot Y_{corte}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} + P_{muro\ lat} \cdot X_{muro\ lat} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot Y_{corte}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{muro} \cdot Y_{muro} + P_{muro\ lat} \cdot Y_{muro\ lat} - \sum P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	46	16.5	0.82
Muro	1218	8.25	0.82
Rosetón	60	12	0.82
Puerta Central	58	6	0.82
Puerta Izq	38	6	0.82
Puerta Der	38	6	0.82
Muro Lateral	107	11	1.33

$$\lambda_o = 0.42$$

$$M^* = 1143 \text{ [ton]}$$

$$\alpha_o = 0.28 \text{ [g]}$$

5.3.2.3. Derrumbe de la parte superior de la fachada.

El último mecanismo considerado fuera del plano corresponde al derrumbe de la parte superior de la fachada. Este mecanismo consiste en una inclinación del tímpano formando bisagras oblicuas. En este mecanismo se considera ausencia de restricción en la parte superior.

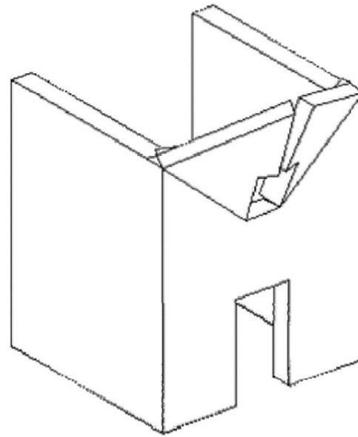


Figura 5-26 Esquema mecanismo del derrumbe de la parte superior de la fachada (Fuente: Linee Guida)

En general en este tipo de lesiones se espera que se formen grietas inclinadas que comienzan desde los bordes de la fachada hasta alcanzar aberturas en el muro, sin embargo, en este caso, dado que en la fachada se presentan pilares que tiene un espesor mayor al del muro, se considera que la lesión quedará confinada entre estos, esperando un mecanismo similar al mostrado en la siguiente figura.

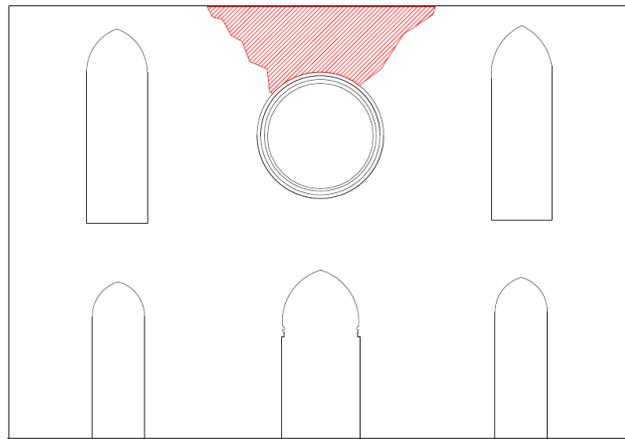


Figura 5-27 Esquema de derrumbe de la parte superior de la fachada en iglesia Doce Apóstoles.

El mecanismo de colapso se modela como en el siguiente esquema buscando el equilibrio en estado limite a través de los trabajos virtuales.

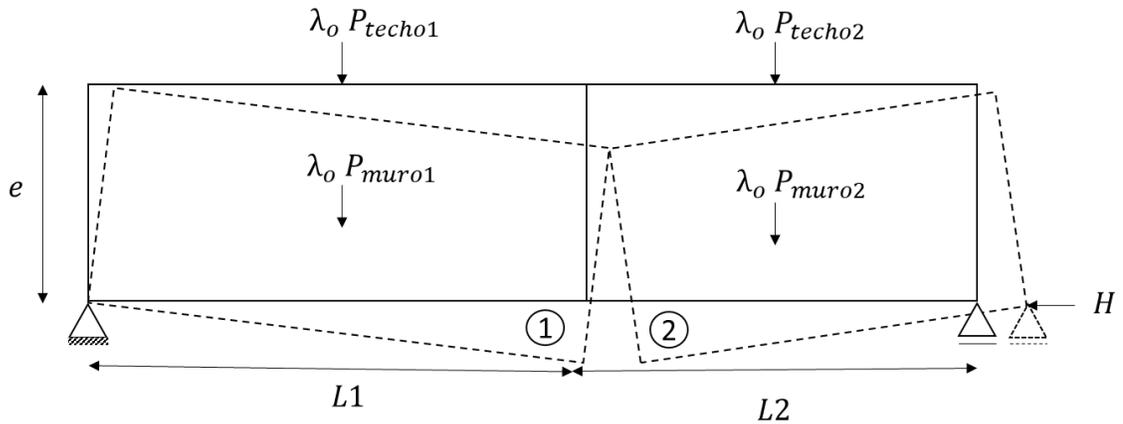


Figura 5-28 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite derrumbe de la parte superior de la fachada.

El coeficiente de colapso se calcula como:

$$\lambda_o = \frac{H \cdot Y_h}{P_{muro1} \cdot X_{muro1} + P_{muro2} \cdot X_{muro2} + P_{techo1} \cdot X_{techo1} + P_{techo2} \cdot X_{techo2}}$$

H es la fuerza resistente de este mecanismo de colapso, y se puede obtener del equilibrio en el vuelco de las paredes ortogonales.

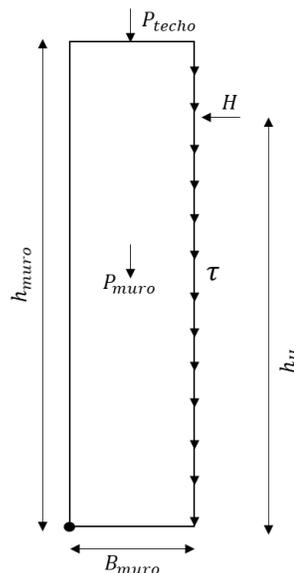


Figura 5-29 Equilibrio de paredes ortogonales al derrumbe de la parte superior de la fachada.

$$H = \frac{P_{techo} \cdot h_{techo} + P_{muro} \cdot h_{muro}}{h_H}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	127	1.3	1.3
Muro	46	1.3	1.3
F _{corte}	83	2.6	2.6
F _H	28	2	15.4
Techo1	11	2.3	-
Techo2	11	2.3	-
Muro1	13	2.3	-
Muro2	13	2.3	-

$$\lambda_o = 0.50$$

$$M^* = 50 \text{ [ton]}$$

$$\alpha_o = 0.39 \text{ [g]}$$

MECANISMO EN EL PLANO

5.3.2.4. Volteo lateral de la fachada

Dentro de los mecanismos en el plano de la fachada en este estudio, se incluye el volteo lateral, en donde el muro rota en torno a un punto en su base en su mismo plano, como se muestra en la siguiente figura.

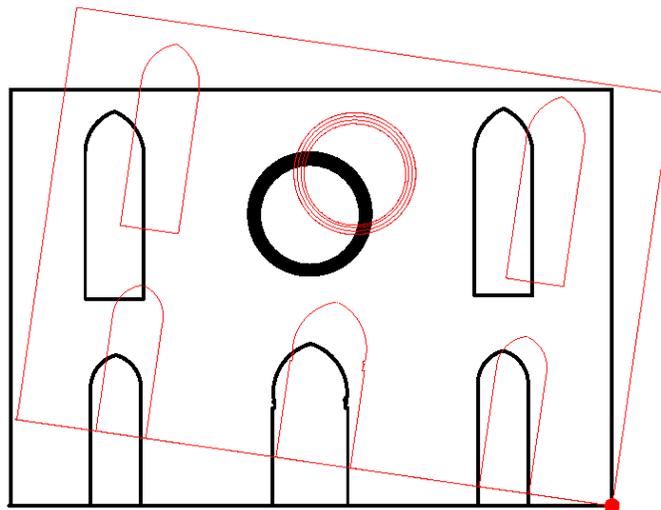


Figura 5-30 Esquema mecanismo volteo lateral de la fachada

A continuación, se muestra las fuerzas involucradas en este mecanismo.

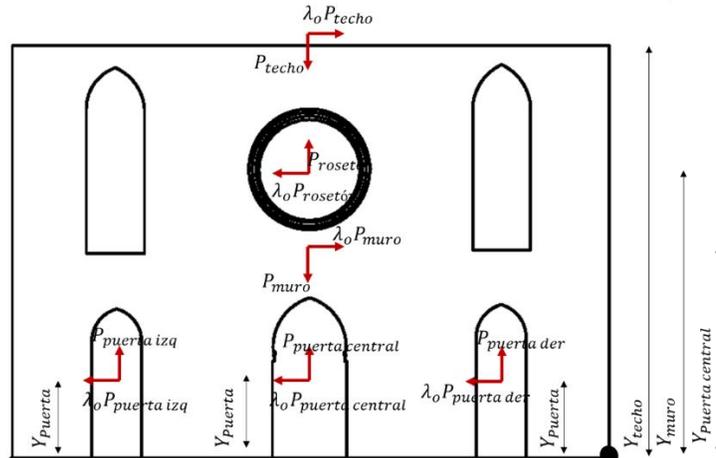


Figura 5-31 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo lateral de la fachada.

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum \lambda_o P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	46	12.5	16.5
Muro	1218	12.5	8.25
Rosetón	60	12.5	12
Puerta Central	58	12.5	6
Puerta Izq.	38	20.9	6
Puerta Der.	38	4.6	6

$$\lambda_o = 1.44$$

$$M^* = 1103 [ton]$$

$$\alpha_o = 1.10 [g]$$

5.3.2.5. Volteo lateral de la fachada con desconexión

Ahora se presenta un mecanismo similar al anterior, salvo que se considera una lesión en el muro, en este caso se considera que la lesión se dará en el lugar más débil de muro que correspondería al centro como se muestra en la figura.

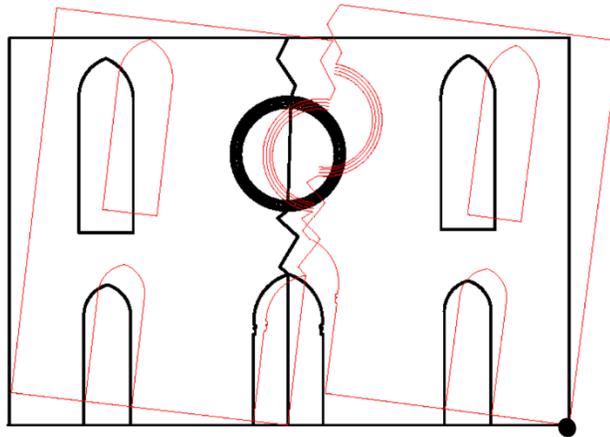


Figura 5-32 Esquema mecanismo volteo lateral de la fachada con desconexión

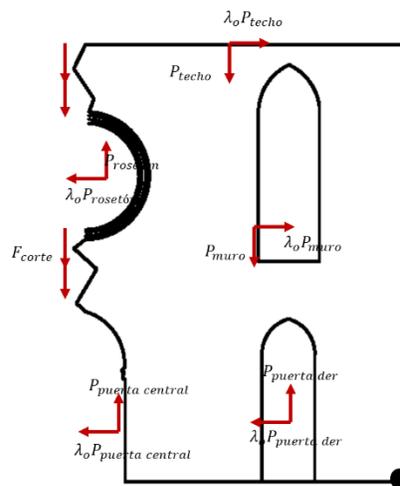


Figura 5-33 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo lateral de la fachada con desconexión central.

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum \lambda_o P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot X_{corte}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{muro} \cdot X_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot X_{agujeros} + F_{corte} \cdot X_{corte}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{muro} \cdot Y_{muro} - \sum P_{agujeros} \cdot Y_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	46	6.25	16.5
Muro	609	6.25	8.25
Rosetón	30	12.5	12
Puerta Central	29	12.5	6
Puerta Izq.	38	4.6	6
F _{corte}	91	12.5	-

$$\lambda_o = 0.86$$

$$M^* = 650 \text{ [ton]}$$

$$\alpha_o = 0.58 \text{ [g]}$$

5.3.2.6. Corte en la fachada

Un mecanismo esperable es la falla producido por los esfuerzos de corte en la fachada., como se muestra en la siguiente figura.

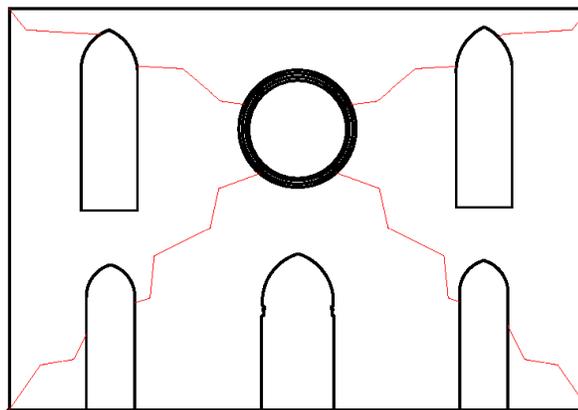


Figura 5-34 Esquema falla de corte en la fachada

La resistencia al corte está dada por:

$$F_{corte} = b \cdot e \cdot f_v$$

Por lo tanto, el multiplicador de colapso será:

$$\lambda_o = \frac{F_{corte}}{P_{techo} + P_{muro} - \sum P_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]
Techo	23	12.5
Muro	1218	12.5
Rosetón	60	12.5
Puerta Central	58	12.5
Puerta Izq.	38	4.6
Puerta Der.	38	20.9
Fcorte	328	12.5

$$\lambda_o = 0.31$$

$$M^* = 1080 [ton]$$

$$\alpha_o = 0.24 [g]$$

5.3.3. Mecanismo en Sección Transversal de la Nave

5.3.3.1. Respuesta de la sección transversal

Al analizar la sección transversal de esta iglesia, se tiene que las tres naves son formadas por pilares de albañilería mientras que los arcos están formados por elementos de madera, dado que este último material tiene una rigidez menor que la de los pilares, se analizará que la respuesta transversal de la nave corresponde al volteo de cada pilar de manera independiente. Como se muestra en el siguiente esquema.

