



Inspección y diagnóstico de la Catedral de Potosí, Bolivia

Inspection and diagnosis of the Cathedral of Potosí, Bolivia

Jahdiel VILLAFUERTE¹, Michele D' AMATO², Michelangelo LATERZA³
Gunnady CARO⁴, Julio RUIZ⁵, Gonzalo SALAZAR⁶

¹University of Basilicata, Matera, Italy, jahdiel1634@gmail.com

²University of Basilicata, Matera, Italy, michelangelo.laterza@unibas.it

³University of Basilicata, Matera, Italy, michele.damato@unibas.it

⁴Servicios de Ingeniería y Supervisión ALBIS Adamczyk S.R.L., Potosí, Bolivia, gudy-rcc@hotmail.com

⁵Empresa Zigurat S.R.L., Bolivia, julio.ruiz10@yahoo.com

⁶University of Basilicata, Matera, Italy,, gsa1965@gmail.com

Resumen: La ciudad de Potosí, Bolivia, fue declarada en 1987 por la UNESCO Patrimonio Cultural de la Humanidad en reconocimiento a su riqueza histórica y arquitectura patrimonial. La Catedral de Potosí es una edificación de carácter patrimonial que se encuentra ubicada en el centro histórico de la ciudad, que fue construida entre los años 1808 a 1838, siendo una de las más importantes edificaciones históricas de la ciudad de Potosí. El objetivo de esta investigación es determinar si existen daños y posibles fallas estructurales que pongan en riesgo a la integridad y estabilidad de la Catedral de Potosí. Para dicha evaluación se realizó un proceso de inspección y diagnóstico estructural que incluyen estudios históricos y cronológicos de la construcción de la Catedral, relevamiento geométrico de toda la estructura y estudios de manifestaciones patológicas y de mapeo de daños siguiendo las recomendaciones del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS). Así también se realizó una evaluación cualitativa de los muros mampostería utilizando el índice MQI y ensayos de esclerometría no destructivos, con el propósito de estimar propiedades mecánicas de las unidades de la mampostería. Este artículo presenta una contribución importante de este caso de estudio, que servirá como base inicial para realizar estudios más avanzados.

Palabras clave: Inspección y diagnóstico, mapeo de daños, índice MQI, ensayos no destructivos.

Abstract: The city of Potosí, Bolivia, was declared in 1987 by the UNESCO Cultural Heritage of Humanity in recognition of its historical richness and heritage architecture. The Cathedral of Potosí is a building of patrimonial character that is located in the historic center of the city, which was built between 1808 and 1838, being one of the most important historical buildings of the city of Potosí. The objective of this investigation is to determine if there are damages and possible structural failures that put at risk the integrity and stability of the Cathedral. For this evaluation, a process of inspection and structural diagnosis was carried out, including historical and chronological studies of the construction of the Cathedral, geometric survey of the entire structure and pathology manifestations and damage mapping studies following the recommendations of the International Council of Monuments and Sites. (ICOMOS). In addition, a qualitative assessment of the masonry walls was carried out using the MQI index and non-destructive tests, in order to estimate the mechanical properties of the masonry units. This article presents an important contribution of this case study, which will serve as the initial basis for more advanced studies.

Keywords: Inspection and diagnosis, damage mapping, MQI index, non-destructive tests.



1. Introducción

La preservación del patrimonio histórico se ha convertido en tópico multidisciplinario que engloba a profesionales de distintas áreas, con el fin de establecer procedimientos, criterios de análisis y ejecución de obras de restauración e intervención de estructuras patrimoniales. Instituciones mundiales como ICOMOS y UNESCO dan lineamientos y recomendaciones de evaluación, intervención, y restauración estructural que actualmente están siendo aplicadas alrededor del mundo.

“Las estructuras del patrimonio arquitectónico, por su peculiaridad y su compleja historia, requieren una organización de los estudios y análisis en distintos pasos, similares a los que se utilizan en medicina: anamnesis, diagnóstico, terapia y controles, que corresponden respectivamente a la inspección inicial, la identificación de las causas del daño y el deterioro, la elección de las medidas terapéuticas y el control de la eficacia de las intervenciones. Para ser rentables y producir un impacto mínimo en el patrimonio arquitectónico, a menudo es conveniente que los estudios repitan esos pasos de modo iterativo”, además se aconseja que, “para las investigaciones y diagnóstico del patrimonio arquitectónico, se debe seleccionar un equipo multidisciplinario, de acuerdo a la escala del problema, para trabajar en conjunto desde la inspección inicial, hasta la preparación del programa de investigación” (ICOMOS, 2004).

La ciudad de Potosí, fundada en 1545, fue inscrita en la lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO con el número de identificación 420, siendo una de las razones para dicha denominación la riqueza histórica y arquitectura patrimonial. Sin embargo, el 2014 fue añadida en la lista de Patrimonio Mundial en peligro. En el último reporte del Comité Mundial de la UNESCO del año 2017, la ciudad de Potosí continúa en dicha lista, sin embargo, ya se vienen realizando trabajos con miras a abandonar la denominación de patrimonio en peligro.

El propósito fundamental de la presente investigación es el de aportar información técnica acerca del estado actual de la Catedral de Potosí, que es el principal centro religioso de la ciudad. La Catedral de Potosí se encuentra ubicada en el centro histórico de la ciudad de Potosí (Figura 1), geográficamente se encuentra a $19^{\circ}35'18.76$ Latitud Sur y $65^{\circ}45'12.49$ Longitud Oeste, a una altitud de 4067 m.s.n.m.

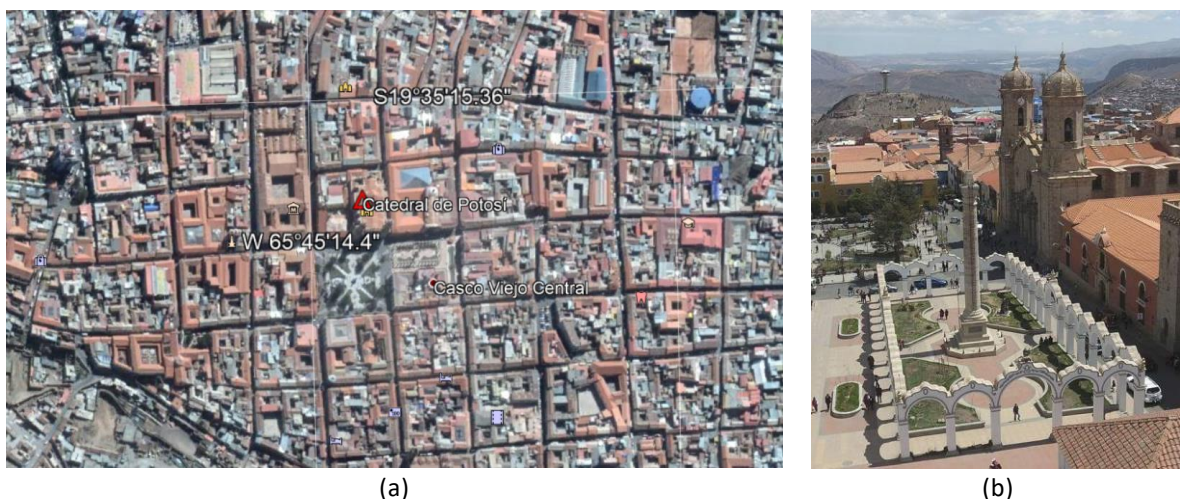


Figura 1. Ubicación de la catedral de Potosí. (a) Fotografía aérea (Google Earth). (b) La Catedral de Potosí en el centro histórico de la ciudad.



2. Encuadramiento histórico

El encuadramiento histórico tiene por objetivo describir los picos relevantes de la construcción de la Catedral de Potosí, su significación histórica y los momentos determinantes de la edificación, considerada la más importante edificación de su época y en la actualidad la más representativa de la arquitectura neo clásica.

Potosí, ciudad que, a consecuencia de la explotación de la Plata, tiene un esplendor vertiginoso y una caída de abandono, es en principio una de las ciudades más pobladas del mundo, donde su crecimiento poblacional fue multiplicado en pocos años. En 1573 ya contaba con 120.000 habitantes, población más numerosa que las grandes ciudades de Europa. Contaba con más población que la propia Italia donde el renacimiento y el arte Florentino estaba en su máximo apogeo, se conoce que Potosí en 1650 llegó a tener más de 160.000 habitantes. La Figura 2 presenta una vista general de Potosí en el año de 1745, cuadro al óleo del Gaspar Miguel Berrio, que se halla en el Museo Nacional en Sucre (Bolivia).