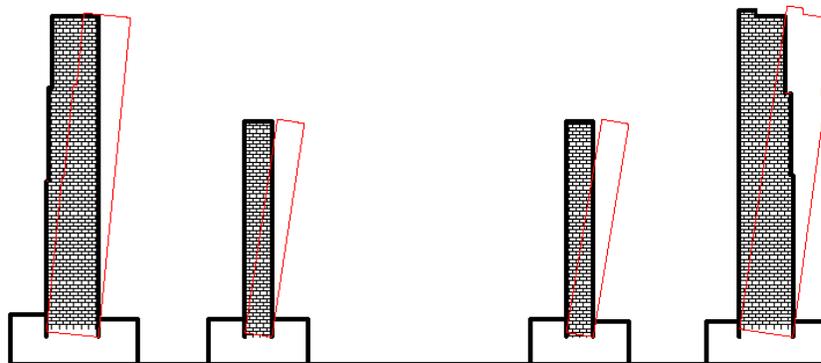


Figura 5-35 esquema mecanismo de la respuesta de la sección transversal de la nave

Se considera el peso del muro de la descarga a través de los arcos del techo.

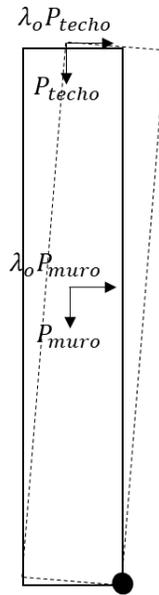


Figura 5-36 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo de pilares en sección transversal.

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_o P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_o P_{pilar} \cdot Y_{pilar}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{pilar} \cdot X_{pilar}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{pilar} \cdot X_{pilar}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{pilar} \cdot Y_{pilar}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	21	0.45	6.4
Pilar	9	0.45	3.2

$$\lambda_o = 0.08$$

$$M^* = 30 \text{ [ton]}$$

$$\alpha_o = 0.07 \text{ [g]}$$

5.3.4. Mecanismo en Sección Longitudinal de la Nave

5.3.4.1. Respuesta de la sección longitudinal

Dadas las mismas condiciones que para la sección transversal, la respuesta de la sección longitudinal corresponde al volteo de cada pilar de manera independiente.

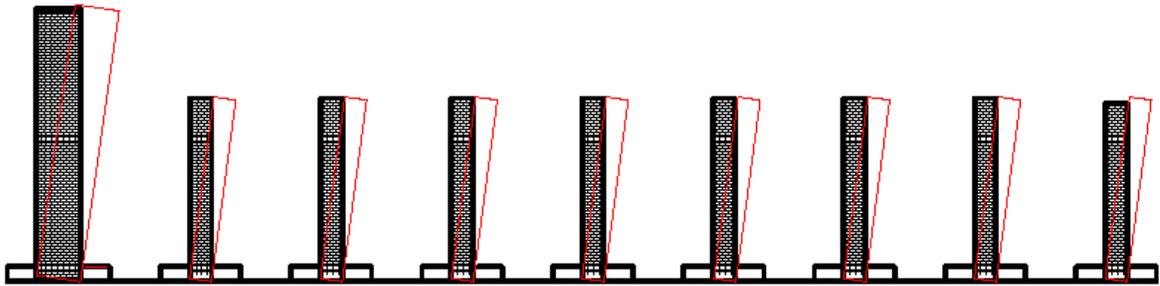


Figura 5-37 esquema mecanismo de la respuesta de la sección transversal de la nave

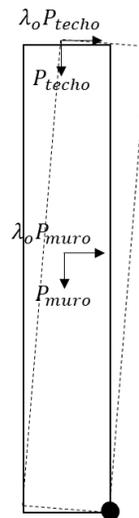


Figura 5-38 Esquema de fuerzas involucradas en equilibrio límite volteo de pilares en sección longitudinal.

Momento Volcante:

$$M_v = \lambda_0 P_{techo} \cdot Y_{techo} + \lambda_0 P_{pilar} \cdot Y_{pilar}$$

Momento estabilizador:

$$M_e = P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{pilar} \cdot X_{pilar}$$

Del equilibrio en estado límite se obtiene que

$$\lambda_o = \frac{P_{techo} \cdot X_{techo} + P_{pilar} \cdot X_{pilar}}{P_{techo} \cdot Y_{techo} + P_{pilar} \cdot Y_{pilar}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]	Y [m]
Techo	21	0.45	6.4
Pilar	9	0.45	3.2

$$\lambda_o = 0.08$$

$$M^* = 30 \text{ [ton]}$$

$$\alpha_o = 0.07 \text{ [g]}$$

5.3.5. Mecanismos en Fachada lateral longitudinal

5.3.5.1. Corte en muros laterales

Otra falla esperable en este tipo de estructuras es el mecanismo producto del esfuerzo de corte en los muros laterales, en este caso se considera que dada la estructuración de la iglesia en que los muros laterales están conformados por pilares de grandes dimensiones que hacen la función de contrafuertes, el corte en este muro se estima será entre pilares como se ilustra en la siguiente figura.

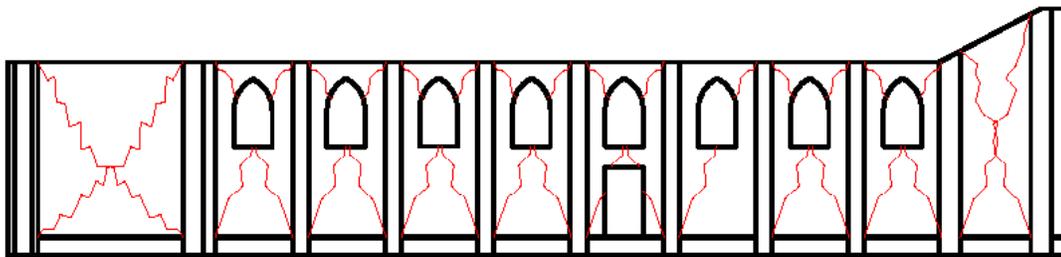


Figura 5-39 Esquema falla de corte en muros laterales

Como se mencionó anteriormente, la resistencia al corte de cada sección está dada por:

$$F_{corte} = b \cdot e \cdot f_v$$

Por lo tanto, el multiplicador de colapso será:

$$\lambda_o = \frac{F_{corte}}{P_{techo} + P_{muro} - \sum P_{agujeros}}$$

Elemento	Pesos [tonf]	X [m]
Techo	8	2.25
Muro	81	2.25
Ventana	14	2.25
F _{corte}	45	-

$$\lambda_o = 0.60$$

$$M^* = 67 [ton]$$

$$\alpha_o = 0.53 [g]$$

5.3.6. Discusión de los resultados de la aplicación de LV2

Al evaluar cada mecanismo, se obtiene la aceleración de colapso de este, notando cuales son los más vulnerables ante la acción sísmica. Esto mediante el cálculo del factor de aceleración que muestra la vulnerabilidad sísmica con respecto a la aceleración esperada en el sitio de estudio (aceleraciones a_{SLD} y a_{SLV} calculadas en LV1 y amplificadas por el factor S que considera factores topográficos y de suelo), de manera identificar cuáles son los mecanismos que requieren algún tipo de intervención, estos resultados se muestran en la siguiente tabla resumen.

Tabla 5-19 Resumen de los resultados de la aplicación el nivel LV2 a iglesia Doce Apóstoles

Mecanismos		λ_o	α_o	Fa _{SLD}	Fa _{SLV}
M1	Volteo en fachada	0.39	0.31	0.82	0.42
M2	Volteo en fachada Conexión a Muros Laterales	0.42	0.28	0.75	0.38
M3	Derrumbe en parte superior de la fachada	0.50	0.39	1.05	0.54
M4	Volteo Lateral en la fachada	1.44	1.10	2.95	1.52
M5	Volteo en la Fachada con desconexión	0.86	0.58	1.56	0.80
M6	Corte en La Fachada	0.31	0.24	0.64	0.33
M7	Respuesta de la Sección Transversal	0.08	0.07	0.18	0.09
M8	Respuesta de la Sección Longitudinal	0.08	0.07	0.18	0.09
M9	Corte en muros Laterales	0.56	0.53	1.41	0.73

Adicionalmente, se presentan los resultados de manera gráfica en donde se observa cuáles son los mecanismos de colapso que presentan una mayor vulnerabilidad sísmica y se comparan con las aceleraciones esperadas, así se puede ver cuáles son los mecanismos que se llegarían a activar ante la acción sísmica.

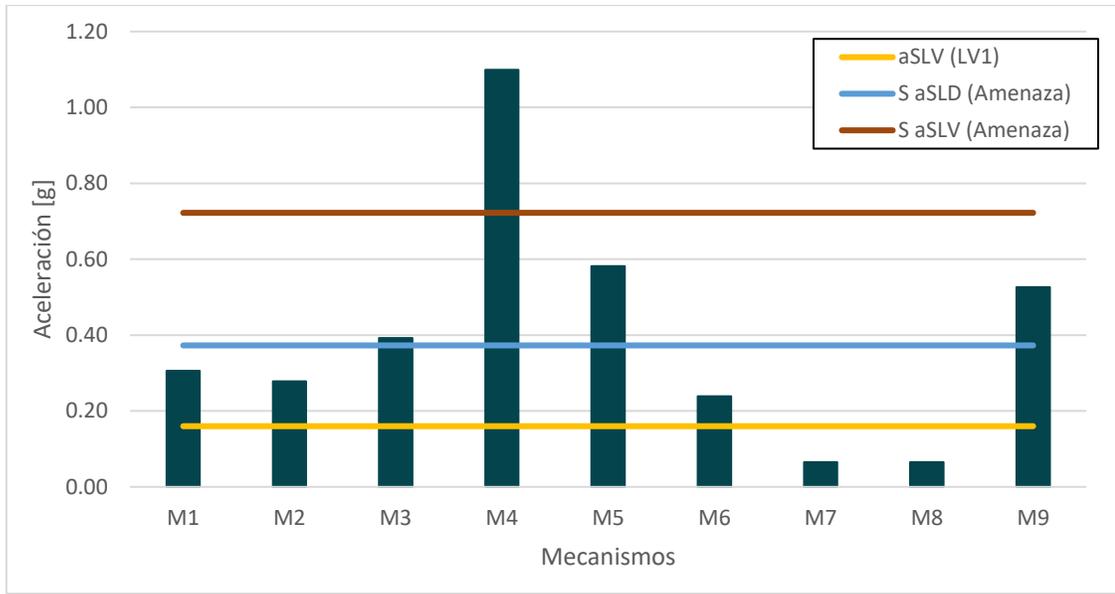


Figura 5-40 Gráfico comparativo de aceleraciones de colapso de cada mecanismo estudiado.

De la figura anterior es posible ver que la aceleración dada por el nivel LV1 se asemeja a un “promedio” de las aceleraciones de colapso de cada mecanismo individual, si bien esto no es así, este resultado marca el enfoque de cada nivel de evaluación en donde para el nivel LV1 se tiene una única aceleración de la estructura global mientras que en el LV2 se obtiene la aceleración específica para la activación del mecanismo particular.

Los mecanismos de volteo junto con el corte en la fachada son los más vulnerables (M1, M2, M6, M7 y M8) y están por debajo de las aceleraciones esperadas en el sitio para un estado límite de daño (SLD). En cuanto a la condición límite de colapso (SLV) a excepción del mecanismo M4, todos los mecanismos de la estructura son vulnerables, resultado que se condice con visto para el nivel LV1. Por su parte, el mecanismo de volteo lateral de la facha de manera íntegra, tiene un factor de aceleración $F_a = 1.52$ (para el caso SLV) lo que significa que es un mecanismo que no tendría problemas de ocurrencia en esta estructura.

El análisis de cada mecanismo de colapso tiene asociado una serie de suposiciones que conducen al resultado obtenido, ya sea en las consideraciones de las fuerzas involucradas o en la estimación del valor mismo de estas. Por lo tanto, los resultados aquí obtenidos representan una configuración del juicio de quien hizo la evaluación que tiene que ver con el nivel conocimiento de la estructura y la proyección de posible activación de mecanismo de colapso.

Un ejercicio interesante es comparar los resultados obtenidos con los antecedentes que se tiene de la iglesia estudiada: En la Figura 5-41 se muestra la aceleración basal registrada en terremoto del 27 de febrero de 2010 por acelerogramas instalados justamente en la iglesia Doce Apóstoles. Esta aceleración está por encima de la aceleración de colapso global de la estructura calculada en el nivel LV1, pero por debajo de la aceleración máxima esperada en el sitio.