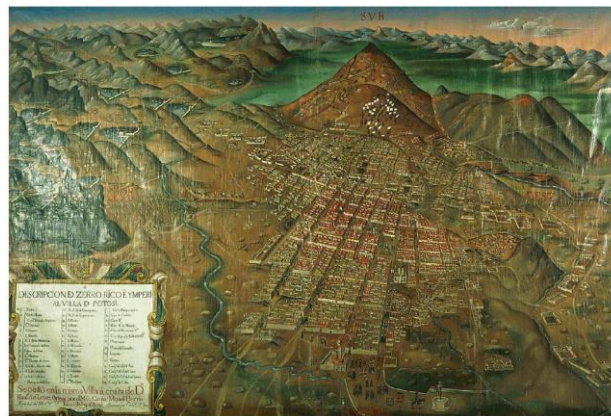


Figura 2 – Vista general de Potosí. Óleo de Gaspar Miguel de Berrío. Siglo XVIII. (POTOSI-Guía de Arquitectura 2004)

Esta población significativa en cantidad también se caracterizó por las construcciones y la organización territorial de la ciudad, en 1572 el Virrey Toledo traza el damero urbano y distribuye los indígenas a las parroquias en las afueras de la ciudad y cercanas a los lugares de explotación minera, los templos en el centro de la ciudad para los españoles y los católicos. (Gutiérrez, 1997). A comienzos del siglo XVII, Potosí contaba con treinta y seis iglesias con valor patrimonial, constituyéndose en la ciudad de mayor crecimiento económico y poblacional, siendo el centro de la explotación y envió de la plata a la Corona española.

Si bien el siglo XVIII que marca el declive de la ciudad de Potosí, se destaca que también es un inicio de las construcciones más importantes en lo que respecta a los edificios más emblemáticos del colonialismo y de la república, se inicia el diseño y la construcción de la Casa de la Moneda, proyectado por José del Rivero y concluida la portada por Luis Cabello en 1768. Se concluyó su edificación en 1773. (Chacón 1,973).

En relación a la arquitectura religiosa, es bastante el aporte en esta época en diseño y construcción, es decir, podemos aseverar que es la época histórica de la llegada de arquitectos renombrados y de magníficos proyectos ejecutados. Salvador de Villa, Bernardo Rojas y Manuel Sanahuja son considerados los arquitectos más notables de esta parte del hemisferio y en esta época se encuentran aportando a la edificación religiosa en Potosí. Este último proyecta la Iglesia Mayor o Catedral de la Villa Imperial.

En cuanto a los inicios de la Catedral de Potosí, se tiene la referencia de una primera construcción realizada en 1548 luego de tres años de la fundación de Potosí, se la conoce como la iglesia menor descrita como la



parroquia precaria, construida por Dn. Pedro Arrieta, por las condiciones precarias de esta parroquia matriz de la ciudad de Potosí, se desploma en 1807 por sus pésimas condiciones constructivas.

Se inicia la construcción de la Catedral de Potosí con la piedra fundamental colocada por el Arzobispo de Charcas Benito María Moxó, catalán en diciembre, 15 de 1809. Su conclusión fue en 1836, luego de 27 años de ejecución en medio de la independencia de Bolivia (1825); Notoriamente la Catedral de Potosí presenta una planta acorde al estilo de las catedrales construidas en América latina propiamente las catedrales Virreinales de Cuzco y de Lima.

Reconstruida con el proyecto original del Arq. Manuel Sanahuja concluido en 1808 para iniciar de obras el 15 de diciembre de 1809. Construcción supervisada por Dn. Fernando Ramirez y a su muerte continuado por Dn. Manuel Ayala, concluyendo las dos torres con la instalación de las campanas de la Catedral el 6 de junio de 1829. La obra fue concluida en 1836, inaugurada como Catedral Mayor de Potosí el 4 de abril de 1838, consagrada por el Arzobispo José María Mendizábal.

El proceso histórico constructivo es caracterizado lamentablemente por ser una obra importante pero que sufre varias paralizaciones y abandonos, básicamente por la coyuntura de la guerra de la Independencia (1823- 1824-1825), siendo necesaria la intervención de varios arquitectos, de tal manera que existe una diversidad de estilos. Aun así, a pesar de las intervenciones e interrupciones y abandono por fallecimiento de su proyectista, es en opinión de los historiadores “la mejor obra neoclásica en Bolivia es la Catedral de Potosí”. El neoclásico “mestizo” que fueron construidas como templos de tres naves y planta de salón, frecuentemente las portadas con elementos barrocos como hastiales mixtilíneos y relieves florales con un trazo de frontón partido cuyo tímpano se une en graciosa curva rematando en copas. (Baptista, 1988).

La última intervención que se realizó para en la Catedral de Potosí fue ejecutada en el año 2012. Después de contar con una evaluación al estado de la iglesia se pudo evidenciar que, si bien la estructura portante del inmueble no presentaba mayores problemas, existía un alto grado de disgregación de algunas piezas líticas ornamentales pudiendo ocasionar el posible desplome de algunas de estas piezas, y la cubierta presentaba deterioro en el tejado ocasionando problemas referidas a la humedad. En ese sentido la intervención se centró en tres aspectos: (i) la consolidación y restauración de la piedra en exteriores como la fachada principal, los muros laterales y la fachada exterior posterior e interior posterior consolidando las partes que se encuentran fisuradas o debilitadas estructuralmente; (ii) el reemplazo del tejado, sellado e impermeabilización de las cubiertas, cambio de las pendientes, retiro de escombros y restitución de piezas faltantes o deterioradas; y, por último, (iii) el control de humedad del subsuelo mediante un sistema de drenaje adecuado. La Tabla 1 señala la línea de tiempo del proceso constructivo de la catedral de Potosí con sus principales hitos evolutivos, así mismo, la Figura 3 se muestran fotografías históricas en relación al encuadramiento histórico descrito.

Tabla 1 – Encuadramiento histórico constructivo de la catedral de Potosí

1548	1807	1808	1809	1810/1828	1836	1838	1850	1852	1910	2012
Primera construcción de la Iglesia Menor de Potosí	Se desploma la Iglesia menor de Potosí, construcción precaria	Proyecto de la Catedral actual de Potosí	Inicio de la construcción y piedra fundamental	Proceso de construcción / Torres e instalación del campanario	Conclusión de la obra	Consagración como Catedral Mayor de Potosí	Fueron doradas las molduras, las cornisas y los frisos	El atrio fue cercado con una reja de bronce fundido	Reemplazo de la actual escalinata	Restauración y Conservación
Construida por Pedro Arrieta		Arq. Manuel Sanahuja	Arq. Manuel Sanahuja	Fernando Ramirez y Manuel Ayala		Arzobispo José María Mendizábal		Manuel Isidoro Belzu	Última intervención	Honorable Alcaldía Municipal de Potosí Ultima restauración
Primera Iglesia		Proyecto	Proceso de Construcción de la Obra			Consagración	Intervenciones Posteriores			



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – Memoria fotográfica histórica de la Catedral de Potosí. (a) La catedral menor de Potosí en 1975, cuadro en óleo de Gaspar Miguel de Berrio. (b) Fotografía tomada en 1875, fuente anónima. (c) Fotografía actual de la Catedral Mayor de Potosí, septiembre 2017.

3. Descripción geométrica de la Catedral de Potosí

La disposición arquitectónica de la Catedral de Potosí destaca por contener elementos arquitectónicos de diversos periodos, con una marcada influencia del estilo barroco neoclásico. Sin embargo, por sus características arquitectónicas generales, tanto en los exteriores como en su interior, corresponde al estilo barroco en su conjunto.

El cuerpo de la estructura se encuentra distribuido en tres naves de igual altura, que contienen capillas laterales, atravesada por un transepto que en su intersección con las naves de la iglesia da lugar al crucero que contiene la cúpula mayor que alcanza la altura de 6.60 m desde la base de los arcos, a su vez, en la prolongación del crucero hacia el norte da lugar al presbítero o cabecera rectangular, el altar principal se halla separado de la nave central por medio de escalinatas. La catedral se encuentra sostenida en un sistema portante de muros de mampostería de piedra labrada, seis columnas en hileras que separan las naves laterales de la nave central cuya sección transversal es de forma planta cuadrifolia que presentan capiteles decorados en los cuales se apoyan los arcos que conforman las bóvedas de la nave central y las naves laterales. Las bóvedas de la nave central y las naves laterales tienen una altura aproximada de 3.0 m.