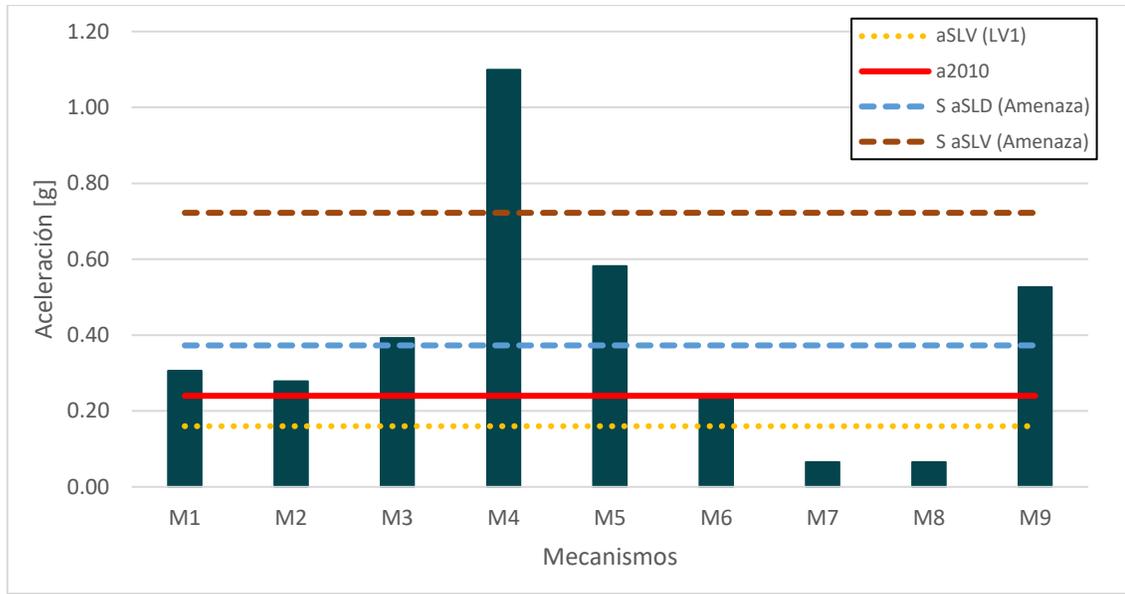


Figura 5-41 Aceleraciones de colapso de cada mecanismo con aceleración registrada en El Almendral en terremoto 27-febrero-2010.

Del gráfico se puede observar que con la aceleración registrada se activarían los mecanismos M6, M7 y M8, que corresponden al corte en la fachada y la respuesta de la sección transversal y longitudinal de la nave.

Estos resultados se condicen con lo sucedido en la iglesia para el dicho terremoto. En un informe de anteproyecto de restauración de la iglesia, se menciona que los daños estructurales del edificio se aprecian en los pilares interiores y la fachada. Como se calculó, los pilares de albañilería sufren por resistir los esfuerzos de tracción y momento de manera independiente, mientras que en la fachada se observan varias grietas de corte que atraviesan por completo el espesor del muro.

En estos casos, para mejorar la respuesta de estos macroelementos, se podría disponer de mallas de acero en la fachada que contribuyan al corte y en los pilares enfierradura vertical de manera de mejorar la respuesta a la tracción. Estas acciones y otras que se dispusieran para mejorar las respuestas de cada mecanismo, claramente aumentarían el valor de aceleración de colapso disminuyendo su vulnerabilidad. Precisamente esto es el objetivo del nivel de evaluación LV2, ya que este nivel apunta a la planificación de intervenciones locales en la estructura, identificando los mecanismos vulnerables, para luego diseñar intervenciones que reduzcan dicha vulnerabilidad.

Finalmente, más allá de los resultados obtenidos de este análisis, el mayor objetivo de este trabajo en este nivel, corresponde a la presentación de una metodología para la planificación de intervenciones de sub partes de la estructura, en donde se estudia el estado actual del macroelemento y la posible incorporación de dispositivos resistente que disminuyan la aceleración de colapso y por ende su vulnerabilidad sísmica.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Al finalizar la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de cinco iglesias en la ciudad de Valparaíso, con los niveles LV0, LV1 y LV2 se tienen las siguientes conclusiones.

El nivel denominado LV0 es una buena herramienta desde el punto de vista de la categorización del estado de las construcciones patrimoniales. No requiere mayores análisis cuantitativos en el ámbito de la ingeniería, ya que se basa en la observación de parámetros. Su mayor ventaja es la rápida aplicación, siendo de utilidad para un estudio de carácter territorial de manera de contar con una evaluación primaria de un conjunto de estructuras patrimoniales.

Si bien el nivel LV0 podría considerarse un punto de entrada en el estudio de las estructuras patrimoniales, este análisis de primer orden, es abordado en la normativa italiana mediante el nivel LV1, que al igual que LV0 calcula un índice de vulnerabilidad de la estructura basado en la observación del edificio con un carácter cualitativo. Sin embargo, el análisis en el nivel LV1 requiere de mayores detalles estructurales, ya que reconoce los macroelementos característicos de la estructura y sus respectivos mecanismos de colapso, asignándoles valores numéricos acorde a su configuración.

Ambos índices de vulnerabilidad categorizan de manera similar las iglesias estudiadas con respecto a cuál es más o menos vulnerable, aun cuando ambas abordan el problema de manera distinta. La mayor diferencia que se puede encontrar entre ambas es que el nivel LV0 da mayor peso en la suma al estado actual de la construcción mientras que por su parte en nivel LV1 estudia con más detalles las características propias de la configuración estructural de la iglesia.

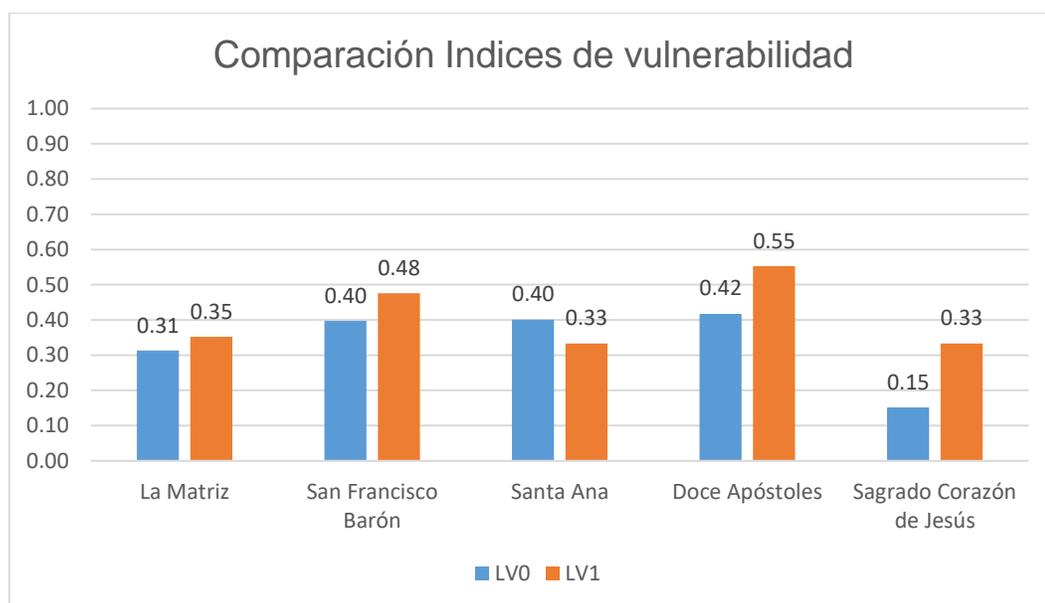


Figura 6-1 Comparación de Índices de Vulnerabilidad: LV0 y LV1

El índice de vulnerabilidad es un parámetro que por sí sólo no entrega toda la información con respecto a la seguridad del edificio estudiado. La vulnerabilidad sísmica está ligada a la exposición sísmica que tenga el edificio. En ese sentido el nivel LV0 no considera

alguna amenaza sísmica en particular, como sí lo hace en nivel LV1 en donde la amenaza es considerada en términos de aceleración máxima de suelo.

La amenaza sísmica está condicionada por varios factores como la ubicación geográfica, el tipo de suelo de fundación, condiciones topográficas, etc. Por lo tanto, que dos iglesias tengan un mismo índice de vulnerabilidad no necesariamente serán igual de vulnerables ya que esto dependerá de la amenaza sísmica a la que están expuestas.

Tanto la zonificación normativa (NCh433) como la utilizada en este trabajo de título (Núñez, 2014), posicionan toda la ciudad de Valparaíso en una misma zona, es decir expuesta a las mismas aceleraciones basales. Por lo tanto, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las cinco iglesias es directamente proporcional al índice de vulnerabilidad de cada una. Esto condicionado además porque salvo la iglesia Doce Apóstoles, se consideró el mismo tipo de suelo y condiciones topográficas para las iglesias.

Es posible aplicar el cálculo del índice de vulnerabilidad del LV1 en iglesias chilenas, aun cuando estas no presentan muchos de los mecanismos incluidos, debido a que en general son construcciones mucho más simples y con menos elementos. Sin embargo, esto no es un problema ya que la evaluación de los 28 macroelementos propuestos en el nivel LV1, es una generalización de muchas tipologías y técnicas constructivas históricas de iglesias italianas y se puede evaluar la estructura quitando macroelementos.

Lo que no es aplicable directamente en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del patrimonio chileno, es la estimación de la amenaza sísmica según los lineamientos italianos. En primer lugar, no existe una microzonificación sísmica normativa del país (detallada al nivel italiano o similar) que unifique criterios de comparación, dificultando la posibilidad de comprar territorialmente el patrimonio construido. Además, no presenta proyecciones para distintos periodos de retorno de las aceleraciones esperadas, (como si lo tiene la norma italiana) para estimar los factores de aceleración e índice de seguridad.

Y, por otra parte, aun cuando en este trabajo de título se utilizó información de zonificación sísmica que pudo ser adaptada a lo requerido en la metodología italiana. Los valores que se obtuvieron no se condicen con lo observado en la realidad de las iglesias estudiadas. Esto quiere decir que las aceleraciones calculadas que causarían daño y/o colapso en las cinco iglesias de Valparaíso según la norma italiana, son mucho menores al resultado de las aceleraciones basales esperadas en el sitio, dando como resultado una vulnerabilidad muy alta, y estimando el colapso inminente de las estructuras, caso que no se condice con lo observado y con la historia de las cinco iglesias de Valparaíso. Por lo tanto, para poder aplicar de manera completa la metodología italiana presentada, se requeriría de un estudio de calibración de aceleraciones que entregue valores correspondientes a la realizada chilena.

La metodología utilizada en este trabajo de título se presenta como una herramienta útil en el estudio a escala territorial de la vulnerabilidad sísmica del patrimonio histórico construido en Chile, de manera de evaluar el estado y condiciones estructurales de este

tipo de construcciones y así generar un catálogo de cuales de estos edificios requieren mayor atención a la hora de elaborar un proyecto conservación del patrimonio histórico construido, siendo además, la primera iteración para un posterior análisis estructural acabado de alguna construcción patrimonial específica.

El nivel LV2 aplicado en la iglesia Doce Apóstoles, estudia el comportamiento de macroelementos de una manera relativamente sencilla, ya que no requiere de grandes gastos computacionales ni modelos complejos. Entrega una vulnerabilidad ante la aceleración de suelo esperada, indicando si es posible la activación de los respectivos mecanismos de colapso. La aplicación de este nivel implica, conocer el comportamiento de un macroelemento en particular del edificio a diferencia de nivel anterior (LV1), en donde se compara un comportamiento global promedio. Esta metodología es útil al momento de diseñar intervención de alguna de las partes de la estructura, ya que evalúa en términos de la fuerza involucrada, la efectividad de la inclusión de dispositivos resistentes que aporten en la reducción de la vulnerabilidad sísmica.

Si bien el procedimiento de cálculo utilizado en este trabajo corresponde al más sencillo y rústico de los considerados en la normativa italiana en el nivel LV2, los resultados obtenidos fueron eficaces en cuanto a la descripción del comportamiento de la estructura en un evento pasado como fue el terremoto del 27 de febrero de 2010. Por lo tanto, se concluye que es una herramienta que puede ser utilizada para evaluar el estado estructural de iglesias patrimoniales en Chile, identificando los mecanismos de colapso y evaluar posibles intervenciones locales en la estructura.

En general, en este trabajo de título se presentó metodologías de evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural, que pueden ser aplicadas tanto a nivel territorial a un conjunto de edificios patrimoniales (LV0 y LV1) como a una estructura en particular en donde se puede estudiar de manera local cada uno de sus macroelementos (LV2). Así estas metodologías pueden ser utilizadas para evaluar el estado de las construcciones patrimoniales en Chile siendo una alternativa a las limitadas formas de estudiar este tipo de estructuras que se utilizan hoy en día.

Sin embargo, para realizar lo anterior de manera óptima, es necesario ajustar estas metodologías en cuanto a la amenaza sísmica chilena. En este trabajo se evidencio la necesidad de contar con una microzonificación sísmica (para aplicar estas metodologías) que entregue las aceleraciones esperadas a lo largo del territorio nacional y que se correlacionen con las aceleraciones de colapso de estructuras chilenas, de manera contar con información unificada y normativa para la evaluación de las estructuras.

CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA

- Asociación colombiana de ingeniería sísmica. (2005). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada: técnicas constructivas tradicionales*. Colombia: Asociación colombiana de ingeniería sísmica - AIS.
- Boroscheck, R., Soto, P., & León, R. (2010). *Registros del terremoto del maule Mw=8.8 27 de febrero de 2010*. Informe RENADIC 10/05 Rev.2, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Bustos, O. (1974). *Iglesia del Sagrado Corazón de Jesús*. Universidad de Chile - Sede Valparaíso, Departamento de arquitectura y urbanismo . Valparaíso: Seminario de historia de la arquitectura.
- Canales, J. C., & Perreta, C. (1988). *Estudios de los efectos del sismo del 3 de marzo de 1985 en la comuna de Valparaíso*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Carvajal, A. (1989). *Estudio comparativo de los terremotos de Valparaíso de 1906 y 3 de marzo de 1985*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- CChC. (enero de 2017). Hacia un gestión sustentable del patrimonio arquitectónico en Chile. *FUNDAMENTA*(43).
- CEPAL. (2010). *Terremoto en Chile, una primera mirada al 10 de marzo de 2010*. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- Contreras, S., Bahamondez, M., Hurtado, M., Vargas, J., & Jorquera, N. (2011). La arquitectura en tierra frente al sismo: conclusiones y reflexiones tras el sismo en Chile del 27 de febrero de 2010. *Conserva*(16), 39-54.
- D'Amato, M., Gigliotti, R., & Laguardia, R. (2019). Comparative seismic assessment of ancient masonry churches. *Frontiers in built environment*, 5(56).
- Díaz, D. (2016). *Diseño de herramientas de evaluación del riesgo para la conservación del patrimonio cultural inmueble: Aplicación en dos casos de estudio del norte andino chileno*. Ciudad de México.
- Grimme, K., & Alvarez, L. (1964). *El suelo de fundación de Valparaíso y Viña del Mar. Provincia de Valparaíso. Geología del área Valparaíso-Viña del Mar*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Guerrero, L. (2007). Arquitectura en tierra, hacia la recuperación de una cultura constructiva. *Apuntes*, 20(2), 182-201.
- GUIXE Arquitectos. (2017). *Proyecto de restauración parroquia de los XII Apóstoles*. Informe de Arquitectura, Ilustre municipalidad de Valparaíso, Valparaíso.

- I. Municipalidad de Valparaíso. (2001). *Postulación de Valparaíso como sitio del patrimonio mundial/UNESCO*. Valparaíso.
- Indirli, M. (Abril de 2010). Protección del Patrimonio en Valparaíso (Chile): Proyecto "MAR VASTO". *Ingeniería de la Construcción*, 25(1), 21-62.
- INN. (2013). *Norma chilena NCh3332:2013 - Estructuras- Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda. Requisitos del Proyecto Estructural*. Santiago: Instituto Nacional de Normalización.
- Jorquera, N. (2010). Los daños al patrimonio construido en tierra luego del terremoto de Chile 2010. Mitos y verdades del comportamiento de las estructuras de tierra. *Construcción con tierra: Tecnología y Arquitectura. Congreso de Arquitectura de tierra en cuenca de Campos 2010/2011*, (págs. 121-130). Valladolid.
- Jorquera, R. (2014). *Catálogo de terremotos subductivos chilenos para la generación de curvas de fragilidad*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Lagomarsino, S., & Podestà, S. (2004). *Proyecto SAVE – Tarea 3 – Inventario e vulnerabilità del patrimonio monumentale dell'Italia centro-meridionale* (Vol. III). Genova, Italia: GNDT.
- Laterza, M., D'Amato, M., Diaz, D., & Chietera, M. (2017). *Seismic analysis methods of ancient masonry churches in Matera*.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. (julio de 2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), 455-472.
- Macias, C. (2016). *Políticas públicas de infraestructura patrimonial en Chile: el caso del terremoto del 27/F en la sexta región*. Tesis de magister, Universidad de Chile, Santiago.
- Madariaga, R. (1998). Sísmicidad de Chile. *Física de la tierra*(10), 221-258.
- Meli, R. (1991). Diseño sísmico de edificios de muros de mampostería; la práctica actual y el comportamiento observado. *Memoria Simposium Internacional Seguridad Sísmica en la Vivienda Económica*, (págs. 398-423). México D.F. México.
- MiBACT. (26 de Febrero de 2011). Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale – allineamento alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. *Diario oficial de la Repubblica italiana*, n. 47.
- MINVU. (2013). *Proyecto de intervención estructural de construcciones de tierra*. Santiago: Ministerio de vivienda y urbanismo.
- MIT. (2008). Norme Tecniche per le Costruzioni. (D.M.) *Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008*. Italia.

- Monge, J., & Astroza, M. (1989). Metodología para determinar el grado de intensidad a partir de los daños. *5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, VOL. 1, págs. 483-492. Santiago de Chile.
- MOP. (2001). *Inventario del patrimonio cultural inmueble*. Dirección de Arquitectura, Chile.
- Núñez, I. (2014). *Nuevo peligro sísmico para Chile*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Pareja, F. (2011). *Aplicación del índice de vulnerabilidad GNDT para edificaciones patrimoniales en iglesia Santa Ana, Valparaíso, Chile*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Romanelli, F. (2008). *Earthquake hazard in the city of Valparaíso*. Proyecto MAR VASTO.
- Rosenman, I., & Gutierrez, J. P. (2011). Proyecto restauración de la iglesia San Francisco del Barón. *arq.urb*, 163-195.
- Sánchez, M. I. (2013). *Vulnerabilidad Sísmica de construcciones patrimoniales históricas de mampostería en Chile: Aplicación a los torreones españoles de Valdivia*. Tesis Pregrado, Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Sturm, T. (2008). *Valparaíso: Su patrimonio histórico y los sismos*. Tesis de pregrado, Universidad De Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- UNESCO. (1972). Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural.
- UNESCO. (2014). *Manual de Gestión de Riesgo de Desastres*.
- UNISDR. (2009). *Terminología sobre la Reducción del Riesgo de Desastres*.
- Vargas, L. (1998). *Refuerzo estructural de la iglesia San Francisco del cerro Barón de Valparaíso por medio de barras de acero tensadas*. Santiago de Chile : Universidad de Chile.
- Verdugo, A. (1995). *Estudio geofísico de los suelos de fundación para una zonificación sísmica de Valparaíso y Viña del Mar*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile.
- Yamín, L., Philips, C., Reyes, J. C., & Ruiz, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes*, 20(2), 286-303.

ANEXO A FICHAS DE EVALUACIÓN

A.1. FICHA DE EVALUACIÓN LV0

Vulnerabilidad por la posición del edificio

A.1.1. Posición del edificio y cimentaciones

Clase A:

- Edificios sobre roca con pendiente p inferior o hasta 10%.
- Edificios sobre terreno suelto no sometido a empujes, con pendiente menor o igual a 10%, y plano de apoyo de cimientos a una altura única.

Clase B:

- Edificios sobre roca con pendiente entre $10\% < p \leq 30\%$.
- Edificios sobre terreno suelto con una diferencia entre el nivel de cimentaciones no superior a un metro, y en ausencia de empujes no equilibrados causados por los terraplenes, y que además presenten una de las siguientes condiciones:
 - Terreno con pendiente $p \leq 10\%$, pero con una diferencia entre los niveles de cimentación distinta de cero.
 - Edificios con cimientos en un terreno con pendiente entre $10\% < p \leq 30\%$.
 - Edificios sin cimientos y en un terreno con pendiente entre $10\% < p \leq 20\%$.

Clase C:

- Edificios sobre roca con pendiente entre $30\% < p \leq 50\%$.
- Edificios sobre terreno suelto con una diferencia entre los niveles de cimentación no superior a un metro, que además presenten una de las siguientes condiciones:
 - Sin empujes causados por terraplenes, el edificio tiene cimientos y el terreno tiene una pendiente entre $30\% < p \leq 50\%$.
 - Sin empujes causados por terraplenes, el edificio no tiene cimientos y el terreno tiene una pendiente entre $20\% < p \leq 30\%$.
 - Con empujes no equilibrados causados por terraplenes, el edificio tiene cimientos y el terreno tiene una pendiente $p \leq 50\%$.
 - Con empujes no equilibrados causados por terraplenes, el edificio no tiene cimientos y el terreno tiene una pendiente $p \leq 30\%$.

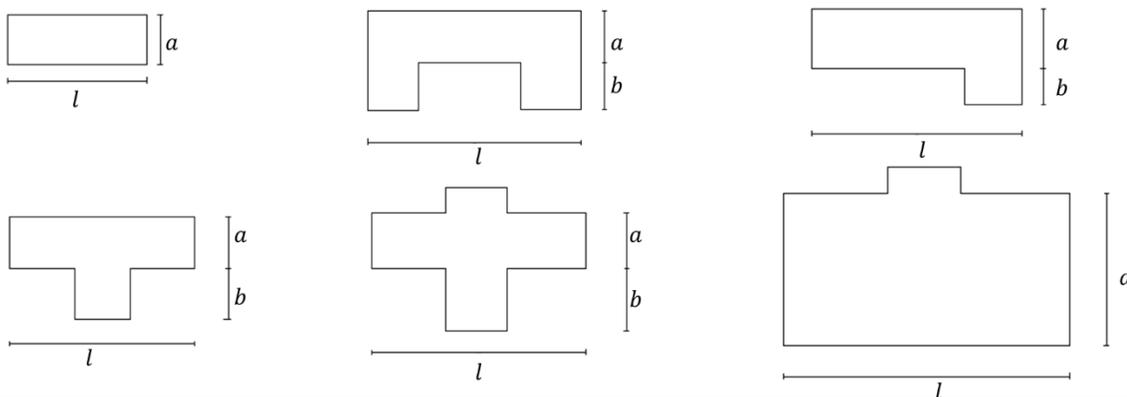
Clase D:

- Edificios sobre terreno suelto o roca con pendiente $p > 50\%$.
- Edificios sobre terreno suelto con una diferencia entre niveles de cimentación superior a un metro.
- Edificios sin cimientos, emplazados sobre terreno suelto con pendiente $p > 30\%$.

Vulnerabilidad inherente a su estructura

Vulnerabilidad por su conformación o geometría

A.1.2. Configuración planimétrica



$$\beta_1 = \frac{a}{l} \cdot 100$$

$$\beta_2 = \frac{b}{l} \cdot 100$$

- Clase A: $\beta_1 \geq 80$; $\beta_2 \leq 10$
 Clase B: $60 \leq \beta_1 < 80$; $10 < \beta_2 \leq 20$
 Clase C: $40 \leq \beta_1 < 60$; $20 < \beta_2 \leq 30$
 Clase D: $\beta_1 < 40$; $30 < \beta_2$

A.1.3. Configuración en Elevación

Clase A:

- Edificios con distribuciones de masa o de elementos resistentes prácticamente uniformes en toda la altura.
- Edificios con masa y elementos resistentes decrecientes con continuidad.
- Edificios que presentan una reducción inferior a 10% del área de la planta.

Clase B:

- Edificios con arcadas, pórticos y balcones de dimensiones menores, afectando menos de 10% del área total del piso.
- Edificios que presentan una reducción del área de planta mayor de 10% e inferior o igual a 20%.
- Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 10% de la altura total del edificio.

Clase C:

- Edificios con pórticos o balcones que afectan una superficie mayor a 10% e inferior o igual a 20% del área total del piso.
- Edificios que presentan una reducción del área de planta mayor a 20%.
- Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 10% e inferior o igual a 40% de la altura total del edificio.

Clase D:

- Edificios con pórticos o balcones que afectan una superficie mayor a 20% del área total del piso.
- Edificios con torres u otros elementos verticales de una altura superior a 40% de la altura total del edificio.

A.1.4. Distancia entre los muros

Clase A:

- Edificios que presentan las siguientes relaciones geométricas:
 - La esbeltez de los muros no debe ser mayor que 8. El espesor mínimo de muros está determinado implícitamente por la esbeltez máxima.
 - Los vanos no deben tener un ancho mayor que 2.5 veces el espesor del muro.
 - Los vanos de ventanas y puertas se deben ubicar a una distancia no menor que tres veces el espesor del muro, desde el borde libre más próximo.
 - La longitud entre ejes de arriostramientos transversales de un muro debe ser menor a seis veces el espesor del muro.
 - La verticalidad relativa de un muro no debe ser mayor a 10% de su altura.

Clase B:

- Edificios que no presentan alguna de las relaciones geométricas descritas anteriormente.

Clase C:

- Edificios que presentan sólo tres de las relaciones geométricas descritas anteriormente.

Clase D:

- Edificios que presentan sólo dos de las relaciones geométricas descritas anteriormente.

A.1.5. Elementos no estructurales

Clase A y B:

- Edificios sin accesorios, salientes o voladizos.
- Edificios con accesorios bien unidos a los muros, con chimeneas de pequeñas dimensiones y de peso moderado, y con antetechos bien afirmados.
- Edificios con balcones que constituyan una parte integrante de la estructura horizontal.

Clase C:

- Edificios con accesorios externos o insignias de pequeñas dimensiones mal conectados a los muros, y con antetechos pequeños mal afirmados, o de grandes dimensiones bien afirmados.

Clase D:

- Edificios que presentan chimeneas u otros salientes en la cubierta mal conectados a la estructura, antetechos de mala ejecución, aleros inseguros y mal afirmados, u otros elementos de peso significativo que puedan colapsarse en caso de terremoto.
- Edificios con balcones u otros voladizos (instalaciones, etc.) agregados en un periodo posterior a la construcción del edificio, razón por la cual están mal vinculados a la estructura.
- Edificios con antetechos de grandes dimensiones que presentan:
 - Notable fragilidad.
 - Peso notable, y mala conexión con los muros.

Vulnerabilidad por su construcción

A.1.6. Tipo y organización del sistema resistente

Clase A:

- Edificios existentes consolidados o reparados según los requisitos de la norma sísmica. Se determina en función de la eficacia obtenida con la intervención para garantizar el funcionamiento monolítico del edificio con materiales compatibles con los preexistentes.

Clase B:

- Edificios que presentan una buena traba entre los muros ortogonales y una buena conexión entre los muros y los entrepisos, mediante estructuras horizontales continuas ejecutadas con materiales propios de los sistemas constructivos originales, o compatibles en cuanto a resistencia y rigidez.

Clase C:

- Edificios que están constituidos por paredes ortogonales bien trabadas entre sí, pero que no tienen una adecuada conexión entre los muros y los entrepisos.
- Edificios constituidos por paredes ortogonales bien trabadas entre sí que presentan, en todos los niveles, conexiones entre muros y entrepisos con materiales distintos a los originales, y cuya eficacia no esté comprobada mediante ensayos de laboratorio o por la experiencia.
- Edificios de un piso constituidos por muros ortogonales que no están bien trabados entre ellos, pero que tienen una buena conexión entre los muros y el sistema de techumbre, mediante estructuras horizontales continuas ejecutadas con materiales originales, o compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

Clase D:

- Edificios con paredes ortogonales que no están bien trabadas entre ellas:
 - Con conexiones entre muros y entrepisos propios del sistema original o con materiales compatibles, pero ejecutadas de manera deficiente, es decir, sin cubrir toda la sección de los muros o con un funcionamiento deficiente por su estado de conservación.
 - Con conexiones entre muros y entrepisos con materiales distintos a los originales, o con materiales incompatibles en cuanto a resistencia y rigidez, y

cuya eficacia no esté comprobada mediante ensayos de laboratorio o por la experiencia.160

A.1.7. Calidad del sistema resistente

Clase A:

- Mampostería de piedra canteada constituida por elementos homogéneos bien labrados. Buen aparejo y mortero de buena calidad.
- Mampostería de toba o tufo volcánico¹⁶⁴ bien escuadrado y de baja porosidad. Buen aparejo de muros y con juntas de mortero horizontales y verticales. Mortero de buena calidad.
- Mampostería de ladrillo macizo. Buen aparejo y juntas de mortero horizontales y verticales. Mortero de buena calidad.
- Mampostería consolidada según la normativa sísmica vigente, con materiales compatibles a los preexistentes en cuanto a resistencia y rigidez (en el caso de intervenciones no ejecutadas según la norma, deberá considerarse la clase más parecida a la resistencia conseguida).
- Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm.