Esta descripción obedece referencialmente a una tipología ya desarrollada en las catedrales de origen Neoclásico que en la Catedral de Potosí se aplica perfectamente y se establece que en el proyecto la forma y disposición de la planta, es adoptada por el Arq. Sanahuja como modelo de diseño (Gisbert, 1975)

La fachada principal contiene tres portones de ingreso que coinciden con las naves de la catedral, contienen ornamentos decorativos propios del estilo barroco, además, se encuentra flanqueada por los dos campanarios de sección octogonal. La distribución arquitectónica de los espacios se presenta en la Figura 4, así como el relevamiento fotográfico de la catedral, el cual permitió desarrollar un concepto geométrico de la iglesia, además de registrar las anomalías detectadas por deterioros ambientales y físicos presentes en la estructura. En una primera instancia se registró las características más importantes de la basílica desde distintos ángulos en los ambientes interiores, de la nave principal, el registro continuo en los sectores exteriores capturando las fachadas y la cubierta de la estructura.

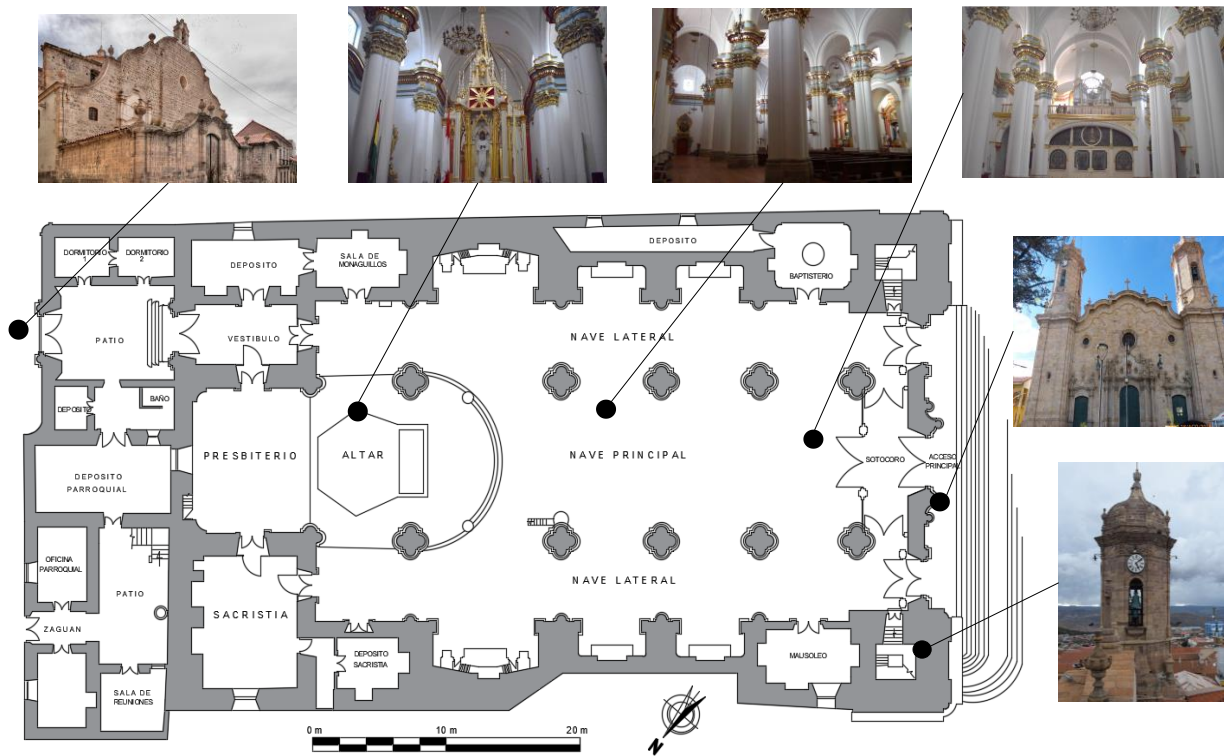


Figura 4 – Plano de la Catedral Mayor de Potosí

4. Inspección y diagnóstico

4.1 Levantamiento de daños y manifestaciones patológicas

Silva (2011) define en términos apropiados que: “una manifestación patológica es una expresión resultante de un mecanismo de degradación y la patología es una ciencia formada por un conjunto de teorías que sirve para explicar el mecanismo y la causa de ocurrencia de dicha manifestación patológica. En función del mismo, queda claro que la patología es un término más amplio que una manifestación patológica, una vez que ella es la ciencia que estudia e intenta explicar la ocurrencia de todo lo que se relaciona con la degradación de una edificación”. Dicha definición, se ajusta al estudio de levantamiento realizado en la catedral de Potosí, puesto que lo que intenta establecer en este acápite es detectar las manifestaciones patológicas y daños presentes en la estructura.

Siguiendo las recomendaciones propuestas por ICOMOS (2004), el levantamiento de los daños fue realizado en el interior y exterior de la catedral, en el cual se hace énfasis a los deterioros causados por efectos ambientales y físicos al largo del tiempo. Los tipos de daños fueron identificados según el “Glosario Ilustrado de Formas de Deterioro de la Piedra” propuesto por Vergès-Belmin (ICOMOS 2010) obteniendo una información detallada del daño y sus posibles causas. La inspección fue realizada en tres fases: (i) La primera fase de inspección se realizó en la planta baja de la catedral donde se encuentra el patio exterior, vestíbulo, altar, la nave principal, las naves laterales, y el sotocoro. (ii) la segunda fase corresponde a la inspección de los campanarios (torres este y oeste) y la cubierta. (iii) La última fase consiste en un recorrido de inspección las fachadas exteriores de la catedral. El término para cada manifestación de deterioro según ICOMOS (2011) son presentadas en la tabla 2, así mismo una descripción breve de cada anomalía. La Figura 5 muestran los principales deterioros asociados a la Tabla 2 encontrados en la Catedral de Potosí.



XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018

Tabla 2 – Descripción de los tipos de deterioro de la piedra identificados (ICOMOS 2011)

N°	Grupo	Término	Descripción
1	Desprendimiento	Disgregación	Desprendimientos de granos en bloques de piedra expuestos a la intemperie, produciendo superficies rugosas.
2		Fragmentación	Existe un grado importante de fragmentación en las molduras y detalles ornamentales de piedra, principalmente en lugares elevados de la fachada principal colindantes con la plaza principal. Esta degradación es causada por agentes externos como el uso no controlado de explosivos cerca de la basílica.
3		Disyunción de películas	Se presenta separaciones de las capas de pintura en lugares exteriores debido al desgaste producido por efectos atmosféricos.
4	Rasgos inducidos por pérdida de material	Descamación	Existe pérdida de la superficie original debido a la disgregación granular suavizando las formas. Esta erosión diferencial en interiores y exteriores.
5		Daños de origen mecánico	Existe pérdida de material producida por el impacto de herramientas mal manipuladas en sectores de fácil acceso. También hay erosión por abrasión en las gradas pétreas de acceso principal y trasero, producida por el tránsito de personas.
6	Alteración cromática	Tinción por humedad	Esta patología está presente desde el nivel más bajo hasta la cubierta de la iglesia. Se da en los sectores que están en contacto con la intemperie debido a la falta de impermeabilización de las coberturas, filtración del agua a través de juntas, descarga libre a partir de bajantes de agua y bio-colonización que también coadyuva a mantener la humedad en determinados sectores; estos factores permitieron una decoloración cromática de la piedra.
7		Pátina ferruginosa	Pátina ferruginosa se presenta debido a la exposición prolongada a la acción atmosférica, decolorando las rocas con una fina capa de ocre oscura.
8		Pátina de oxalato	Esta decoloración se da en todas las superficies de piedra labrada que se encuentran en los exteriores, tomando tonos naranjas a marrones debido a la exposición atmosférica.
9	Colonización biológica	Algas	Algas verdes a negruzcas alojadas en sectores húmedos producto del desalojo de aguas.
10		Plantas	Seres vivos de naturaleza vegetal, con raíces, troncos y hojas, aunque a veces se encuentran constituidas únicamente por una simple expansión foliar (por ejemplo, árboles, he lechos, hierbas)



Cinpar
2018

XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 5 – Tipos de deterioro: (a) disgregación, (b) fragmentación, (c) disyunción de películas, (d) erosión, (e) daños de origen mecánico, (f) tinción por humedad, (g) pátina ferruginosa, (h) pátina de oxalato, (i) algas

Los daños identificados fueron registrados en planillas de levantamiento de daños adoptando un padrón de colores y simbologías adecuadas para su identificación. Finalmente se produjeron mapas de deterioro y de daños de las fachadas externas de la catedral de Potosí, recurriendo al software AutoCAD.