Clase B:

- Mampostería de piedra canteada con elementos no homogéneos, pero bien trabados en sentido longitudinal y transversal. Mortero de buena calidad.
- Mampostería de piedra labrada con hiladas de ladrillo macizo en todo el espesor del muro. Buen aparejo y mortero de buena calidad.
- Mampostería de toba volcánica bien escuadrada y de baja porosidad. Buen aparejo y con juntas de mortero horizontales y verticales. Mortero de calidad media.
- Adobe con todos los bloques trabados a soga, a tizón o con otras trabas derivadas de ellas, con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, pero con un espesor mayor a 1.5 cm.

Clase C:

- Mampostería de piedra toscamente escuadrada y con irregularidades. Aparejo y mortero de calidad media.
- Mampostería de piedra no escuadrada o de piedra de canto rodado, con hiladas de ladrillo. Aparejo y mortero de calidad media.
- Doble muro de mampostería mixta, con el paramento interior conformado por piedra en bruto, y el paramento externo en piedra escuadrada toscamente o en ladrillo. Aparejo y mortero de calidad media.
- Doble muro de mampostería de piedra o toba volcánica con núcleo de buena consistencia. Presencia abundante de conexiones idóneas entre los dos

paramentos con elementos transversales o hiladas de ladrillos. Mortero de calidad media.

- Mampostería de toba volcánica bien escuadrada y de porosidad media. Aparejo y mortero de calidad media.
- Mampostería de ladrillos macizos. Aparejo defectuoso (por ejemplo, con juntas de mortero de un espesor excesivo, etc.). Mortero de baja calidad.
- Adobe con deficiencias en el aparejo de los bloques, pero con un traslape de medio adobe entre los muros ortogonales. Las juntas entre los adobes, tanto horizontales como verticales, se fabrican con el mismo barro, con un espesor de 1 a 1.5 cm. La incorporación de ladrillos en algunas hiladas, en las esquinas o en los vanos no se considera una deficiencia del sistema constructivo.

Clase D:

- Mampostería de piedra no escuadrada o toba volcánica toscamente escuadrada de media o alta porosidad (por ejemplo, piedra de canto rodado, piedra de río, piedra toscamente labrada, elementos de toba volcánica con formas irregulares, etc.). Aparejo defectuoso y ausencia de hiladas continuas en todo el espesor del muro. Mortero de baja calidad debido al mal estado de conservación.
- Mampostería de piedra labrada con hiladas continuas de ladrillo macizo que cubren el espesor del muro. Aparejo de calidad media y mortero de baja calidad.
- Mampostería de ladrillo de baja calidad con inclusión de guijarros. Aparejo defectuoso y mortero de baja calidad.
- Doble muro de mampostería de piedra no escuadrada o toba volcánica muy porosa. Núcleo irregular o parcialmente vacío. Ausencia o escasa presencia de trabas transversales entre los dos paramentos. Mortero de baja calidad debido al mal estado de conservación.
- Adobe con deficiencias en el aparejo de los bloques y en el traslape entre los muros ortogonales. Mortero de lodo de baja calidad debido a su estado de conservación, o con morteros de cemento aplicados en intervenciones posteriores de rejunteo.

A.1.8. Estructuras horizontales (piso y entrepisos)

Clase A:

- Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo tradicional o ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, y siempre que cumplan tres condiciones:
 - a) Deformabilidad despreciable en el plano del entrepiso.
 - b) Conexiones eficientes entre la estructura horizontal y el muro.
 - c) Ausencia de divisiones en el entrepiso.

Clase B:

- Edificios con estructuras horizontales como las anteriores, pero que no cumplen con la condición c).

Clase C:

- Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo tradicional o ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, dotadas

de una deformabilidad significativa en el plano, aunque bien conectadas a los muros.

Clase D:

- Edificios con estructuras horizontales propias del sistema constructivo tradicional o ejecutadas con materiales compatibles en cuanto a resistencia y rigidez, mal conectadas a los muros. - Edificios con estructuras horizontales ejecutadas con materiales distintos a los originales y cuya compatibilidad no haya sido verificada mediante ensayos de laboratorio o mediante la experiencia, o ejecutadas con materiales incompatibles.
- Edificios con estructuras horizontales construidas con materiales compatibles en una época posterior al origen del edificio, pero que hayan agregado un peso importante a una mampostería de baja calidad en términos de resistencia y rigidez.

A.1.9. Cubierta

Clase A:

- Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

Clase B:

- Edificios con una cubierta que no provoca empujes, pero sin una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.
- Edificios con una cubierta que no provoca empujes, provista de una estructura horizontal de coronamiento de los muros que no conecta de manera eficiente la cubierta a los muros (por falta de continuidad, por su estado de conservación, porque no cubre toda la sección del muro, por su ejecución con materiales incompatibles, etc.).
- Edificio con una cubierta que causa empujes moderados, provista de una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

Clase C:

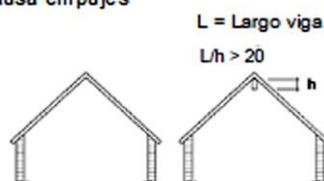
- Edificio con una cubierta que causa empujes moderados, sin una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.
- Edificio con una cubierta que causa empujes moderados, provista de una estructura horizontal de coronamiento de los muros que no conecta de manera eficiente la cubierta a los muros (por falta de continuidad, por su estado de conservación, porque no cubre toda la sección del muro, por su ejecución con materiales incompatibles, etc.).

- Edificio con una cubierta que causa empujes, pero provista de una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

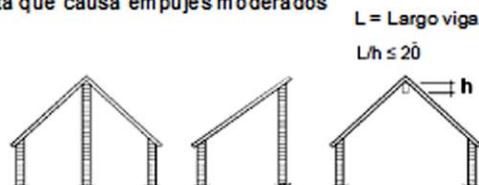
Clase D:

- Edificio con una cubierta que causa empujes, sin una estructura horizontal continua de coronamiento de los muros, ejecutada con materiales propios de la estructura original del edificio o con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.
- Edificio con una cubierta que causa empujes, provista de una estructura horizontal de coronamiento de los muros que no conecta de manera adecuada la cubierta a los muros (por falta de continuidad, por su estado de conservación, porque no cubre toda la sección del muro, por su ejecución con materiales incompatibles, etc.).
- Edificios que presentan una cubierta con una carga permanente notable (por alteraciones posteriores del edificio), apoyada en estructuras horizontales incompatibles o cuya compatibilidad no haya sido demostrada mediante ensayos de laboratorio o por la experiencia.

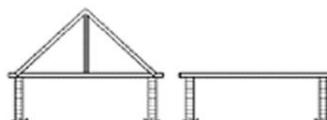
Cubierta que causa empujes



Cubierta que causa empujes moderados



Cubierta que no causa empujes



Vulnerabilidad por su estado de conservación

A.1.10. Estado de conservación

Clase A:

- Mampostería o adobe en buen estado, sin lesiones visibles.

Clase B:

- Edificios que presentan daños superficiales no generalizados, con excepción de los casos en los cuales se hayan producido por terremotos.

Clase C:

- Edificios con daños moderados (amplitud de la lesión: 2-3 mm) o superficiales originados por sismo.
- Edificios que si bien no tienen daños, presentan un estado de conservación de la mampostería que provoca una menor resistencia.

Clase D:

- Edificios que presentan muros fuera de plomo y/o daños graves aunque no sean generalizados.
- Edificios con un grave deterioro de sus materiales.
- Edificios que aun cuando no tienen daños, presentan un estado de conservación de la mampostería que determina una menor resistencia, como por ejemplo, morteros disgregados.

A.1.11. Alteraciones en el entorno

- Accesibilidad: en caso de desastre o siniestro, el edificio no cuenta con una red de caminos y/o infraestructuras necesarias (sí-no).
- Uso / abandono: el edificio se encuentra en un contexto de abandono (sí-no).
- Densidad demográfica: el edificio se encuentra en una zona densamente poblada (sí-no).
- Aislamiento: el edificio se encuentra fuera de una zona habitada, o a una distancia considerable con respecto a otro centro poblado (sí-no).
- Relación con el contexto geográfico: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno geográfico (sí-no).
- Relación con el contexto construido: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno construido (sí-no).
- Relación con la comunidad: el edificio se encuentra en una situación de conflicto con respecto a su entorno social (sí-no).
- Desinterés: tanto el entorno físico como social mantienen una relación de desinterés con respecto al bien inmueble (sí-no).

Clase A:

- Edificios que no presenten ninguna de estas condiciones.

Clase B:

- Edificios que cuenten con hasta tres de estas condiciones.

Clase C:

- Edificios que cuenten con hasta seis de estas condiciones.

Clase D:

- Edificios que cuenten con más de seis de estas condiciones.

A.1.12. Alteraciones negativas del sistema constructivo

Clase A:

- Edificio sin modificaciones en su sistema constructivo.
- Edificio con modificaciones en el sistema constructivo con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez, realizadas mediante una intervención reversible.

Clase B:

- Edificio con modificaciones en el sistema constructivo con materiales compatibles en cuanto a su resistencia y rigidez, pero no reversibles.

Clase C:

- Edificio con modificaciones en el sistema constructivo realizadas con materiales compatibles que hayan modificado la distribución de cargas del edificio.

Clase D:

- Edificio con modificaciones en el sistema constructivo realizadas con materiales incompatibles en cuanto a su resistencia y rigidez.

A.1.13. Vulnerabilidad al fuego

- Presencia de ornamentos y muebles inflamables.
- Acumulación de polvo, suciedad y basura en cubiertas o bodegas.
- Muros, pisos y puertas con resistencia deficiente al fuego.
- Falta de compartimentación y divisiones interiores. Escaleras abiertas.
- Medios de escape inadecuados a través de puertas, pasillos o escaleras.
- Falta de llaves maestras, cerraduras obsoletas.
- Instalaciones eléctricas defectuosas.
- Chimeneas defectuosas con acumulación de hollín y grasa.
- Bajo estándar de administración y servicio de limpieza.
- Fracaso en el contacto con bomberos y en la organización de simulacros de incendio.
- Peligro derivado de incendios provocados por fumar o por operaciones en la cocina.

Clase A:

- Edificios que no presenten ninguna de estas condiciones.

Clase B:

- Edificios que cuenten con hasta tres de estas condiciones.

Clase C:

- Edificios que cuenten con hasta seis de estas condiciones.

Clase D:

- Edificios que cuenten con más de seis de estas condiciones.