La Figura 6 indica el mapeo de daños de la fachada principal o fachada sur. Haciendo un análisis general de los deterioros encontrados, puede evidenciarse señales de fragmentación, principalmente en las esquinas de las unidades de mampostería y en los elementos ornamentales que adornan la fachada principal. En un porcentaje mayor se encuentran las patinas de oxalato y patinas ferruginosas que son los principales deterioros característicos del material de la mampostería expuestas al medio ambiente. No se tienen problemas relacionados a la humedad y a la colonización biológica, salvo en la parte inferior de la torre oeste en la que se manifiestan algas en una pequeña cantidad.

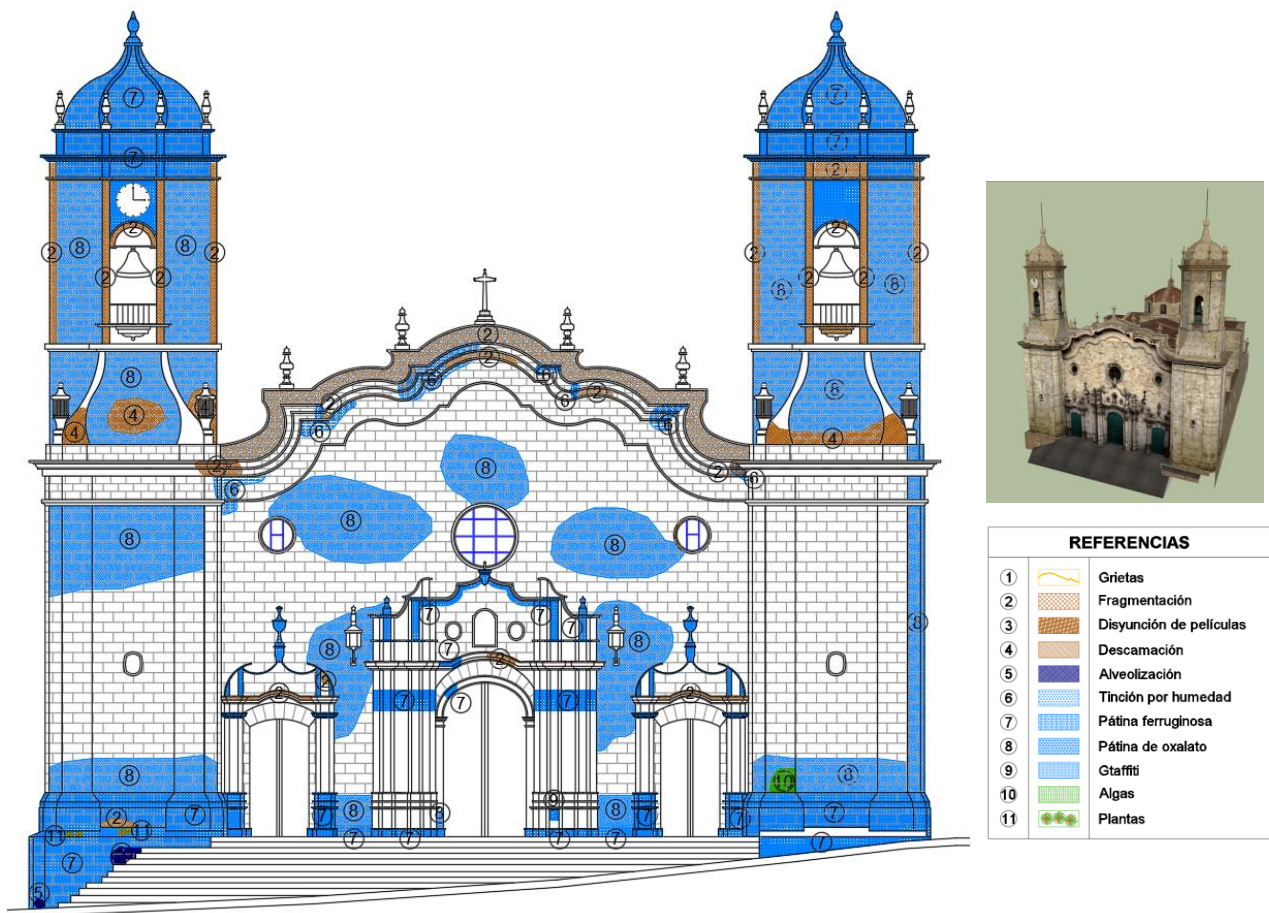


Figura 6 – Mapeo de daños de la Fachada Principal (Fachada Sur)

Las Figuras 7 y 8 indican los deterioros de las fachadas este (lado calle Junín) y oeste (lado patio edificio COTAP) respectivamente. Puede apreciarse que la parte superior de las fachadas donde se sitúan las torres de las campanas, tienen los mismos problemas que la fachada principal que son la fragmentación, patinas de oxalato y patinas ferruginosas. En el cuerpo de las fachadas este y oeste no se presentan daños mayores asociados a fragmentación o desprendimientos, sin embargo, en la base de la fachada este ya puede apreciarse problemas asociados a la humedad provocando la decoloración de la piedra de mampostería; también la fachada oeste presenta colonización biológica que inicia en la cubierta de la estructura hasta la base del muro, esto se debe al deficiente sistema de drenaje de ese punto en particular, provocando acumulación de humedad.