A.2. FICHA DE EVALUACIÓN LV1

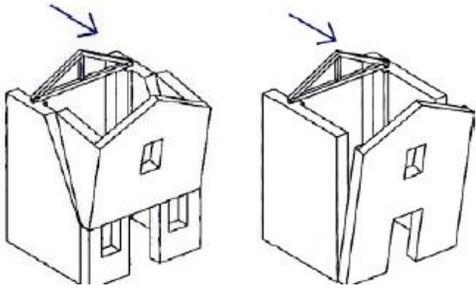
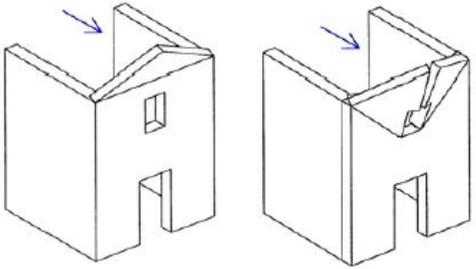
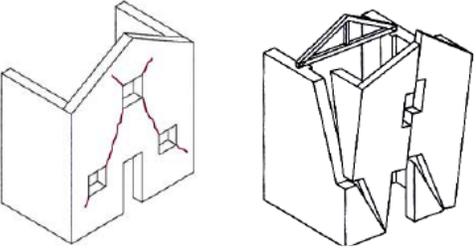
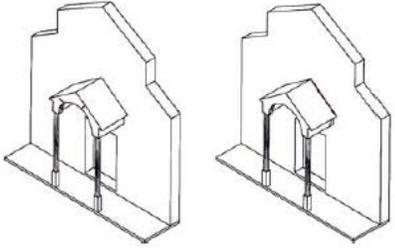
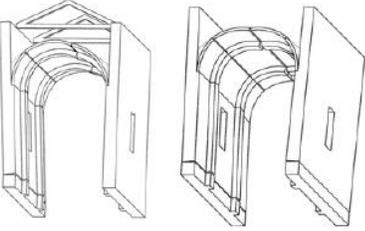
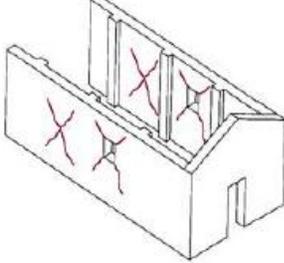
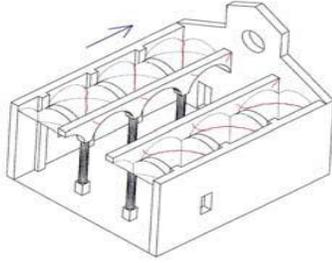
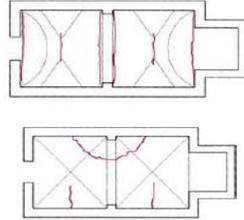
LV1 - EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA IGLESIAS																						
IGLESIA:																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Numero degli indicatori di vulnerabilità o dei presidi antisismici</th> <th>Giudizio dell'efficacia</th> <th>v_k</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>almeno 1</td> <td>3</td> <td rowspan="2">3</td> </tr> <tr> <td>almeno 2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td rowspan="2">2</td> </tr> <tr> <td>almeno 2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>nessuno</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>				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
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																				
VULNERABILIDADES O INDICADORES RESISTENTES SÍSMICOS			Valor de Eficacia o gravedad	v_k	pk																	
1. VOLTEO DE LA FACHADA																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		1																	
Presencia de tirantes longitudinales																						
Presencia de elementos efectivos de contraste (contrafuertes, otro edificio)																						
Buena calidad en las conexiones entre la fachada y las paredes de la nave																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de elementos que causan empuje (techos, bóvedas, arcos)																						
Presencia de grandes aberturas en las paredes laterales cerca de los bordes																						
2. SEPARACIÓN DE LA PARTE SUPERIOR DE LA FACHADA																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		1																	
Presencia de conexiones puntuales con los elementos del techo																						
Presencia de riostras																						
Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de grandes aberturas (<i>rose window</i>)																						
Presencia de gablete grande y pesado																						
Cubierta rígida, viga de hormigón armado, cubierta pesada de hormigón armado.																						
3. MECANISMOS EN EL PLANO DE LA FACHADA																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		1																	
Presencia de un tirante en contra fachada																						
Contraste lateral proporcionado por cuerpos o fachada insertada en agregado																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de aberturas de grandes dimensiones.																						
Esbeltez alta																						
4. PROTHYRUM - NARTHEX																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		0.5																	
Presencia de tirantes																						
Presencia de columnas, muros con rigidez adecuada																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de elementos que causan empuje (bóvedas, arcos)																						
5. RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA NAVE																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		1																	
Presencia de pilastras o contrafuertes externos																						
Presencia de elementos de mampostería adyacentes																						
Presencia de tirantes transversales																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de paredes con alta esbeltez																						
Presencia de bóvedas y arcos																						
6. MECANISMOS DE CORTE EN MUROS LATERALES (RESPUESTA LONGITUDINAL)																						
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>			<i>Eficacia</i>		1																	
Mampostería uniforme (una fase constructiva) y de buena calidad																						
Presencia de buenos arquivadros de aberturas																						
Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)																						
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>			<i>Gravedad</i>																			
Presencia de grandes aberturas o grandes áreas con mampostería delgada																						
Vigas de amarre muy rígidas en hormigón armado, techos pesados en hormigón armado																						

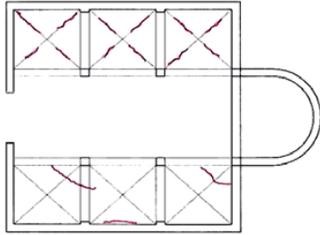
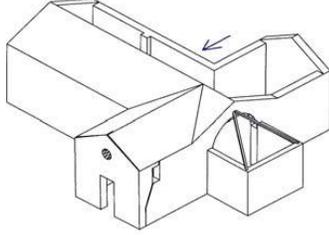
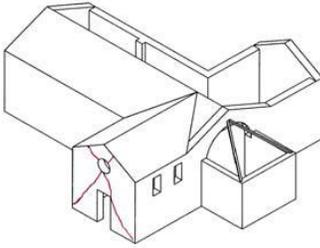
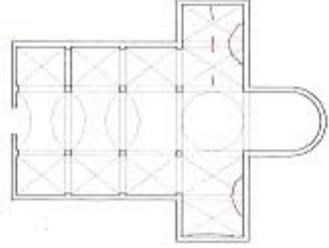
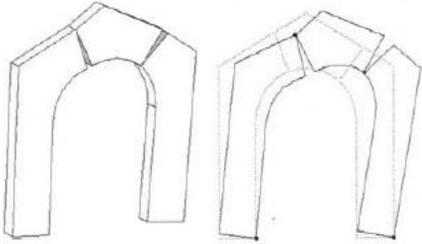
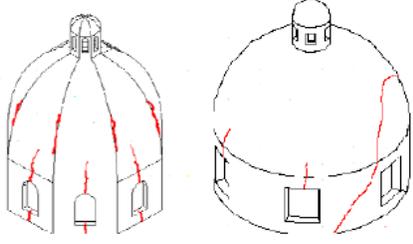
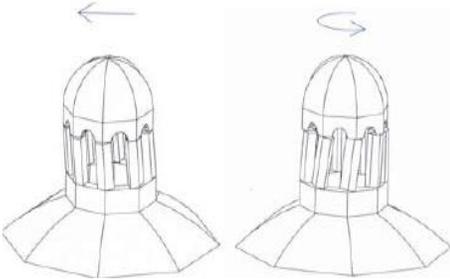
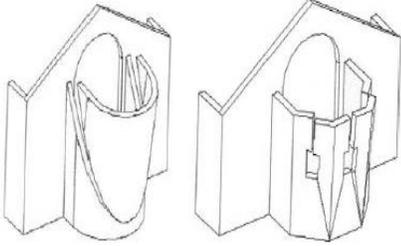
7. RESPUESTA LONGITUDINAL DE EL "COLONNATO" EN IGLESIA CON MAS DE UN PASILLO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de cadenas longitudinales		
<input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes en la fachada		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas pesadas en la nave central		
<input type="checkbox"/>	Cubierta pesada en c.a., capas armadas de grosor significativo en las bóvedas		
8. BÓVEDA DEL PASILLO CENTRAL			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes en posición correcta		
<input type="checkbox"/>	Presencia de relleno en la bóveda o contrafuertes		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por el techo		
<input type="checkbox"/>	Refuerzos con celdas de hormigón, especialmente en grandes luces		
<input type="checkbox"/>	Presencia de "lunette", interrupciones o irregularidades en la forma de la bóveda		
9. BÓVEDAS DE PASILLOS LATERALES			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes en posición correcta		
<input type="checkbox"/>	Presencia de refuerzo en la bóveda o contrafuertes		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por el techo		
<input type="checkbox"/>	Refuerzos con celdas de hormigón, especialmente en grandes luces		
<input type="checkbox"/>	Presencia de "lunette", interrupciones o irregularidades en la forma de la bóveda		
10. VOLTEO DE LOS MUROS TRASEROS DEL TRANSEPTO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes longitudinales		
<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos efectivos de contraste (contrafuertes, elementos adjuntos, otros edificios)		
<input type="checkbox"/>	Buena conexión con el techo (vigas de amarre, tirantes).		
<input type="checkbox"/>	Dentado de buena calidad entre la pared frontal y las paredes laterales		
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras horizontales rígidas, r.c. vigas, techos pesado		
<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en la pared frontal (ventana rosa) y / o en paredes laterales		
<input type="checkbox"/>	Presencia de gablete grande y pesado		
11. MECANISMO DE CORTE EN LA PARED DEL TRANSEPTO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (una fase constructiva) y de buena calidad		
<input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquivates de aperturas		
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas o grandes áreas con mampostería delgada		
<input type="checkbox"/>	Vigas de amarre muy rígidas en hormigón armado, techos pesados en hormigón armado		
12. BÓVEDA DEL TRANSEPTO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de cadenas en lugar efectivo		
<input type="checkbox"/>	Presencia de material de relleno, contrafuertes o mallas de retroadaptación		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas desde el techo		
<input type="checkbox"/>	Refuerzos con celdas de hormigón, especialmente en grandes luces		
<input type="checkbox"/>	Presencia de "lunette", interrupciones o irregularidades en la forma de la bóveda		
13. ARCO TRIUNFAL			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	mampostería)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes en posición correcta		
<input type="checkbox"/>	Buenas sillares cuadrados y / o grosor del arco apropiado		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de un techo pesado de hormigón armado		
<input type="checkbox"/>	Presencia de cúpula o tambor		
14. CÚPULA Y TAMBOR			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo de refuerzo, en múltiples niveles		
<input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes externos en el tambor		
<input type="checkbox"/>	Cúpula colocada directamente sobre arcos triunfales (ausencia de tambor)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en el tambor		
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas desde el techo		

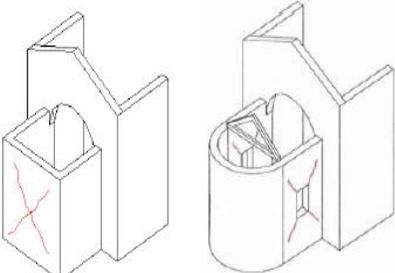
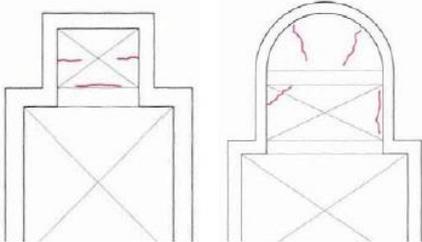
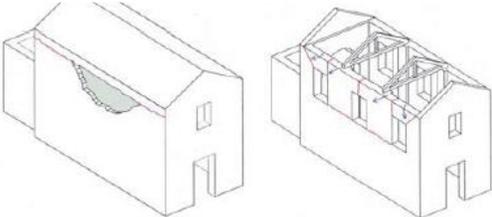
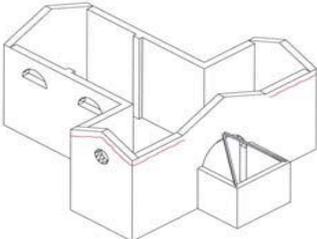
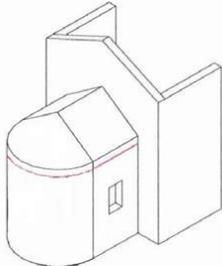
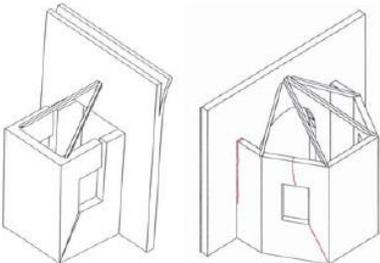
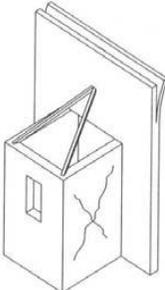
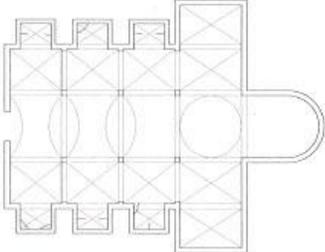
15. LINTERNA			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5
<input type="checkbox"/>	Presencia de un anillo de refuerzo externo o tensores de metal		
<input type="checkbox"/>	Presencia de contrafuertes externos		
<input type="checkbox"/>	Tamaño pequeño en comparación con el domo		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Linterna con alta esbeltez, con grandes aberturas y pequeños "piers"		
16. ABERTURA DEL ÁBSIE			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo de refuerzo o varillas de unión		
<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste eficientes (contrafuertes externos o construcciones adosadas)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de techos arriostrados que no producen empujes		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de un fuerte debilitamiento por la presencia de aberturas (incluso rellenas) en las paredes		
<input type="checkbox"/>	Presencia de bóvedas que producen empujes		
<input type="checkbox"/>	Vigas de unión rígidas, techos pesados, elementos de tejado de hormigón armado, etc.		
17. MECANISMO DE CORTE EN EL MURO DEL ÁBSIDE			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme y de buena calidad (una fase constructiva)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de buenos arquivados de aberturas		
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas o grandes áreas con mampostería delgada		
<input type="checkbox"/>	Vigas de amarre muy rígidas(H.A), techos pesados de hormigón armado		
18. BÓVEDA DEL TRANSEPTO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de cadenas en lugar efectivo		
<input type="checkbox"/>	Presencia de material de relleno, contrafuertes o mallas de retroadaptación		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas desde el techo		
<input type="checkbox"/>	chapa de hormigón armado, especialmente en grandes luces		
<input type="checkbox"/>	Presencia de "lunette", interrupciones o irregularidades en la forma de la bóveda		
19. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO DE LA NAVE			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones entre los tirantes y la mampostería		
<input type="checkbox"/>	Presencia de un diafragma rígido (estructura de madera cruzada o tensores de metal)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones entre los elementos de la estructura del techo		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de empujes de techo		
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo rígido horizontal, techo pesado		
20. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO - TRANSEPTOS			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones entre los tirantes y la mampostería		
<input type="checkbox"/>	Presencia de un diafragma rígido (estructura de madera cruzada o tensores de metal)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones entre los elementos de la estructura del techo		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de empujes de techo		
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo rígido horizontal, techo pesado		
21. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO - ÁBSIDE Y PREBISTERIO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de conexiones entre los tirantes y la mampostería		
<input type="checkbox"/>	Presencia de un diafragma rígido (estructura de madera cruzada o tensores de metal)		
<input type="checkbox"/>	Presencia de buenas conexiones entre los elementos de la estructura del techo		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de empujes de techo		
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo rígido horizontal, techo pesado		
22. ABERTURA DE LA CAPILLA			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de elementos de contraste efectivos (contrafuertes, edificios adyacentes).		
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes de amarre		
<input type="checkbox"/>	Buena trabazón entre la pared frontal y paredes laterales		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Debilidad por grandes aberturas las paredes o paredes delgadas		

23. MECANISMOS DE CORTE EN LAS PAREDES DE LA CAPILLA			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad		
<input type="checkbox"/>	Dinteles de buena calidad en las aberturas		
<input type="checkbox"/>	Presencia de estructuras de amarre horizontales (reticulares en metal o madera, mampostería reforzada, otras)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de anillo rígido horizontal, techo pesado		
<input type="checkbox"/>	Presencia de aberturas grandes (también rellenas), mampostería delgada		
24. VOLTEO DE LA CAPILLA			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes en posición correcta		
<input type="checkbox"/>	Presencia de relleno en la bóveda o contrafuertes		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de cargas concentradas transmitidas por el techo		
<input type="checkbox"/>	Chapa de hormigón armado, especialmente en perfiles de bóveda muy bajos		
<input type="checkbox"/>	Presencia de "lunette", interrupciones o irregularidades en la forma de la bóveda		
25 - INTERACCIONES EN LA PROXIMIDAD DE IRREGULARIDADES PLANO-ALTIMÉTRICAS			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de una conexión adecuada entre mampostería de diferentes fases		
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes de conexión		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Hay una gran diferencia de rigidez entre los dos elementos		
<input type="checkbox"/>	Posibilidad de acciones concentradas transmitidas por el elemento de enlace		
26. PROYECCIONES (GABLE, PINNACLES, ESTATUAS)			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	0.5 < pk < 1
<input type="checkbox"/>	Presencia de pines de conexión con mampostería o elementos de retención		
<input type="checkbox"/>	Elementos de importancia o tamaño limitados		
<input type="checkbox"/>	Mampostería monolítica (cuadrada o de buena calidad)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Elementos de alta esbeltez		
<input type="checkbox"/>	Falso soporte en la mampostería subyacente		
<input type="checkbox"/>	Posición asimétrica con respecto al elemento subyacente (especialmente si la proyección tiene una gran masa)		
27. TORRE CAMPANARIO			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Mampostería uniforme (fase de construcción única) y de buena calidad		
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes en varios niveles		
<input type="checkbox"/>	Presencia de una distancia adecuada desde las paredes de la iglesia (si es adyacente)		
<input type="checkbox"/>	Buena conexión con las paredes de la iglesia (si está incrustada)		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Presencia de grandes aberturas en varios niveles		
<input type="checkbox"/>	Soporte asimétrico en las paredes de la base (torre empotrada)		
<input type="checkbox"/>	Soporte de tierra irregular de la torre (presencia de arcos en algunos lados, paredes colgantes)		
28. CELDA CAMPANARIA			
<i>Dispositivos sísmicos resistentes</i>		<i>Eficacia</i>	1
<input type="checkbox"/>	Presencia de pilares gruesos y / o pequeños arcos		
<input type="checkbox"/>	Presencia de tirantes o anillos		
<i>Indicadores de vulnerabilidad</i>		<i>Gravedad</i>	
<input type="checkbox"/>	Techos pesados u otras masas significativas		
<input type="checkbox"/>	Presencia de empujes de techo		

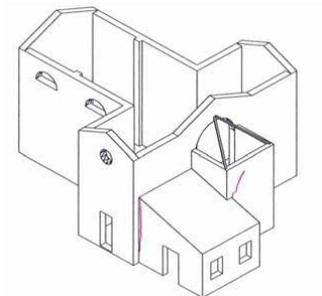
A.3. ESQUEMAS MECANISMOS DE COLAPSOS

<p>1. VOLTEO DE LA FACHADA</p> 	<p>2. SEPARACIÓN DE LA PARTE SUPERIOR DE LA FACHADA</p> 
<p>3. MECANISMOS EN EL PLANO DE LA FACHADA</p> 	<p>4. PÓRTICO - NARTHEX</p> 
<p>5. RESPUESTA TRANSVERSAL DE LA NAVE</p> 	<p>6. MECANISMOS DE CORTE EN MUROS LATERALES</p> 
<p>7. RESPUESTA LONGITUDINAL DE EL "COLONNATO"</p> 	<p>8. BÓVEDA DEL PASILLO CENTRAL</p> 

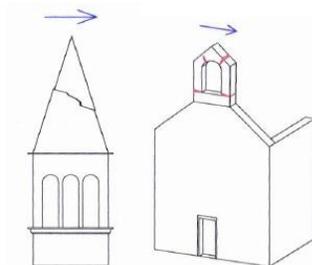
<p>9. BÓVEDAS DE PASILLOS LATERALES</p> 	<p>10. VOLTEO DE LOS MUROS TRASEROS DEL TRANSEPTO</p> 
<p>11 MECANISMO DE CORTE EN LA PARED DEL TRANSEPTO</p> 	<p>12. BÓVEDA DEL TRANSEPTO</p> 
<p>13. ARCO TRIUNFAL</p> 	<p>14. CÚPULA Y TAMBOR</p> 
<p>15. LINTERNA</p> 	<p>16. ABERTURA DEL ÁBSIS</p> 

<p>17. MECANISMO DE CORTE EN EL MURO DEL ÁBSIDE</p> 	<p>18. BÓVEDA DEL ÁBSIDE</p> 
<p>19. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO DE LA NAVE</p> 	<p>20. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO - TRANSEPTOS</p> 
<p>21. MECANISMOS DE LOS ELEMENTOS DE TECHO - ÁBSIDE Y PREBISTERIO</p> 	<p>22. ABERTURA DE LA CAPILLA</p> 
<p>23. MECANISMOS DE CORTE EN LAS PAREDES DE LA CAPILLA</p> 	<p>24. VOLTEO DE LA CAPILLA</p> 

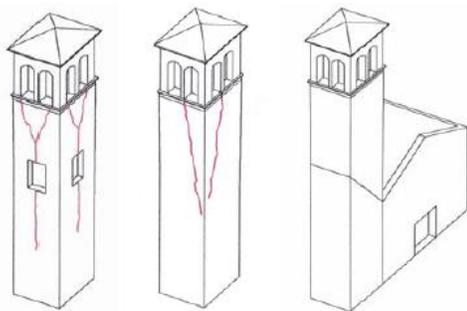
25. INTERACCIONES EN ELEMENTOS DE DISTINTO COMPORTAMIENTO



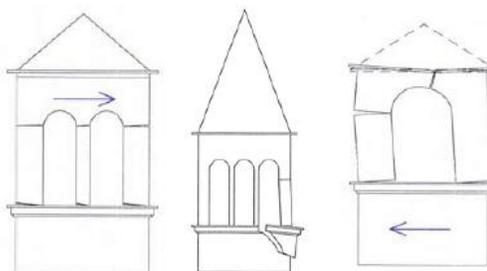
26. PROYECCIONES (MÁSCARAS, PINÁCULOS, ESTATUAS)



27. TORRE CAMPANARIO



28. CELDA CAMPANARIA



ANEXO B EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LV1 EN CASO ITALIANO

B.1. APLICACIÓN LV1 IGLESIA SS MARIA DELLA BRUNA

A modo de ilustrar la metodología italiana presentada en el punto 4.3.2, se evalúa la vulnerabilidad sísmica de la iglesia SS María della Bruna (Catedral de la Ciudad de Matera, Italia), en el nivel LV1, en base a los antecedentes con los que se cuenta.

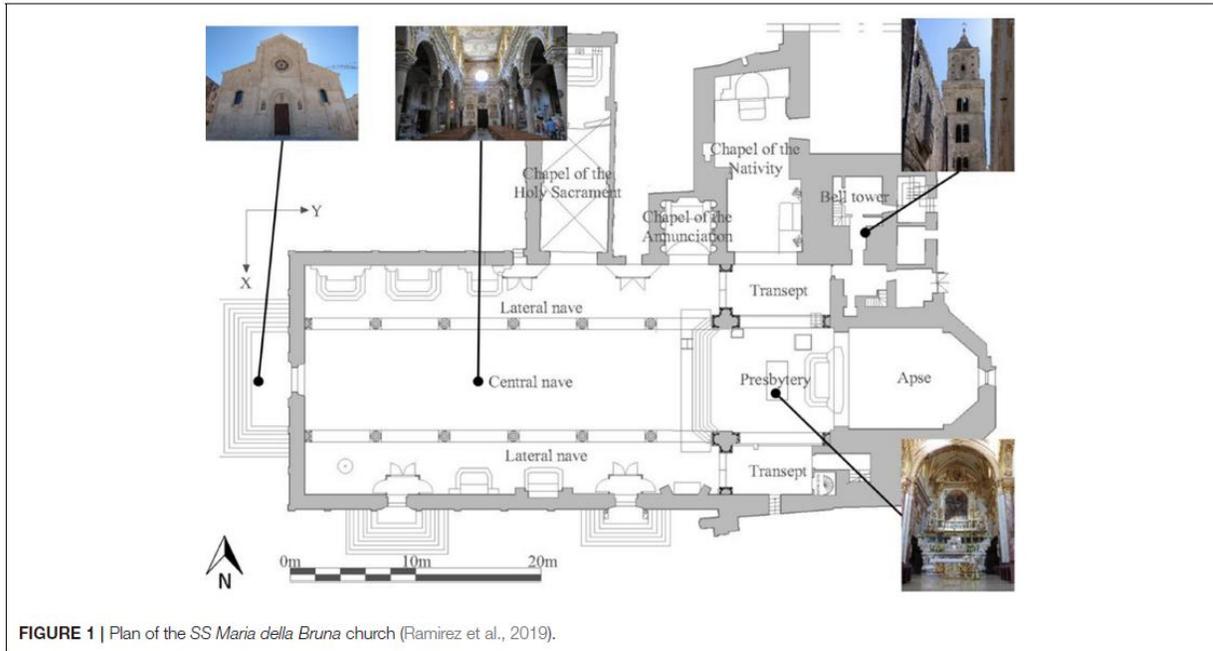


FIGURE 1 | Plan of the SS Maria della Bruna church (Ramirez et al., 2019).

Figura B-1 Planta de la iglesia SS Maria della Bruna. Fuente (D'Amato, Gigliotti, & Laguardia, 2019)



Figura B-2 Vistas exterior e interior de la iglesia SS Maria della Bruna. Fuente D'Amato et al. (2019)

B.1.1. Cálculo del Índice de Vulnerabilidad

Se realiza una valorización de los 28 mecanismos de colapso que considera el nivel LV1 para iglesias:

El volteo en la facha es un mecanismo presente en esta estructura, y a partir de la información con la que se cuenta, se considera una buena conexión entre la fachada y paredes laterales. En cuanto a la separación de una porción de la parte superior de la fachada, esta se ve afectada por la presencia de una abertura del tipo “*rose window*”. Para la falla en el plano de la fachada, se estima que la esbeltez de los muros es un indicador de vulnerabilidad para este mecanismo.

Esta iglesia no presenta nártex por lo que no se considera el mecanismo asociado a este macroelemento.

La respuesta transversal de la nave es un mecanismo de falla que se puede dar en la estructura, sin embargo, no se reconocen ni elementos resistentes ni indicadores de vulnerabilidad de importancia. En el mecanismo de corte en muros laterales, se estima una buena calidad en la mampostería como un elemento resistente. La respuesta longitudinal de las columnas, según la información con la que se cuenta, no se reconocen ni elementos resistentes ni indicadores de vulnerabilidad de importancia. No se aprecian bóvedas ni en la nave central ni en las laterales, por lo que no se consideran. En cuanto a mecanismo en el transepto, de la información disponible, sólo se podría estimar una buena calidad de la mampostería.

Esta iglesia no presenta los siguientes macroelementos, por lo que no se consideran en el análisis: bóveda en transepto, arco triunfal, cúpula, tambor y linterna. Por otra parte, esta iglesia tiene ábside, por lo que sus mecanismos asociados deben ser considerados en la suma, sin embargo, de la información con la que se cuenta sólo se podría estimar una buena calidad en la mampostería en cuanto a la respuesta a los esfuerzos de corte.

No se tiene mayor información de los distintos techos de la estructura (naves, transeptos, ábsides, etc), por lo que no se identifican ni elementos resistentes ni indicadores de vulnerabilidad, misma situación se tiene con la capilla de la iglesia. No se consideran proyecciones (elementos salientes no estructurales) en la iglesia.

Un elemento considerable en esta iglesia es su torre campanario, la cual es de grandes dimensiones y se estima que la mampostería es de buena calidad además de están bien conectada con el cuerpo de la iglesia.

Tabla B-1 Resumen estimación índice de vulnerabilidad (LV1), iglesia SS Maria della Bruna

N° Mec	Mecanismo resistente	Indicador de vulnerabilidad	Peso del mecanismo
1	Volteo en la fachada		
	Buena conexión facha muro lateral	-	Valor fijo
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k
	1 <input type="text" value="1"/>	0 <input type="text" value="0"/>	1 <input type="text" value="1"/>
2	Derrumbe de la parte superior de la fachada		
	-	Grandes aberturas	Valor fijo
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k
	0 <input type="text" value="0"/>	2 <input type="text" value="2"/>	1 <input type="text" value="1"/>

Anexo B: Ejemplo de aplicación de LV1 en caso italiano

3	Mecanismos en el plano de la fachada		
	Efic. V_{kp} 0	Esbeltez alta	Grav V_{ki} ρ_k 1 1 1 Valor fijo
4	Pórtico - nártex		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0 No Presenta Mecanismo
5	Respuesta transversal de la nave		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 1 Valor fijo
6	Mecanismos de corte en muros laterales		
	Efic. V_{kp} 1	Mampost. uniforme de buena calidad	Grav V_{ki} ρ_k 0 1 Valor fijo
7	Respuesta longitudinal del "colonnato"		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 1 Valor fijo
8	Bóveda del pasillo central		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0 No Presenta Mecanismo
9	Bóveda de las naves laterales		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0 No Presenta Mecanismo
10	Volteo de los muros traseros del transepto		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0.6 No Presenta Mecanismo
11	Mecanismos de corte en la pared del transepto		
	Efic. V_{kp} 1	Mampost. uniforme de buena calidad	Grav V_{ki} ρ_k 0 0.6 No Presenta Mecanismo
12	Bóveda del transepto		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0 No Presenta Mecanismo
13	Daño en arco triunfal		
	Efic. V_{kp} 0		Grav V_{ki} ρ_k 0 0 No Presenta Mecanismo

Anexo B: Ejemplo de aplicación de LV1 en caso italiano

14	Cúpula y tambor		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
15	Linterna		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0 No Presenta Mecanismo
16	Abertura del ábside		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1 Valor fijo
Mecanismo de corte en muro del ábside			
17	Mampost. uniforme de buena calidad 1	Efic. V_{kp} 1	Grav V_{ki} 0 ρ_k 1 Valor fijo
	Bóveda del ábside		
18	Mecanismos de los elementos de techo de la nave		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0.6 No Presenta Mecanismo
19	Mecanismos de los elementos de techo del transepto		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1 Valor fijo
20	Mecanismos de los elementos de techo del ábside y presbiterio		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 1 Valor fijo
21	Abertura de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0.6 No Presenta Mecanismo
22	Mecanismos de corte en las paredes de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0.6 No Presenta Mecanismo
23	Volteo de la capilla		
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0.6 No Presenta Mecanismo
24			
	Efic. V_{kp} 0	Grav V_{ki} 0	ρ_k 0.6 No Presenta Mecanismo

Anexo B: Ejemplo de aplicación de LV1 en caso italiano

25	Interacciones en elementos de distinto comportamiento			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	No Presenta Mecanismo
	0	0	0.6	
26	Caída de proyecciones (mascaras, pináculos, estatuas)			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	No Presenta Mecanismo
	0	0	0	
27	Torre campanario			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	Valor fijo
	Mampost. uniforme de buena calidad Buena conexión	-	0	1
28	Celda campanario			
	Efic. V_{kp}	Grav V_{ki}	ρ_k	Valor fijo
	Presencia de pilares y/o arcos	-	0	1

Así, en la siguiente tabla se muestra los valores numéricos para el cálculo del índice de vulnerabilidad (i_v) del nivel LV1 para la iglesia SS Maria della Bruna, se incluyen sólo los valores para mecanismo que están presente en esta estructura.