Cinpa
2018

XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018

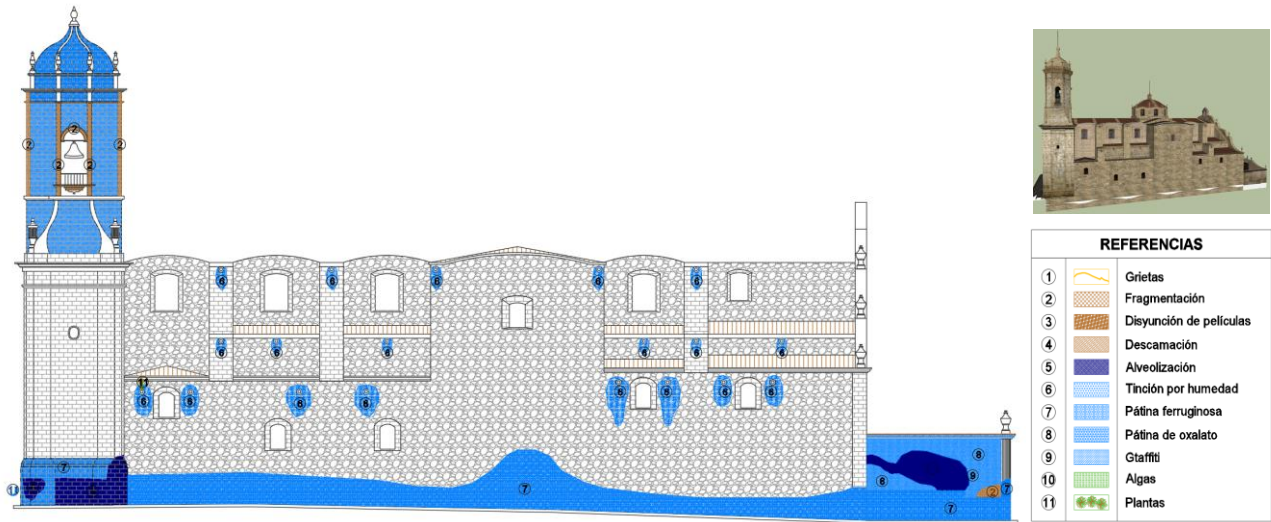


Figura 7 – Mapa de daños de la Fachada Este

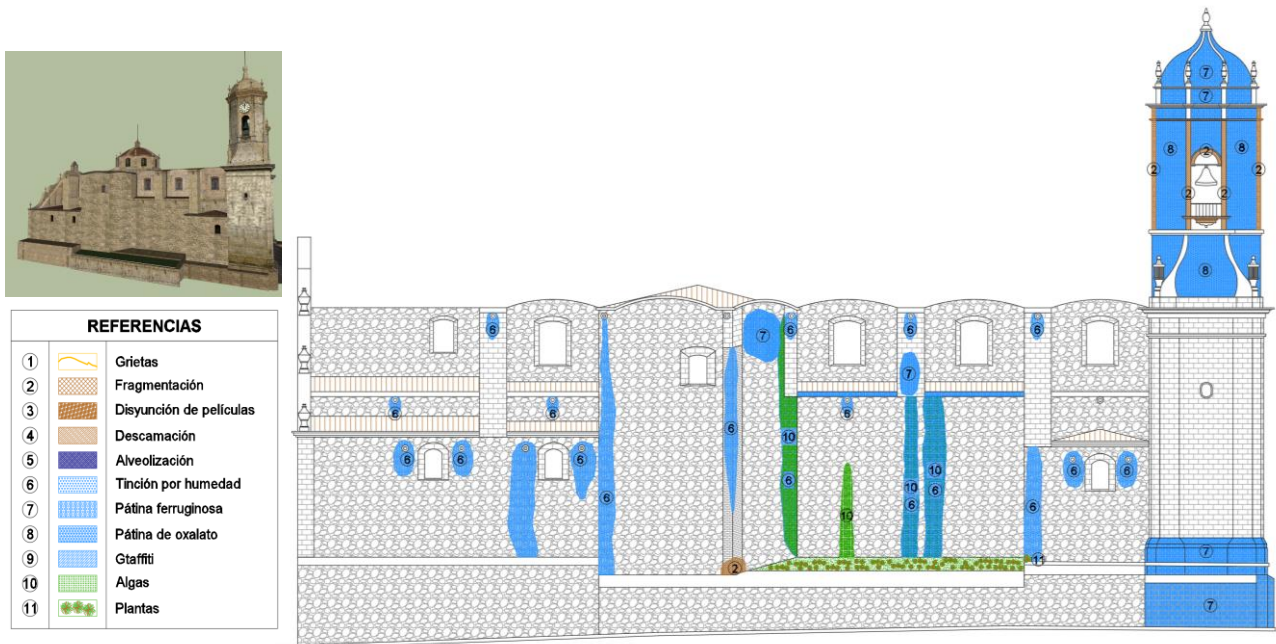


Figura 8 – Mapa de daños de la Fachada Oeste

Las Figuras 9 y 10 indican los deterioros de la fachada norte interior y exterior respectivamente, las mismas son las que presentan mayor deterioro y presencia de daños de toda la catedral. La fachada norte interior presenta una grieta vertical visible que inicia en la parte superior de la fachada y finaliza a la altura de la ventana central de la fachada. Así mismo, se indica la presencia de humedad y colonización biológica en forma de algas en la parte derecha a la puerta de ingreso norte de la catedral. En la fachada exterior se presentan problemas de alveolización en un mayor porcentaje al resto de las patologías, también se debe sellar la presencia de patinas ferruginosas en la base de la fachada exterior.



Cinpa
2018

XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018

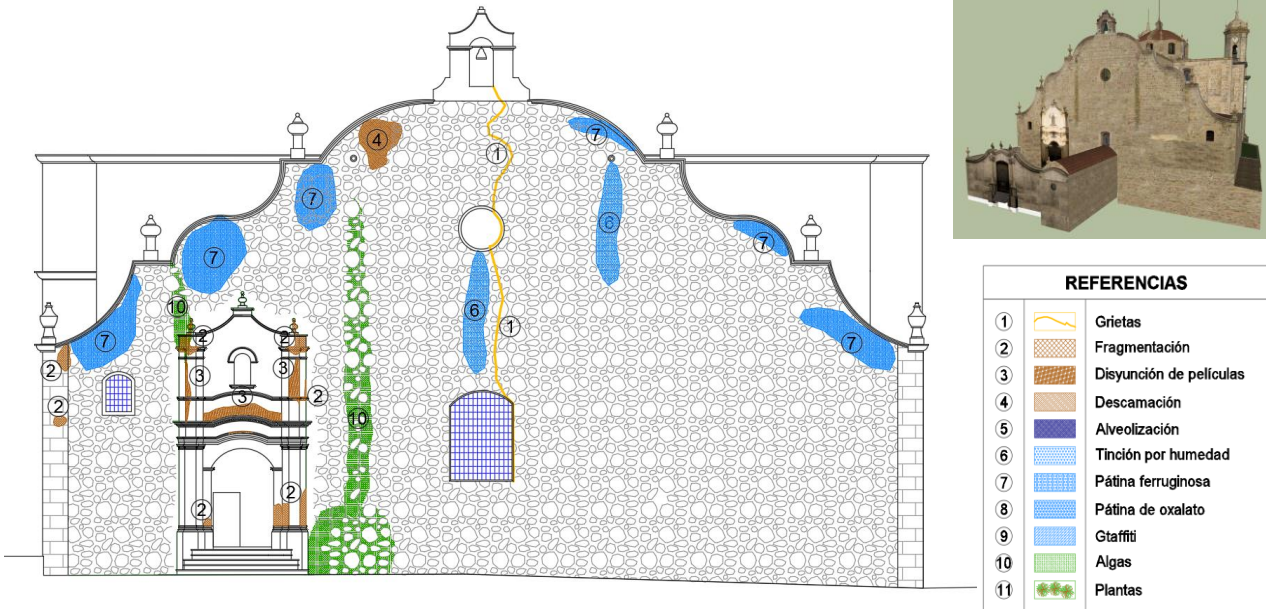


Figura 9 – Mapa de daños de la Fachada Norte - Interior

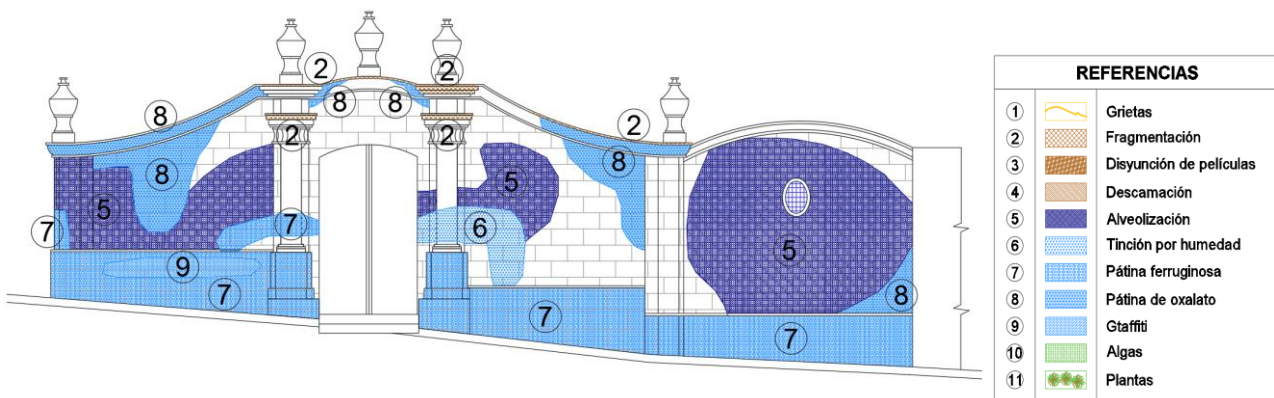


Figura 10 – Mapa de daños de la Fachada Norte - Exterior

4.2 Caracterización de fisuras

Durante la campaña de inspección, en el sector de las torres de las campanas este y oeste de la catedral, se pudo identificar fisuras en los bloques de piedras que componen la mampostería de la Catedral, las mismas, son fisuras locales que no afectan la estabilidad estructural, sin embargo, constituyen una fuente de deterioro futuro de la mampostería, pudiendo llegar a iniciar patologías asociadas a la penetración de agentes ambientales en los bloques de piedra (eflorescencias, ciclos de hielo y deshielo, sales solubles, etc.). En la Figura 11 se muestra el proceso de medición de fisuras mediante la regla electrónica VEHO 400X cuyo sistema de adquisición fue un computador portátil mediante el software Micro Capture Veho-VMS004.



XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
 BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
 JUNE 20-22, 2018



Figura 11 – Medición del ancho de fisuras en las Torre Este de la Catedral.

4.2.1 Torre este

Fueron medidas fisuras aisladas en cinco unidades de piedra denominados BLOQUES, seguidos del número de muestra y la letra E en correspondencia a la torre este. El ancho de fisuras medidos en los bloques tiene una variación de 0,24 mm a 5 mm. La Figura 12 indica el sector de medición de la torre este y las mediciones acotadas directamente por la regla electrónica.

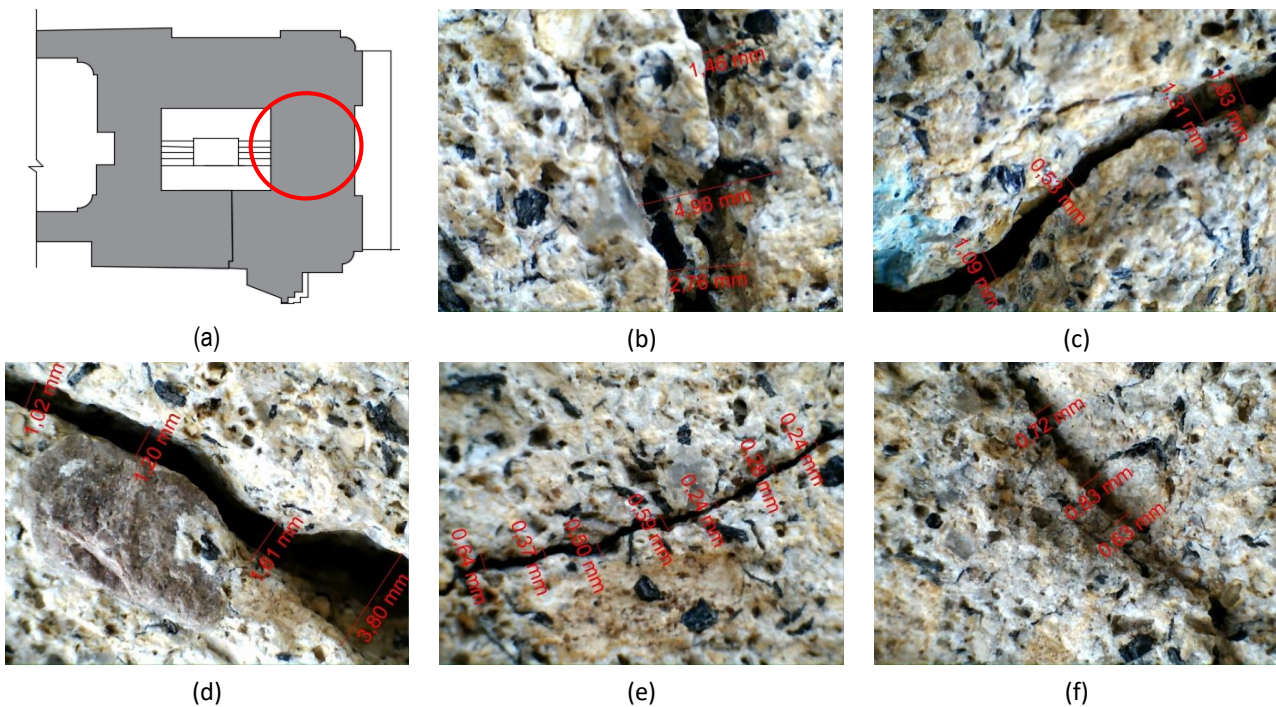


Figura 12 – Medición del ancho de fisuras en bloques piedra. (a) Sector de medición torre este. (b) Bloque 1E. (c) Bloque 2E. (d) Bloque 3E. (e) Bloque 4E. (f) Bloque 5E.

4.2.2 Torre oeste

Así mismo, fueron medidas fisuras aisladas en cinco unidades de piedra denominados BLOQUES, seguidos del número de muestra y la letra O en correspondencia a la torre oeste. Los bloques estudiados presentan mayor cantidad de fisuras cuyo ancho varía entre 0.80 mm a 4.17 mm. La Figura 13 indica el sector de medición de la torre oeste y las mediciones acotadas directamente por la regla electrónica.

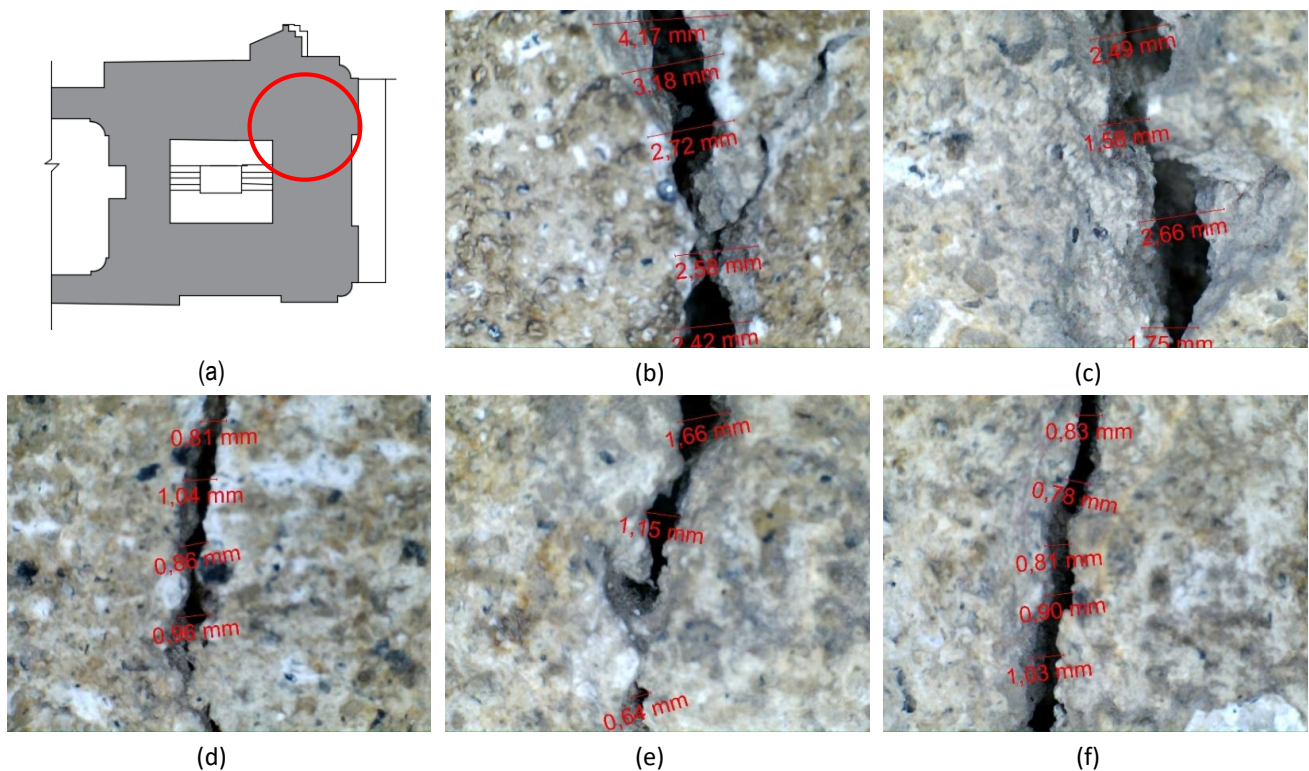


Figura 13 – Medición del ancho de fisuras en bloques piedra. (a) Sector de medición torre oeste. (b) Bloque 10. (c) Bloque 20. (d) Bloque 30. (e) Bloque 40. (f) Bloque 5^º.

4.3 Índice de calidad de la mampostería MQI

Bori y De Maria (2015) proponen un método para determinar cualitativamente la calidad de la mampostería de construcciones históricas. Este método tiene como objetivo desarrollar un enfoque simple y sistemático para analizar estructuras de mampostería basadas en la consideración del comportamiento de la una mampostería "ideal" y las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes (piedras, ladrillos, morteros, etc.), además de evaluar el comportamiento mecánico de la mampostería frente a diversas condiciones de carga.