Tabla B-2 Cálculo índice de vulnerabilidad (LV1) Iglesia SS Maria della Bruna

Mecanismo	Mecanismo Resistente (v_{kp})	Indicador de vulnerabilidad (v_{ki})	Peso del mecanismo (ρ_k)	$\rho_k(v_{ki}-v_{kp})$
1	1	0	1	-1
2	0	2	1	2
3	0	1	1	1
5	0	0	1	0
6	1	0	1	-1
7	0	0	1	0
10	0	0	0.6	0
11	1	0	0.6	-0.6
16	0	0	1	0
17	1	0	1	-1
18	0	0	0.6	0
19	0	0	1	0
20	0	0	0.8	0
21	0	0	1	0
22	0	0	0.7	0
23	0	0	0.7	0
24	0	0	0.7	0
25	0	0	0.7	0
27	2	0	1	-2
28	0	1	1	1
	Σ:		17.4	-1.6

Finalmente, el índice de vulnerabilidad de la iglesia SS Maria della Bruna y las respectivas aceleraciones de colapso son:

$$I_v = 0.485$$

$$a_{SLD} \cdot S = 0.047 [g]$$

$$a_{SLV} \cdot S = 0.188 [g]$$

B.1.2. Determinación de la Amenaza Sísmica

Se considera una vida nominal de $V_N = 50$ años (que se entiende como el tiempo en que el edificio será objeto de un estudio y/o reparación).

Considerando la iglesia como categoría III implica que el coeficiente de uso es $C_u = 1.5$

Por lo tanto,

$$V_R = V_N \cdot C_u = 75 \text{ años}$$

El periodo de referencia para los estados límites de daño y estado límite último (SLD y SLV) con probabilidad de superamiento de 63% y 10% respectivamente son:

$$T_R \text{ SLD} = 75 \text{ años}$$

$$T_R \text{ SLV} = 712 \text{ años}$$

Para obtener la aceleración de sitio esperada para cada periodo de referencia, se ubica geográficamente la iglesia, obteniéndose las siguientes coordenadas.

16.611 E y 40.666 N

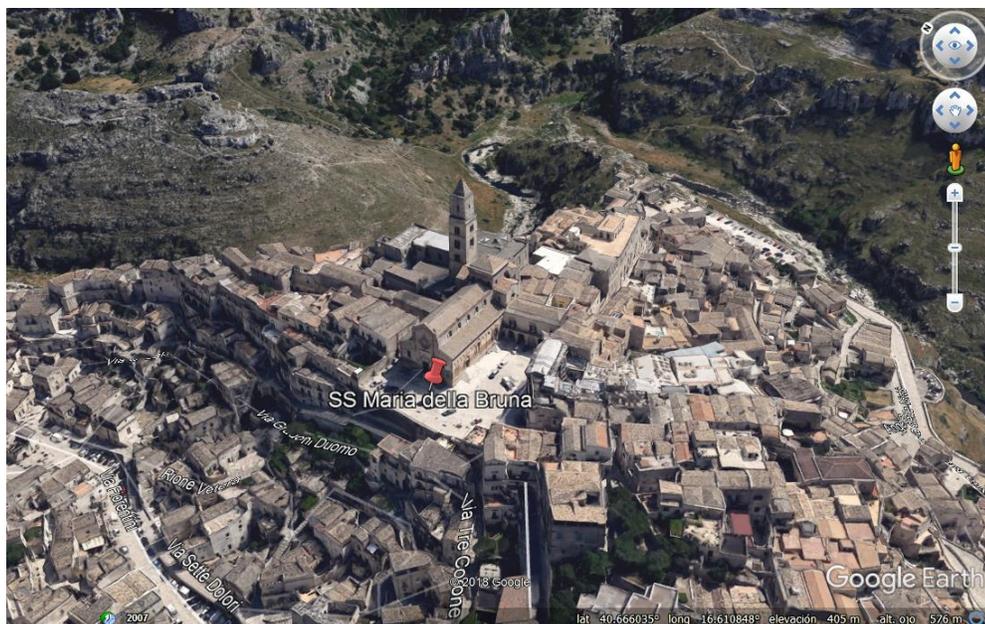


Figura B-3 ubicación geográfica de la iglesia. Fuente: Google Earth.

Anexo B: Ejemplo de aplicación de LV1 en caso italiano

Del anexo B de la NTC 2018, se ubican los 4 puntos de la cuadrícula que contiene a la iglesia, encontrado que los 4 puntos son identificados con los ID: 33680, 33681, 33902 y 33903. Cuyos datos de aceleración horizontal (a_g) para un suelo plano y tipo A, se muestran en la siguiente tabla (valores en $\left[\frac{g}{10}\right]$).

Tabla B-3 Aceleraciones para los 4 puntos que forman la cuadrícula de la iglesia estudiada según anexo B de NTC 2008.

T_R	33680	33681	33902	33903
30	0.373	0.366	0.388	0.381
50	0.485	0.475	0.523	0.513
72	0.573	0.562	0.627	0.615
101	0.698	0.677	0.767	0.752
140	0.799	0.781	0.897	0.884
201	0.94	0.923	1.055	1.039
475	1.303	1.279	1.512	1.497
975	1.647	1.63	1.951	1.937
2475	2.138	2.12	2.619	2.611

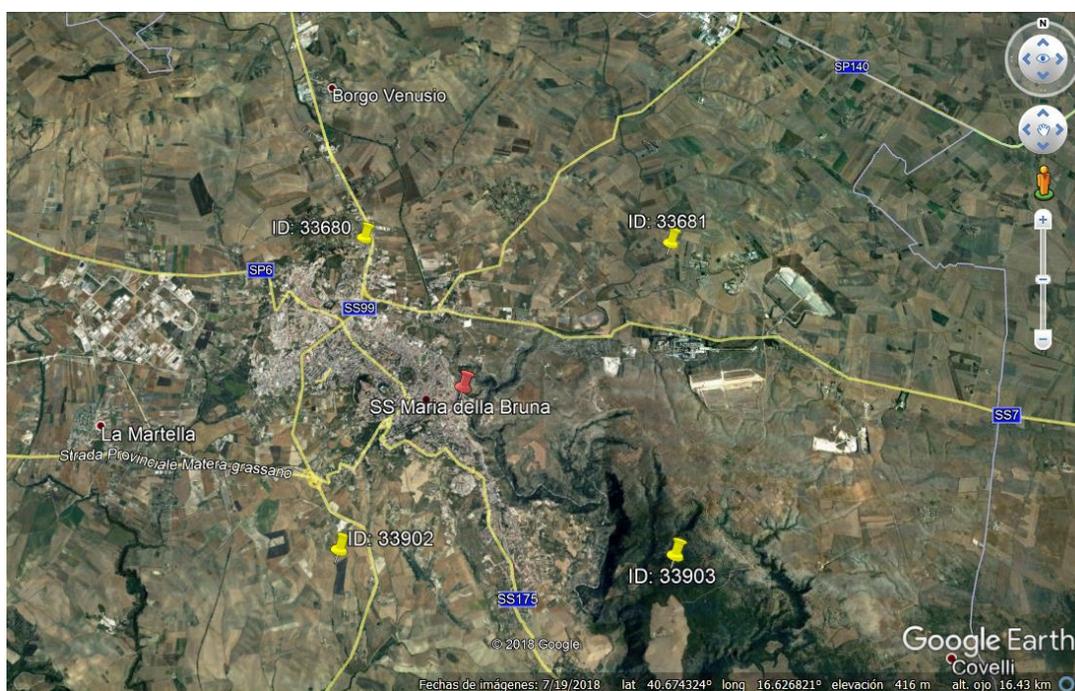


Figura B-4 Ubicación geográfica de la grilla de microzonificación sísmica en torno a la iglesia estudiada. Fuente: Google Earth.

De la interpolación se puede obtener la aceleración asociada a cada periodo de retorno de los estados límites en los cuatro puntos que definen la cuadrícula de la iglesia, además considerando la distancia de la iglesia a cada uno de estos cuatro puntos se puede obtener la aceleración esperada en la ubicación de la iglesia para los periodos de retorno asociados a los estados límites.

Anexo B: Ejemplo de aplicación de LV1 en caso italiano

Tabla B-4 Cálculo de aceleración de suelo en iglesia SS Maria della Bruna para periodo de retorno $T_R = 712$ años

TR	712		$a_{g\ 712}$ [g]	0.161
LOG (a_g)	0.172	0.166	0.242	0.238
a_g [g]	0.149	0.147	0.175	0.173
d_i [Km]	3.34	4.59	3.49	4.52

Tabla B-5 Cálculo de aceleración de suelo en iglesia SS Maria della Bruna para periodo de retorno $T_R = 75$ años

TR	75		$a_{g\ 75}$ [g]	0.061
LOG (a_g)	-0.232	-0.241	-0.192	-0.201
a_g [g]	0.059	0.057	0.064	0.063
d_i [Km]	3.34	4.59	3.49	4.52

A priori, con la información con la que se cuenta de la iglesia es difícil determinar los parámetros del suelo de fundación y factores topográficos, por lo tanto, se asume que los factores asociados al tipo de suelo (S_s) y el factor topográfico (S_T) toman valor igual a 1.

De manera que

$$S = S_s \cdot S_T = 1$$

Finalmente, los periodos de retorno de las aceleraciones de colapso de la estructura en sus dos estados límites son:

$$T_{SLD} = 21 \text{ años}$$

$$T_{SLV} = 512 \text{ años}$$

Por lo tanto, los índices de seguridad (IS) quedan,

$$IS_{SLD} = 0.28$$

$$IS_{SLV} = 0.72$$

Así como los factores de aceleración (Fa)

$$Fa_{SLD} = 0.57$$

$$Fa_{SLV} = 0.87$$

B.2. COMENTARIOS DE LA APLICACIÓN LV1 A UN CASO ITALIANO

El primer comentario de esta evaluación se refiere a la poca información con la que se cuenta de la estructura, lo que dificulta la manera de estimar la situación real de cada macroelemento y sus posibles mecanismos de colapso, por lo que se recurre al criterio para dar una valoración a estos. Esta situación afecta directamente en los resultados obtenidos, tanto en el índice de vulnerabilidad como en las aceleraciones de colapso.

Dicho lo anterior, los resultados obtenidos muestran que la iglesia se encuentra en estado de vulnerabilidad tanto en el estado límite de daño (SLD) como límite de colapso (SLV), para un periodo de referencia de 75 años, ya que ambos indicadores (IS y F_a) son menores que 1. Por lo tanto, la vida nominal de la estructura, debe ser menor a 50 años para garantizar un estado de seguridad sísmica ante la amenaza esperada en el sitio.

Ahora bien, los comentarios respecto a la proyección de la utilización de este método en iglesias chilenas son los siguientes:

Calcular el índice de vulnerabilidad es totalmente aplicable ya que, si bien la tipología chilena puede no presentar todos los macroelementos, el método considera este efecto y simplemente no los considera en la suma.

El problema en la implementación de la metodología, radica en la establecer la amenaza sísmica a la que están expuestas las iglesias. Chile no cuenta con una microzonificación sísmica que entregue los valores de aceleración al nivel italiano, en el cual se puede ubicar geográficamente la estructura en un tramado de 5Km, entregando los valores de aceleración esperada con distintos periodos de retorno.

La metodología italiana requiere al menos 2 periodos de tiempo con sus respectivas aceleraciones para estimar el periodo de retorno de las aceleraciones de colapso, por lo que no habría una manera directa de calcular el índice de seguridad (IS).

Por otra parte, con respecto al factor de aceleración, en donde se comparan directamente las aceleraciones de colapso y esperadas, los valores que indican las aceleraciones de colapso máximas que podría entregar el método italiano, están por debajo de las aceleraciones esperadas en las 3 zonas sísmicas chilenas, así, en general las iglesias presentarían una alta vulnerabilidad sísmica. Esto se puede deber a que dichos valores están calibrados con datos históricos italiano, cuyas aceleraciones pudieron no ser tan altos como en Chile, habiendo un problema de calibración para aplicar el método.