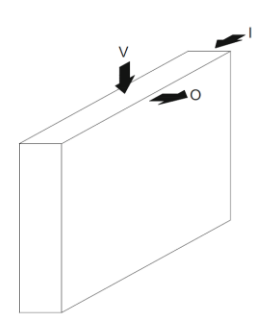
El método del MQI analiza siete parámetros cualitativos que son: (i) el criterio del estado del bloque de piedra y su estado de conservación (SM); (ii) la dimensión de los bloques de piedra (SD); (iii) la forma de los bloques de piedra (SS); (iv) el tipo de conexión que existe en el muro de mampostería (WC); (v) la característica constructiva de la junta horizontal (HJ); (vi) la característica constructiva de la junta verticales



(VJ); y (vii) las propiedades del mortero de junta (MM). A cada uno de estos parámetros se asigna un valor numérico para el análisis del MQI según los criterios de: cumple (F), parcialmente cumple (PF) y no cumple (NF) y para diferentes condiciones de cargas aplicadas sobre la mampostería como ser: carga vertical (V), carga horizontal en dirección del plano (I) y carga horizontal fuera del plano (O). La Tabla 3 indica los valores numéricos asociados a cada parámetro, criterio de aceptación y condiciones de carga propuestos por BORI (2015).

Tabla 3 – Valores numéricos para el análisis del MQI (BORRI y De MARIA 2015)

Condiciones De Carga	Vertical (V)			Horizontal en el plano (I)			Horizontal fuera del plano (O)		
	NF	PF	F	NF	PF	F	NF	PF	F
HJ	0	1	2	0	0.5	1	0	1	2
WC	0	1	1	0	1	2	0	1.5	3
SS	0	1.5	3	0	1	2	0	1	2
VJ	0	0.5	1	0	1	2	0	0.5	1
SD	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MM	0	0.5	2	0	1	2	0	0.5	1
SM	0.3	0.7	1	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1



Con los valores numéricos asignados de la Tabla 3 a cada mampostería analizada, se procede a calcular índice de calidad de mampostería (MQI) mediante la ecuación (1):

$$MQI = SM(SD + SS + WC + HJ + VJ + MM) \tag{1}$$

Una vez calculado el índice MQI, se procede a clasificar el muro de mampostería según las categorías indicadas en la Tabla 4. Categoría A para mampostería de buen comportamiento; Categoría B para muros con un comportamiento medio y Categoría C para mampostería con un comportamiento inadecuado.

Tabla 4 – Valores numéricos para el análisis del MQI (BORRI y De MARIA 2015)


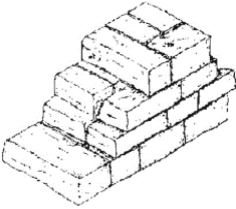

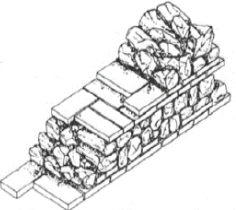

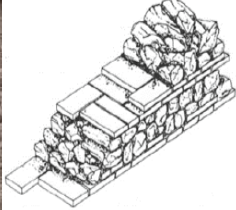

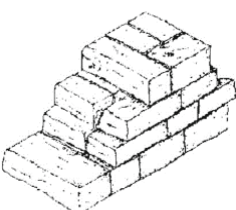
Condición de carga	Categoría de la Mampostería		
	A	B	C
Cargas verticales (V)	$5 \leq MQI \leq 10$	$2.5 \leq MQI \leq 5$	$0 \leq MQI \leq 2.5$
Carga horizontales fuera del plano (O)	$7 \leq MQI \leq 10$	$4 \leq MQI \leq 7$	$0 \leq MQI \leq 4$
Cargas horizontales en el plano (I)	$5 \leq MQI \leq 10$	$3 \leq MQI \leq 5$	$0 \leq MQI \leq 3$

Para la evaluación del MQI en la catedral de Potosí, se analizaron cuatro tipos de mampostería ubicados en las cuatro fachadas de la catedral. La Tabla 5 indica el proceso de cálculo del MQI para los muros seleccionados. Como puede apreciarse en la Figura 14, la fachada principal de la catedral (Muro 1), presenta un excelente desempeño frente a acciones verticales y horizontales (Categoría A). La fachada este (Muro 2) presenta una Categoría B de comportamiento medio frente a las cargas verticales y un comportamiento inadecuado frente a acciones horizontales (Categoría C). Las fachadas oeste (Muro 3) y norte (Muro 4) presentan valores bajos del MQI sin embargo están dentro de la categoría A y B que describen desempeños adecuados frente a sollicitaciones verticales y horizontales.



XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018

Tabla 5 – Procedimiento de cálculo del índice de calidad de la mampostería MQI

N°	UBICACIÓN	FOTOGRAFIA Y ESQUEMA		EVALUACIÓN DEL MQI								
				HJ	WC	SS	VJ	SD	MM	SM		
1	Fachada Sur Torre Este Torre Oeste			Valor	F	PF	F	F	F	F	F	F
				V	2	1	3	1	1	2	1	
				H(I)	1	1	2	2	1	2	1	
				H(O)	2	1.5	2	1	1	1	1	
				MQI	V	10.0	A					
H(I)	9.0	A										
H(O)	8.5	A										
2	Fachada Este			Valor	PF	NF	NF	NF	PF	F	F	
				V	1	0	0	0	0.5	2	1	
				H(I)	0.5	0	0	0	0.5	2	1	
				H(O)	1	0	0	0	0.5	1	1	
				MQI	V	3.5	B					
H(I)	3.0	C										
H(O)	2.5	C										
3	Fachada Oeste			Valor	PF	NF	PF	NF	PF	F	F	
				V	1	0	1.5	0	0.5	2	1	
				H(I)	0.5	0	1	0	0.5	2	1	
				H(O)	1	0	1	0	0.5	1	1	
				MQI	V	5.0	A					
H(I)	4.0	B										
H(O)	3.5	B										
4	Fachada Norte			Valor	F	PF	F	F	F	PF	PF	
				V	2	1	3	1	1	0.5	0.7	
				H(I)	1	1	2	2	1	1	0.7	
				H(O)	2	1.5	2	1	1	0.5	0.7	
				MQI	V	6.0	A					
H(I)	5.6	A										
H(O)	5.6	A										

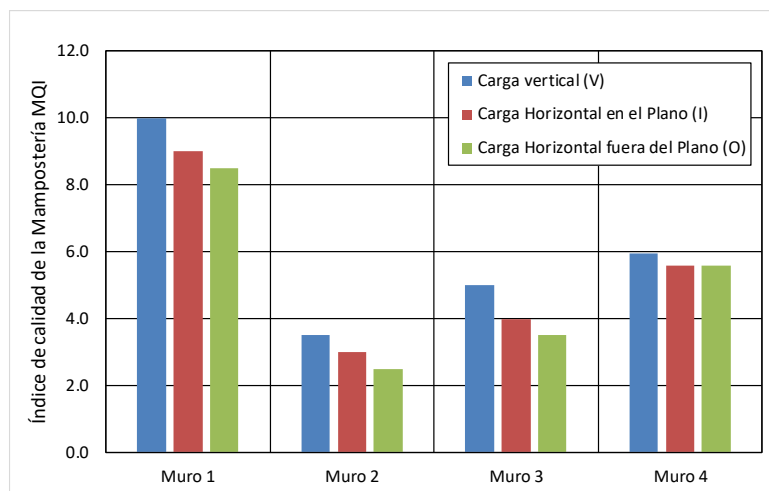


Figura 14 – Índice de calidad de la mampostería para diferentes condiciones de carga



5. Pruebas *in situ* no destructivas (ND)

5.1 Ensayo de esclerometría

El propósito principal de los ensayos no destructivos (ND) es la de estimar propiedades mecánicas del elemento estructural sin que se produzcan daños severos en el momento de ejecutar el ensayo, asegurando de esta manera la integridad del elemento estudiado. Uno de estos procedimientos que es utilizado con mayor frecuencia, es la prueba con el martillo Schmidt que se rige mediante la norma ASTM D5873, en el que se determina el número de rebote (R) que produce la energía de impacto del martillo aplicada a la superficie estudiada.

Dentro de los trabajos realizados en la catedral de Potosí, se determinó el número de rebotes (R_N) con un martillo esclerométrico para hormigón KETECH cuya energía de impacto es de 2.207 J. Dichas pruebas se llevaron a cabo en cuatro zonas ubicadas en el interior de las torres de la catedral a las que se tuvo acceso (ver Figura 15). La Tabla 6 muestra los resultados de los ensayos aplicados a las cuatro zonas de estudio.



Figura 15 – Ensayo de esclerometría. (a) Preparación de la superficie de ensayo. (b) Delimitación de los puntos de ensayo. (c) Procedimiento de ensayo

Tabla 6 – Resumen de pruebas y número de rebotes R_N

Ensayo 1	Ángulo de inclinación = 0 [°]															Ubicación: Torre Este P1		
Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.	Desv.	CV [%]
Golpes	48	47	46	45	43	46	48	42	50	44	48	51	50	47	50	47	3	5.7
Ensayo 2	Ángulo de inclinación = 0 [°]															Ubicación: Torre Este P2		
Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.	Desv.	CV [%]
Golpes	38	39	40	38	41	34	38	44	34	36	40	43	36	38	40	39	3	7.5
Ensayo 3	Ángulo de inclinación = 0 [°]															Ubicación: Torre Oeste P1		
Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.	Desv.	CV [%]
Golpes	41	36	38	46	44	42	37	48	42	38	42	46	38	49	45	42	4	9.8
Ensayo 4	Ángulo de inclinación = 0 [°]															Ubicación: Torre Oeste P2		
Nro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom.	Desv.	CV [%]
Golpes	42	38	38	36	41	32	34	38	40	35	32	34	39	38	38	37	3	8.3



Al utilizar un esclerómetro para hormigón, el número de rebote R_N adquirido en el ensayo debe corregirse, debido a que la energía aplicada al realizar el ensayo es mayor a la energía que aporta el esclerómetro para rocas (Suarez 2014). Entonces, para calcular el número de rebote correspondiente a rocas (R_L) se empleó la ecuación (2) de Poole y Farmer (1980), la ecuación (3) de Viles et al (2011), ambas recomendadas por Suarez (2014), y la ecuación (4) de Aydin (2009).

$$R_L = 1.180 + 0.717R_N \quad (2)$$

$$R_L = -14.957 + 1.159R_N \quad (3)$$

$$R_L = -5.9809 + 0.9393R_N \quad \text{Para el rango de } R_L > 30 \text{ o } R_N > 40 \quad (4)$$

Finalmente, la estimación de las propiedades mecánicas de las unidades de piedra, como el módulo de elasticidad (E), la resistencia a compresión unidireccional (UCS) y densidad (ρ), fueron calculadas mediante las ecuaciones (5), (6) y (7) propuestas por Katz et al. (1999) respectivamente. La Tabla 7 muestran los resultados de las correcciones realizadas y la estimación de las propiedades mecánicas de los elementos unitarios del muro de mampostería.

$$E = 0.00013 \cdot R_L^{3.09074} \quad (5)$$

$$UCS = 2.208 \cdot e^{0.067 \cdot R_L} \quad (6)$$

$$\rho = 1308.2 \cdot \ln R_L - 2873.9 \quad (7)$$

Tabla 7 – Corrección de R_L y estimación de propiedades mecánicas.

Ensayo	Ubicación	R_N	Corrección R_L						Propiedades Mecánicas		
			$R_L(2)$	$R_L(3)$	$R_L(4)$	R_L Prom.	σ	CV [%]	E (5) [GPa]	UCS (6) [MPa]	P (7) [kg/m ³]
1	Torre este	47	35	40	38	38	2.4	6.4	9.54	27.27	1868.2
2	Torre este	39	29	30	-	29	0.7	2.2	4.45	15.74	1545.5
3	Torre oeste	42	31	34	34	33	1.4	4.1	6.39	20.08	1698.4
4	Torre oeste	37	28	28	-	28	0.2	0.6	3.78	14.24	1476.7

6. Conclusiones

Basándose en las inspecciones realizadas en el presente trabajo puede concluirse que, el estado actual de la Catedral de Potosí presenta una situación favorable en cuanto a la estabilidad estructural, sin embargo, debe analizarse el comportamiento frente a acciones horizontales fuera del plano ya que los muros que presentan MQI bajo no son favorables frente a dichas solicitaciones.

De acuerdo al mapa de daños y deterioros elaborados, las fachadas norte, este y oeste son las que más problemas presentan en cuanto se refiere a humedad, patinas y alveolización, por lo que se recomienda tomar medidas adecuadas a la manifestación patológica para contrarrestar el avance progresivo del deterioro. La fachada principal no presenta mayores problemas, sin embargo, se debe realizarse una limpieza cuidadosa de las patinas ferruginosas y de oxalato que a futuro pueden ocasionar decoloración de



la piedra. Un problema general presente en toda la estructura es el de la humedad, lo que provoca la manifestación de colonias biológicas (algas, líquenes, plantas, etc.), y debe ser mejorado con un adecuado sistema de drenaje, tanto en la cubierta de la Catedral, las torres laterales y la base de los muros de mampostería, así evitar aglomeraciones de agua producto de las precipitaciones pluviales que pueden provocar, con el paso del tiempo, reacciones químicas en la piedra (sales solubles). Finalmente debe tomarse atención a la grieta detectada en la parte posterior de la fachada norte y proceder a una consolidación mediante procedimientos adecuados.

Así mismo, en cuanto a las fisuras detectadas en las torres este y oeste, se debe proceder a una consolidación, para evitar la penetración de agentes externos ambientales que puedan alterar el estado actual de los bloques de piedra analizados.

Respecto a los ensayos no destructivos realizados, existe una variación entre la dureza superficial de los puntos estudiados (R_L entre 28 y 38), además, los valores obtenidos mediante las correlaciones para estimar las propiedades mecánicas de la piedra hallados fueron de: $E = 6.04 \text{ GPa}$, $UCS = 19.3 \text{ MPa}$ y $\rho = 1647.2 \text{ kg/m}^3$ que se encuentran dentro del rango para el tipo de piedra estudiada (dacita), sin embargo, dichos valores numéricos son aproximados y deben verificarse realizando procedimientos de laboratorio que recomienda la normativa específica para cada caso.

Las tareas efectuadas son de aporte significativo dentro el campo de la ingeniería civil y la arquitectura, debido a que, como fuente de información técnica, servirá para realizar estudios más especializados como ser valoraciones estructurales integrales y análisis de vulnerabilidad sísmica.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración del Obispado de la Diócesis de Potosí y al Rev. Cesar Azurduy Castro por la autorización y apoyo logístico en el desarrollo de los trabajos de inspección y diagnóstico de la Catedral.

Referencias bibliográficas

- ASTM D5873-05. (2005). *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, www.astm.org.
- Aydin, A. (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46. 627–634.
- Borri A, Castori G, Corradi M, De Maria A (2015). A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bull Earthquake Eng.* 13. 2647–2665.
- Baptista, G. M. (1988). *Potosí, patrimonio Cultural de la humanidad*. La Paz. Compañía Minera del Sur.
- Chacón, T. M. (1973). *Arte virreinal en Potosí, fuentes para su historia*. Sevilla: Escuela de Estudios Hispánicos.
- Galeano, E. (1971). *Las venas abiertas de América Latina*. Primera Edición. México DF: Siglo XXI.
- Gisbert, T. y Mesa, J. (1985). *Arquitectura andina, historia y analisis*. La Paz: Colección Arzans y Vela.
- Gutierrez, R. (1997). *Barroco iberoamericano: De los andes a las pampas*. Madrid: Lundwerg Editores.
- International Council on Monuments and Sites ICOMOS. (2003). *Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. Paris: International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage.
- Katza, O. Rechesa, Z. Roegiers, J.-C. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37, 723-728.



XIV INTERNATIONAL CONFERENCE ON
BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR
JUNE 20-22, 2018

- Silva, F. B. da. (2011). Patología das construções: uma especialidade na engenharia civil. <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/174/artigo285892-2.aspx>.
- Suárez, L. (2014). Estimación de la variabilidad mecánica de placas de roca por ensayos no-destructivos. *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 10, no. 19, pp. 221–246.
- Tapia, V. A. (2012). *Turismo que vale un Potosí*. Potosí: Bolivia.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <http://whc.unesco.org/es/list/420#top>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <http://whc.unesco.org/en/danger/>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <http://whc.unesco.org/en/news/1665/>
- Vergès-Belmin, V. (2010). *Illustrated glossary on Stone deterioration patterns. English-French Ed. Monuments & Sites 15*. (International Scientific Committee for Stone). https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf