



Escuela Técnica Superior de  
**Ingeniería de Edificación**

# **LA BASÍLICA DEL SALVADOR EN SANTIAGO DE CHILE:**

## **PROPUESTA DE REPARACIÓN DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS EN ALBAÑILERÍA DE LADRILLO Y AGLOMERANTE DE CAL.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN  
INTEGRAL DE LA EDIFICACIÓN**

**TRABAJO DE FIN DE MASTER**

**CURSO 2014-2015.**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
DE EDIFICACIÓN.**

**MANUEL DOMINGO CORREA BAERISWYL**

**TUTOR: DR. JUAN JESÚS MARTÍN DEL RÍO.**



## **LA BASÍLICA DEL SALVADOR EN SANTIAGO DE CHILE:**

### **PROPUESTA DE REPARACIÓN DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS EN ALBAÑILERÍA DE LADRILLO Y AGLOMERANTE DE CAL.**

Trabajo de Fin de Máster para optar al Título de Master Universitario en Gestión Integral de la Edificación por Manuel Domingo Correa Baeriswyl siendo tutor: DR. Juan Jesús Marín del Río.

**DR. Juan Jesús Marín del Río.**

**Manuel Domingo Correa Baeriswyl**

## **RESUMEN**

La Basílica del Salvador forma parte del patrimonio arquitectónico de la ciudad de Santiago de Chile, el cual es afectado en gran medida por los sismos de los años 1985 y 2010 que generan graves daños a la edificación patrimonial. El presente trabajo de fin de máster busca generar una propuesta de reparación mediante un mortero dosificado de cal para la solución de patologías de grietas y fisuras en los muros de albañilería de ladrillos y aglomerante de cal presentes en la Basílica del Salvador.

## **PALABRAS CLAVES**

**CAL, LADRILLO, GRIETAS, FISURAS, DIAGNÓSTICO, CARACTERIZACIÓN, DOSIFICACIÓN, PROPUESTA, REPARACIÓN, BASÍLICA DEL SALVADOR.**

## **ABSTRACT**

The Basilica of Salvador is part of the architectural heritage of the city of Santiago de Chile, which is greatly affected by the earthquakes of 1985 and 2010 generated serious damage to the heritage building. This final project work generates a proposal repair by a mortar of lime dosed to solve pathologies of cracks and fissures in the masonry of brick and lime binder present in the Basilica of Salvador.

## **KEYWORDS**

**LIME, BRICK CRACKS, FISSURES, DIAGNOSIS, CHARACTERIZATION, DOSAGE, PROPOSAL, REPAIR, BASILICA OF SALVADOR**

## ÍNDICE

### I. CONSIDERACIONES PREVIAS

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>5</b>
1.1. LA BASILICA DEL SALVADOR.	6
1.2. HISTORIA DE LA CAL.	12
1.3. LA CAL.	16
1.4. CRITERIOS DE RESTAURACIÓN E INTERVENCIÓN.	20
1.5. RESUMEN INTRODUCCIÓN.	24
<b>2. ESTADO DEL ARTE.</b>	<b>28</b>
<b>3. OBJETIVOS.</b>	<b>31</b>
<b>4. METODOLOGÍA.</b>	<b>32</b>
4.1. RESUMEN METODOLOGÍA.	34

### II. DESARROLLO DEL TRABAJO

<b>5. DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS.</b>	<b>35</b>
5.1. CLASIFICACIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN ALBAÑILERÍA.	35
5.2. GRIETAS Y FISURAS EN LA BASILICA DEL SALVADOR.	47
5.3. RESUMEN DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS.	49
<b>6. CARACTERIZACIÓN.</b>	<b>50</b>
6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CAL.	53
6.2. PROCEDIMIENTO GENERAL DE CARACTERIZACIÓN.	53
6.3. CARACTERIZACIÓN EN ALBAÑILERÍA.	63
6.4. RESUMEN DE CARACTERIZACIÓN.	65

<b>7. DOSIFICACIÓN.</b>	<b>66</b>
7.1. CAL.	68
7.2. ÁRIDOS.	70
7.3. PROPUESTA DE DOSIFICACIÓN.	71
7.4. RESUMEN DOSIFICACIÓN.	76
<b>8. PROPUESTA DE REPARACIÓN.</b>	<b>79</b>
8.1. PROPUESTA DE REPARACIÓN GENERAL .	79
8.2. RESUMEN DE PROPUESTA DE REPARACIÓN.	88
<b>9. CONCLUSIÓN.</b>	<b>90</b>
<b>10. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.</b>	<b>93</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>94</b>
<b>12. ANEXO</b>	<b>101</b>

## **I. CONSIDERACIONES PREVIAS.**

### **1. INTRODUCCIÓN.**

El presente trabajo de investigación tiene como objeto de estudio la solución de patologías de grietas y fisuras en los muros de albañilería que afectan la integridad estructural de la Basílica del Salvador mediante una propuesta de reparación.

Una propuesta de reparación, relaciona un análisis sobre las patologías de grietas y fisuras referentes a su comprensión, diagnóstico, caracterización del material de la cal en conjunto con albañilería de ladrillos y posteriormente el desarrollo de una dosificación de un mortero reparador que cumpla con las propiedades exigidas por los requerimientos existentes de los muros.

Para ello, es fundamental conocer el edificio y materiales que lo componen desde una mirada histórica como también técnica.

La Basílica del Salvador, es sin lugar a dudas, una edificación símbolo de la destrucción del sismo del año 1985 que afectó a la ciudad de Santiago de Chile y que inutilizó la edificación produciendo su estado de abandono.

Las edificaciones con carácter patrimonial y en estado de deterioro, deben ser estudiadas de forma específica, de esta forma, generar una intervención idónea y lograr una reparación adecuada que no afecte posteriormente a la edificación.

Será fundamental estudiar y comprender el origen de las patologías que la afectan, junto con el estudio de las características y propiedades de los materiales existentes que en numerosos casos es único. Los materiales nuevos a utilizar en una reparación patrimonial deben comportarse de forma homogénea con respecto a los materiales actuales en la edificación de estudio de esta forma evitar problemas futuros de incompatibilidades físicas, químicas y/o mecánicas que puedan causar nuevas patologías. La Basílica del Salvador

forma parte de la ciudad de Santiago y de la identidad de la ciudad, todos los esfuerzos económicos y sociales de las generaciones pasadas por edificar esta obra arquitectónica patrimonial están hoy en día en riesgo.

Proponer un mortero de cal que responda a la recuperación de las resistencias mecánicas perdidas con respecto al material dañado es fundamental para lograr una adecuada reparación. Esta propuesta de reparación, sigue los criterios de restauración particulares para este tipo de estructuras, fundamentado en que cada edificación patrimonial posee factores arquitectónicos y de construcción únicos.

### **1.1. LA BASÍLICA DEL SALVADOR.**

La Basílica del Salvador comienza su construcción en obra gruesa bajo el Arzobispado de Don Rafael Valdivieso, en el año 1864. El motivo de su construcción corresponde a que la nueva edificación reemplazará al templo religioso de la Compañía el cual sufre un grave incendio el 8 de Diciembre de 1863 que la destruye por completo.

La obra se encomienda al arquitecto alemán Teodoro Burchard y como administrador de la obra el Arzobispo designó al presbítero Ignacio Zuazagoitia.

Su ubicación será por el Norte entre las calles Huérfanos y por el Sur en Agustinas, por el poniente (Colegio de Agustinos) actual calle Almirante Barroso y otras propiedades por el Oriente del Arzobispado de Santiago.

En 1873 se inician las obras tras difíciles problemas presupuestarios terminando la cubierta en el año 1888 y finalizando la obra gruesa en su totalidad en el año 1892. La obra mide 98 m de largo, 37 m de ancho, una altura interior de 30 m y una superficie total construida de 3626 m<sup>2</sup>. Con la capacidad de albergar a 5000 personas. Su estilo neogótico único en Chile da a la Basílica del Salvador un carácter propio de arquitectura y construcción.



Fotografía.1: Vista de la fachada Norte de la Basílica del Salvador<sup>1</sup>.

Su obra gruesa es de una estructura de albañilería de ladrillo a la vista con argamasa de cal. Los arcos de las bóvedas del cielo son de ladrillo y los arcos cruceros son de madera. El cielo de listones y yeso forman las curvas de las bóvedas. La cubierta es de hierro galvanizado<sup>2</sup>. Esto se contrapone de acuerdo a lo descrito en el proyecto de refuerzo estructural actual<sup>3</sup>. En donde existe una contradicción de los materiales presentes en la cubierta. Si bien no tiene una mayor importancia en el análisis que contempla los muros de albañilería de ladrillo y cal. No solo se puede simplemente realizar una caracterización de un material por los datos históricos. La comprobación química, física y mecánica es fundamental de analizar en laboratorio y así determinar que se trabajará con el material adecuado que caracterice a la estructura.

Para un análisis histórico, estructural y cronológico, podemos dividir la historia de la Basílica del Salvador de acuerdo a su relación con los acontecimientos sísmicos más importantes que afectaron a su estructura:

---

<sup>1</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.

<sup>2</sup> Laborde, Miguel. 1987, "Templos Históricos de Santiago", Ed. *el Mercurio*, Santiago.

<sup>3</sup> Bozzi, D & Prado, F. 2013, "Obras en la Basílica del Salvador", Versión on-line ISSN 0717-6996 ARQ Santiago no. 88, *Scielo*, Universidad Católica de Chile, fecha de vista Diciembre 2014, <[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-69962014000300003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-69962014000300003&script=sci_arttext)>.

- Primer evento sísmico del año 1906:

Tras este primer sismo que afecta a su estructura, se realizó una mejora estructural con amarras de perfiles metálicos anclados en el coronamiento de los muros. Esta intervención se ejecutó con el fin de mejorar las condiciones estructurales de los muros de las naves laterales para prevenir daños por un sismo futuro de mayor intensidad.

La ornamentación y las decoraciones interiores finalizan en 1920. Varios artistas de renombre chilenos figuran en los trabajos como: Aristódemo Lattanzi, Virginio Arias y Onofre Jarpa. Se puede destacar además las vidrieras del taller Meyer encargados a Múnich en Alemania y de origen Belgas.

En este período de tiempo comienza un evento social importante para la edificación religiosa con la peregrinación de soldados sobrevivientes de la Guerra del Pacífico convirtiendo el templo en un punto de oración importante para la sociedad del aquel entonces.

- Segundo evento sísmico del año 1927:

La edificación sufre daños estructurales y se destruyen varias vidrieras de origen belgas-alemanas de un valor muy significativo, los arquitectos Smith Solar y Smith Miller modifican la fachada y dirigen las obras de reparación.

En 1930, la Basílica del Salvador es considerada el punto de peregrinación y procesión de la Virgen del Carmen patrona de Chile. Posicionándose como un lugar de reunión y encuentro religioso para la ciudad. En 1938 se produce un hito fundamental en historia de la edificación ya que es nombrada Basílica por orden del Papa Pío XI. La Basílica del Salvador es declarada Monumento Histórico por el Decreto N° 933 el (24 de Noviembre del año 1977)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> MOP. 2009, Ministerio de obras públicas, Ficha número 97, *Registro Monumentos Nacionales Departamento de Arquitectura, Archivo*, Santiago.

- Tercer evento sísmico del año 1985:

El sismo con fecha 3 de marzo del año 1985<sup>5</sup> y con epicentro en San Antonio es de excepcional intensidad. La magnitud medida con la escala sismológica de Richter es de 8.0 o XI en escala modificada de Mercalli. El movimiento sísmico daña parte de su estructura, cediendo y dejando daños estructurales importantes.



Fotografía.2: Daños estructurales en fachada sur-poniente producto del terremoto de 1985<sup>6</sup>.

El sismo daña los costados del templo, destruyendo la ornamentación como vidrieras, frescos y decoración interior. En lo que respecta a los daños estructurales. La caída en parte de los arcos de medio punto exteriores, vitales para el sostenimiento de los muros y de la nave central hacen colapsar la estructura, sobre todo el punto más alto de la edificación, lo cual hace notar que no fue suficiente el refuerzo ejecutado en 1906 y los daños estructurales en 1927 contribuyeron al debilitamiento del templo. La Basílica del Salvador se convierte en la imagen símbolo de la destrucción ocasionada por el terremoto de 1985 en la ciudad de Santiago.

---

<sup>5</sup> Flores Álvarez, R. 1993, "El caso del sismo 3 de marzo de 1985", *Ed. Hachette*, Santiago.

<sup>6</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.



Fotografía.3: Daños en el interior de la Basílica del Salvador tras el terremoto de 1985, vista del transepto y la nave central<sup>7</sup>.

Después del sismo, se realizan trabajos de consolidación de la nave central con la construcción de dos gigantescas columnas de hormigón armado, la obra es financiada por el Arzobispado de Santiago. La intervención es realizada de forma desesperada y sin un procedimiento teórico de restauración adecuado, las naves laterales se reconstruyen en parte (sólo los muros) y el Ejército de Chile contribuye con el apuntalamiento de los muros con rollizos de madera, en reemplazo de los arcos de medio punto debilitados o destruidos.

Las obras se ejecutan sin una adecuada planificación y sin la coordinación de un proyecto consolidado, en gran medida debido a problemas monetarios, que no permitieron una reparación y una restauración total para su utilización.

En el año 1985 el templo se cierra y se abandona, la falta de recursos económicos, voluntad social y política sumado a una mala coordinación de las instituciones involucradas en la administración de este emblemático Monumento Nacional chileno, fueron los principales factores por los cuales la Basílica del Salvador no se recupera y quedase en el olvido.

---

<sup>7</sup> Somos9. 2011, "El terremoto que azotó la zona central de Chile en 1985 ocurrió en un día como hoy", *Victoria de Chile*, consultado 6 de Mayo 2015, < <http://somos9.cl/2012/03/03/el-terremoto-que-azoto-la-zona-central-de-chile-en-1985-ocurrio-en-un-dia-como-hoy/>>.



Fotografía.4: Vista fachada sur de la Basílica del Salvador en estado de abandono antes del sismo 2010<sup>8</sup>.

- Cuarto evento sísmico 2010:

En el año 2010, se produce un sismo más devastador en comparación con el del año 1985. La magnitud fue de 8.8 escala Richter o XI en escala modificada de Mercalli. Los daños económicos en la zona Centro-Sur del país fueron cuantiosos.

El movimiento sísmico es acompañado de un tsunami que afectó prácticamente a la totalidad del borde costero del país e islas del Océano Pacífico e incluso afectando a Oceanía, Asia e islas del Pacífico Norte.

La Basílica del Salvador no fue reparada y rehabilitada a tiempo lo que produce daños cuantiosos que ponen en peligro directo su estabilidad. Se pierden 3 pilares fundamentales para el sostenimiento de la estructura y se debilitan los arcos de los sostenimientos laterales junto con ornamentación interior.

---

<sup>8</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.



Fotografía.5: Vista fachada sur-poniente luego del sismo del año 2010<sup>9</sup>.

Si se compara la fotografía 2 con la 5, se puede observar la destrucción del año 1985 con los efectos del sismo de 2010.

## 1.2. HISTORIA DE LA CAL.

Los primeros registros de los morteros de cal deben ser observados de acuerdo al contexto histórico y se debe hacer la distinción de como los conocemos hoy en día cuya definición actual es la mezcla de uno o varios conglomerantes minerales, áridos y agua, con presencia o no de adiciones y aditivos de acuerdo a su normativa actual en España<sup>10</sup>. El origen de la cal como material de construcción comienza a utilizarse en los inicios de la civilización de acuerdo a (Malinowski, 1991)<sup>11</sup> y Álvarez *et al.* (Citado en Alejandre, 2002).

---

<sup>9</sup> GDA. 2015, "La Basílica El Salvador y casas del casco antiguo de la capital de Chile, resultaron destruidos por el terremoto", consultada 25 de Marzo 2015, <[http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra\\_fotogaleria.html?idgal=7888](http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra_fotogaleria.html?idgal=7888)>.

<sup>10</sup> Asociación Española de Normalización y Certificación. 2011, UNE-EN-459-1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, AENOR, Madrid.

<sup>11</sup> Malinoswski, 1991, citado en Alvarez, J. I., Martín, A., & Casado, P. G. 1995. "Historia de los morteros". *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, número 13, páginas 52-59.

## Neolítico:

Los primeros usos de la cal los podemos encontrar en Nevali Cori actual Turquía alrededor de (10.000 a. J.C - 8.000 a. J.C) y vestigios arqueológicos de Yiftah ubicado al Sur de Galilea, (7.000 a J.C) junto con viviendas neolíticas ubicadas en Mediterráneo Oriental y Europa. Otro indicio claro del uso de la cal se ubica en la antigua Anatolia de Catal Hüyük (Turquía, 6.000 a. J.C.), se utiliza la cal como material ornamental en la decoración de dibujos y pinturas en las paredes de las viviendas<sup>12</sup>. La Máscara de Jericó de cal pulida (7.000 a. J.C) es otro ejemplo del uso de este material en los inicios de la humanidad.

En Mesopotamia se pueden tener registros como un ejemplo de la utilización de la cal en la ornamentación como color blanco, correspondiente al de Ninni Zaza de Mari utilizando la cal como lechada blanca de acuerdo a Graciani (citado en Alejandro 2002) alrededor de (4.000 a. J.C). Pero su uso en la construcción como argamasa para mampostería era aislado.

## Egipto:

Los egipcios emplearon el carbonato de calcio o piedra caliza como material en las pirámides y templos. De acuerdo con Navarro *et al* (2014) *“Existen pocas referencias de su uso como aglomerante, más allá de las pinturas al fresco que decoraban y daban color a los templos y tumbas”*. Si bien el carbonato de calcio se utilizó en Egipto alrededor del año (4.500 a. J.C). Su uso como mortero fue posterior, observando indicios alrededor del año (2.500 a. J.C).

En Europa se puede apreciar el uso de la cal en artefactos de cerámica de épocas del campaniforme español (2.000 a. J.C – 1.500 a. J.C.), La Tène (450 a. J.C.), o las de Auvernier. En Asia los asirios emplearon una mayor variedad de morteros de cal triturada y arena alrededor de (800 a. J.C), de acuerdo a Kranzberg *et al* (citado en Alejandro 2002).

---

<sup>12</sup> Alejandro Sánchez, F. 2002, “Historia caracterización y restauración de morteros”, *Ed. Secretariado de publicaciones, Universidad de Sevilla, Sevilla.*

Claramente el uso de la cal en las viviendas era rudimentario y debemos situar su verdadero desarrollo en la Grecia Clásica.

### **Grecia:**

El uso de la cal por parte de los griegos se desarrolla paralelamente con Mesopotamia y Egipto pero solo se puede observar vestigios de un verdadero mortero de cal utilizado en la edificación a principios del (siglo I a. J.C) y finales del (siglo II a. J.C) en la casa de Delos y Thera. La casa Thera es singular por la utilización de morteros de cal-arena y adición de polvo volcánico<sup>13</sup>. Esta adición genera morteros más estables al agua y con resistencias mecánicas mayores, lo cual se asemeja al material utilizado en la actualidad. *“Este es el verdadero origen de los morteros de cal hidráulicos modernos”* (Alejandre, 2002).

### **América Precolombina:**

Es importante destacar que el desarrollo de la cal en la construcción forma parte integral del hombre, de acuerdo con el desarrollo Europeo y Asiático de la cal podemos destacar que aunque aún no existía intercambio cultural entre Europa con el continente Americano. Los mayas, entre los años (300 d. J.C - 900 d. J.C), usaron la cal en los centros ceremoniales como Copan, Palenque y Chichéntzá, su uso fue de tipo revoque y para la coloración de sus esculturas. Otros pueblos precolombinos como Toltecas, Aztecas e Incas ocuparon la cal en su civilización. Este punto de vista, sugiere que independientemente de la ubicación geográfica, el desarrollo de la cal se extendió en varias culturas aunque no existiera un intercambio de información entre ellas.

Esta reflexión indica que la cal ha formado parte directa a lo largo de la evolución humana.

---

<sup>13</sup> Alejandre, op.cit, 2002.

## **Roma:**

Los romanos transformaron el mortero de cal de los griegos en un aglomerante resistente para construir sus colosales obras de ingeniería. Esta argamasa romana se forma con cal y al ser mezclada con ceniza volcánica (técnica utilizada por los griegos) como adición, o en otras palabras, se agregó puzolana la cual era muy abundante en la península Itálica y entregaba propiedades al mortero romano muy superiores a cualquier otra argamasa de cal creada anteriormente. Un claro ejemplo de la técnica de mampostería de argamasa de cal romana fue la empleada para hacer sus obras hidráulicas<sup>14</sup>. El legado constructivo que dejaron los romanos también se puede apreciar con el libro VIII De Architectura de Vitrubio. El cual describe la mezcla de los materiales y la proporción de una unidad de cal por tres de arena o dos por cinco, según la calidad de la arena.

El libro De Aqueductu Urbis Roma de Frontino es otro escrito importante que detalla el estilo de la construcción romana y su relación con la cal.

Con el fin de los romanos, termina la era dorada de la argamasa de cal de la época antigua, ya que decae por las invasiones bárbaras provenientes de Asia y la técnica es olvidada pero protegida en los escritos monásticos.

Los morteros medievales son de una calidad mala y poco homogénea dejando en claro que solo en el Renacimiento se logra mejorar su calidad de producción y es en esta etapa de la historia, cuando la argamasa de cal recobra su calidad y su origen fue en la Italia renacentista.

La cal en el siglo XVI comienza a ser utilizada como elemento estructural volviendo a imitar la mezcla Romana generando una revolución en las obras, se logra mayor complejidad en los proyectos y alturas nunca antes presenciadas por el hombre.

---

<sup>14</sup> Irujo, MAM 2004, "De hidráulica romana: el abastecimiento de agua a la ciudad romana de Andelos", *Trabajos de arqueología número 17*, Navarra.

Sólo en el siglo XVIII nace el aglomerante hidráulico, o sea un mortero en base a cal capaz de reaccionar químicamente con agua, este comúnmente se denominó cal hidráulica. Su estudio fue desarrollado en el año 1756 por Smeaton encargado de construir el faro de Eddyston Plymouth. Posteriormente Vicat en el año 1812, relaciona los índices de hidraulicidad controlando la calidad de la cal hidráulica pero en el año 1824, Joseph Aspdin desarrolla el cemento Pórtland y se reemplaza a la cal como aglomerante estructural.

### 1.3. LA CAL.

Se analizará la cal de forma introductoria al trabajo de investigación para comprender el material en estudio, debido a sus propiedades que posee y características como material de construcción, el cual hoy en día no se utiliza mayormente como un aglomerante estructural en la obras de edificación.

Según (Fernández ,2014)<sup>15</sup> el mortero de cal posee un pH básico observando buenas resistencias mecánicas en períodos de tiempos prolongados, ausencias de retracción, buena plasticidad, trabajabilidad, gran permeabilidad al vapor de agua, buena resistencia a la penetración del agua de lluvia, buen aislamiento acústico y térmico, ausencia de eflorescencias, producto desinfectante y fungicida natural.

Cano *et al.* (2000), explica la clasificación de la cal, la cual se denomina como dos productos diferentes: Cal viva y cal apagada o hidratada.

- **Cal viva:**

La cal viva procede de la calcinación de piedra caliza y se compone de óxido de cálcio (CaO). Los procesos industriales para la producción de la cal viva comienzan en grandes hornos los cuales se somete a la piedra caliza a

---

<sup>15</sup> Fernández Aller, R. 2014, "Estructura de la producción de cal en España" en Alejandro Sánchez, F, et al. *La cal: investigación patrimonio y restauración*, Sevilla: Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla.

temperaturas de alrededor de los 900°C<sup>16</sup> o 1050°C<sup>17</sup> como mínimo para que ocurra la reacción química y a temperaturas de 1100°C para que el núcleo de la piedra caliza pura logre reaccionar, la cal hidráulica reacciona alrededor de los 1200 °C. Esta reacción química libera el dióxido de carbono con las moléculas de cal, convirtiéndose así en cal viva (CaO). La cal viva al momento de agregar agua reacciona químicamente liberando una gran cantidad de energía calórica, la reacción química exotérmica genera un aumento de temperatura que puede llegar hasta 400°C. Este proceso se conoce como proceso de hidratación y su ecuación química es:



- **Cal apagada:**

La cal apagada o hidratada es el resultado de agregar agua a la cal viva para hidratar el óxido que forma hidróxido cálcico, Ca(OH)<sub>2</sub>. El hidróxido de calcio producido es capaz de captar el CO<sub>2</sub> del aire, acción conocida como carbonatación, proceso fundamental para que adquiera resistencias mecánicas. La reacción química es acompañada con un aumento de la temperatura de acuerdo a la siguiente ecuación:



De esta forma, el carbonato de calcio vuelve a adquirir las propiedades mecánicas que poseía originalmente en su estado natural o sea en roca.

El proceso de carbonatación es vital para que la pasta de cal adquiera resistencias mecánicas y propiedades de durabilidad en los morteros de cal. La absorción de CO<sub>2</sub> es un factor importante para considerar a la cal como un

---

<sup>16</sup> Arandigoyen, M & Álvarez, J.I. 2006, "Materiales de construcción volumen 56 número 281", Ed. CSIC, Madrid.

<sup>17</sup> Cano Guillén J, Garzón Garzón, E & Marín Valiño, B. 2000, "La Cal Como Aglomerante", Ed. Servicio de Publicaciones, Universidad de Almería, Almería.

producto que favorece a la reducción de estas emisiones las cuales produce efecto invernadero.

El parámetro de carbonatación puede ser medido independientemente del proceso de secado, se estima que la relación entre el proceso de carbonatación y la variable agua/cal está relacionada con la microestructura de la cal en sí, pero no tiene relación con las propiedades resistentes. La cal tiene porosidad en su microestructura y cuando comienza el proceso de carbonatación comienza otro proceso denominado Fick o Knudsen<sup>18</sup>, cuya definición es:

*“El agua no es retenida por capilaridad sino por adsorción sobre la superficie. El proceso de secado no retrasa la carbonatación en las pastas de cal”.* De acuerdo a (Álvarez, J, I et al. 2006).

El agua sólo actúa en la cal hidratándola pero no toda esta agua va a hidratar, el Fick sirve como un factor de trabajabilidad en la cal y el agua se evaporará de la superficie de la microestructura. Por esta razón la cal apagada en contacto con el agua genera una pasta homogénea que favorece únicamente a la trabajabilidad para ser aplicada. Solo podrá influir de forma negativa en la captación de CO<sub>2</sub> sobre el hidróxido de cálcio si este último se encuentra completamente saturado de agua evitando así la incorporación de CO<sub>2</sub>.

- **Cal hidráulica**

Cal compuesta principalmente de silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos e hidróxido cálcico. Es un producto de la calcinación de calizas con índices arcillosos. El compuesto se hidrata, tritura y/o mezcla con hidróxido cálcico. La cal hidráulica, es llamada de esta manera por que reacciona químicamente con el agua y el dióxido de carbono que otorga el endurecimiento y las propiedades mecánicas. La cal hidráulica posee un índice de hidraulicidad (I), el cual es la

---

<sup>18</sup> Alvarez, J, I, & Arandigoyen, M. 2006. “Proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación agua/conglomerante”. *Materiales de construcción*, (281), 5-18.

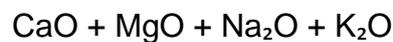
proporción entre los porcentajes de arcilla y los porcentajes de carbonato. Estos porcentajes son determinantes en lo que respecta a la calidad del aglomerante y se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$I = \frac{\% \text{ Arcilla}}{\% \text{ Carbonato}}$$

El % de arcilla posee los siguientes compuestos químicos:



El % de carbonato posee los siguientes compuestos químicos:



La hidraulicidad se determina en los altos hornos, los cuales a temperaturas muy elevadas varía las proporciones como también la naturaleza de los componentes de la piedra caliza. Estas son las variables que determinan este índice y el grado de la calidad del material para adquirir resistencias mecánicas.

Si la cal hidráulica posee mayor cantidad de componentes arcillosos en menor proporción a los carbonatos aumenta el valor del índice y se obtienen cales hidráulicas más fuertes en lo que respecta a las resistencias mecánicas.

Si la cal hidráulica posee menor cantidad de componentes arcillosos y mayor proporción de carbonatos, disminuye el índice y bajan las resistencias mecánicas de la cal.

Antes de los estudios de Vicat, en las canteras de piedra caliza, se lavaban las arcillas ya que se consideraba un elemento de escoria, lo cual no permitía obtener el índice de hidraulicidad adecuado, ya que tendía a cero y por ende un producto con bajas propiedades a la resistencia mecánicas y muy permeable.

Se puede realizar una clasificación de acuerdo a los tipos de cal para construcción con respecto a los contenidos de (CaO y MgO)<sup>19</sup> y en el caso de cales con propiedades hidráulicas según su resistencia a la compresión.

La norma UNE-EN 459-1; 2011 clasifica la cal de acuerdo a:

• Cal de alto contenido en calcio	90	CL 90
• Cal de alto contenido en calcio	80	CL 80
• Cal de alto contenido en calcio	70	CL 70
• Dolomía calcinada	85	DL 85
• Dolomía calcinada	80	DL 80
• Cal hidráulica	2	HL 2
• Cal hidráulica	3,5	HL 3,5
• Cal hidráulica	5	HL 5

Los ensayos físicos descritos en la norma UNE- EN 459 -2 para los controles de calidad en los morteros de cal se puede clasificar en:

- |                                 |                                         |
|---------------------------------|-----------------------------------------|
| 1.-Resistencia a la compresión. | 2.-Finura.                              |
| 3.-Estabilidad de volumen.      | 4.-Tiempos de fraguado.                 |
| 5.-Retención de agua.           | 6.-Determinación del contenido de aire. |
| 7.-Densidad aparente.           | 8.-Rendimiento.                         |
| 9.-Reactividad.                 | 10.-Agua libre.                         |

#### **1.4. CRITERIOS DE RESTAURACIÓN E INTERVENCIÓN.**

Para generar un procedimiento técnico de trabajo al problema de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador. En primera instancia, se debe comprender el significado de restaurar un edificio con carácter patrimonial, el cual se analizará de forma introductoria.

---

<sup>19</sup> Cano, op.cit, 2000.

El concepto de intervención del patrimonio arquitectónico histórico tiene su origen en las Directrices llamadas Cartas Internacionales o Cartas de Restauo en el año 1883 por Camilo Boito de cumplimiento necesario para un monumento y su conservación<sup>20</sup>. En el año 1931 la Sociedad de la Naciones aprueba en la conferencia de Atenas criterios similares a las Cartas de Restauo. Aceptándolas y utilizándolas como base de los criterios de restauración. Posteriormente en el año 1933, el Comité Internacional de Arquitectura Moderna elabora un documento o carta con solo 6 puntos de restauración de 95 tratados. Washington en su tratado en el año 1935 firma lo que se denomina Tratados de Salvaguardia del Patrimonio en el caso de un conflicto bélico. En el año 1964, la carta de Venecia se inspira en la carta de Atenas. Esto genera un consenso en aplicar técnicas modernas siempre y cuando las tradicionales sean inadecuadas y por homologación científica. En el año 1972, el Ministerio de Instrucción Pública de Italia aplica los criterios de restauración a todo edificio patrimonial a intervenir. Siendo de carácter obligatorio la documentación e investigación científica de la edificación en cuestión. En el año 1975, se crea la carta Europea del Patrimonio Arquitectónico y es adoptada en Europa.

UNESCO crea con carácter universal el concepto de “Patrimonio de la Humanidad” para salvaguardar el patrimonio Histórico. Los criterios de restauración de la UNESCO se inspiran en Las Cartas de Restauo y son de carácter internacional. En Europa la Comunidad Europea aprueba el proyecto EUREKA para la conservación y mantención del patrimonio histórico europeo.

En el año 1985, España crea la Ley de 25 de junio de 1985 sobre el Patrimonio Histórico Español y en el año 1987 se incorpora al proyecto EURO CARE gracias al Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. El Centro Para El Desarrollo Tecnológico Industrial facilita la financiación para proyectos de intervención en edificios históricos.

---

<sup>20</sup> Coscollano Rodríguez, J. 2003, “Restauración y Rehabilitación de Edificios”, *Ed. Thomson paraninfo*, Madrid.

Las Comunidades Autónomas crean diversas iniciativas para salvaguardar el patrimonio histórico arquitectónico regional complementando las reglamentaciones españolas. Como la Ley del Patrimonio Histórico de Andalucía.

Para el caso de la Basílica del Salvador y en ausencia de una normativa eficaz de restauración y de correcta aplicación en el caso de Chile. Debemos seguir los criterios generales recomendados por UNESCO y un procedimiento particular de acuerdo a Las Cartas de Restauro que son la base para intervenir un edificio patrimonial y aceptado ampliamente:

*“Recomendación sobre la conservación de los bienes culturales que la ejecución de obras públicas o privadas pueda poner en peligro”.*<sup>21</sup>

Los siguientes criterios son generales y extraídos de la recomendación de UNESCO:

- La conservación debe extenderse en todo el territorio.
- Se debe realizar un inventario completo de las obras de carácter cultural patrimonial.
- Se debe tener en cuenta la importancia relativa de los bienes culturales de que se trate al determinar las medidas necesarias. Para salvar los bienes culturales cuando la zona en que están situados haya de ser transformada para la ejecución de obras públicas o privadas y cuando tales bienes o parte de ellos hayan de ser conservados y trasladados.
- Las disposiciones preventivas y correctivas deberían tener por finalidad proteger o salvar.

---

<sup>21</sup> UNESCO.

- Los Estados Miembros deberían dar prioridad a las medidas necesarias para la conservación *in situ* de los bienes culturales que corran peligro como consecuencia de obras públicas o privadas, para mantener así la continuidad y las vinculaciones históricas de tales bienes.
- Los resultados de los estudios de interés científico o histórico que se hayan realizado en relación con trabajos destinados a salvar bienes culturales, en especial cuando todos o gran parte de los bienes culturales inmuebles hayan sido abandonados o destruidos, deberían publicarse o ponerse de algún otro modo a disposición de los investigadores futuros.
- Los Estados Miembros deberían prever la consignación de los fondos necesarios para conservar o salvar los bienes culturales que la ejecución de obras públicas o privadas y abandono que pueda poner en peligro.
- Cuando los costos fuesen excepcionalmente elevados, por la magnitud y la complejidad de los trabajos necesarios, debería haber posibilidades de obtener fondos suplementarios en virtud de leyes adecuadas, mediante subvenciones especiales, con un fondo nacional pro monumentos u otros medios apropiados. Los servicios encargados de la protección de los bienes culturales deberían estar facultados para administrar o utilizar los créditos extra-presupuestarios necesarios para conservar o salvar los bienes culturales puestos en peligro por la realización de obras públicas o privadas y por abandono.

De acuerdo a (Coscollano, 2003). Las Cartas de Restauro son ampliamente adoptadas por especialistas como Gaetano Miarelo - Mariani y resumidas en 5 puntos fundamentales:

1.-Intervención mínima.

2.-Respetar la autenticidad.

3.-Diferenciar lo existente y lo restaurado.

4.-Rechazar reglas generales, asumiendo la individualidad de cada restauración.

5.-Limitar las intervenciones a casos de verdadera necesidad.

Estos conceptos se deben aplicar de acuerdo a una metodología de trabajo referente a utilizar un mortero de cal y en un edificio a intervenir como es el caso de la Basílica del Salvador.

## 1.5. RESUMEN INTRODUCCIÓN.

A modo de síntesis se resume el desarrollo de la introducción:

Historia de la Basílica del Salvador:

Hito	Año	Descripción
Incendio de la Iglesia de la Compañía	1863	Se requiere reemplazar el templo
Encargo de construcción	1864	Inicio de obra gruesa y problemas presupuestario
Reinicio de los trabajos	1873	Problemas económicos
Se termina en parte la obra gruesa	1888	Se termina la cubierta
Fin de obra gruesa	1892	Concluyen los trabajos de la estructura
Sismo	1906	Refuerzo con amarras metálicas en el coronamiento
Termino de ornamentación	1920	Destacan obras de artistas chilenos y extranjeros
Sismo	1927	Dstrucción leve de la estructura y ornamentación. Se encarga reparación y construcción de la fachada norte
Papa Pío XI	1938	Se eleva el templo al rango de Basílica
Monumento Nacional	1977	Se protege bajo las normativas de patrimonio histórico arquitectónico
Terremoto	1985	Se destruye en un alto grado la estructura y ornamentación. Se refuerza de forma provisoria la estructura y pasa al olvido la edificación
Terremoto	2010	Se destruyen los sostenimientos fundamentales y peligra la estabilidad estructural
Encargo de refuerzo estructural	2014	Se encarga un refuerzo estructural anti-sísmico sin integrar un plan general de restauración

Tabla 1: Resumen cronológico de la Basílica del Salvador. Ed. Autor.

## Historia de la Cal:

Ubicación geográfica o época	Rango de Tiempo	Descripción
Neolítico	10.000 a.J.C - 8.000 a.J.C	Primer uso en edificaciones: Nevali Cori (Turquía), vestigios arqueológicos urbanos.
Neolítico	7.000 a.J.C	Yiftah (Galilea), Europa, Mediterráneo Oriental, uso en viviendas.
Neolítico	6.000 a.J.C	Catal Hüyük (Turquía), uso ornamental urbano.
Mesopotamia	4.000 a.J.C	Ninni Zaza de Mari (Mesopotamia), uso aislado como manpostería.
Egipto	4.500 a.J.C - 2.500 a.J.C	Uso para decoración y pintura. Se construye de forma aislada con morteros de cal.
Europa	2.000 a.J.C - 450 a.J.C	Campaniforme español, La Tène y Auvernier, uso en cerámicas.
Asia	800 a.J.C	Asirios. Utilizan cal triturada combinada con arena de forma aislada.
América Precolombina	300 d.J.C - 600 a.J.C	Totecas, Aztecas e Incas utilizan la cal como revoque.
Grecia	200 a.J.C - 100 a.J.C	Casa de Delos y Thera, se observan los primeros morteros de cal-arena.
Roma	27 a.J.C - 476 d.J.C	Libro VIII De Architectura de Vitruvio (Prueba material de la estandarización de la cal como producto de construcción). Nace la cal combinada con puzolana y con propiedades hidráulicas.
Invasiones Bárbaras	476 d.J.C	Perdida del uso masivo de la cal en la construcción.
Edad Media	500 d.J.C - 1.500 d.J.C	Fabricación de morteros poco homogéneos y de calidad baja.
Edad Moderna	1.600 d.J.C	Renacimiento de la cal y búsqueda del conocimiento perdido de la época antigua.
Edad Moderna	1756 d.J.C	Smeaton: Construye el faro de Eddyston Plymouth. Observa el índice de hidráulicidad.
Edad Moderna	1812-1824 d.J.C	Vicat: Corroboró estudios anteriores y elabora una relación directa del índice de hidráulicidad de la cal con elementos arcillosos.
Edad Moderna	1824 d.J.C	Joseph Aspdin: Desarrolla el cemento Portland. Se inicia la transición y reemplazo de la cal por el cemento Portland.

Tabla 2: Resumen Cronológico de la Historia de la Cal. Ed. Autor.

## Características y Propiedades de la Cal:

Material	Composición Química	Tipo de Extracción	Producción	Ventajas	Desventajas
CAL	CaCO <sub>3</sub>	Fragmentación y trituración	Alto horno Si se detecta arcilla se puede producir cal hidráulica	Alta resistencia mecánica en largos períodos de tiempo	Baja resistencia mecánicas en cortos períodos de tiempo Permeable al vapor de agua
				Ausencias de retracciones	
				Buena plasticidad	
				Buena trabajabilidad con una baja dosis de agua	
				Impermeable al vapor de agua si es cal hidráulica	
				Aislante acústico	
				Aislante térmico	
				Produce baja eflorescencia	
				Desinfectante y fungicida	
				pH básico	
Capta CO <sub>2</sub> en su proceso de carbonatación					

Tabla 3: Resumen Propiedades y características de la cal. Ed. Autor.

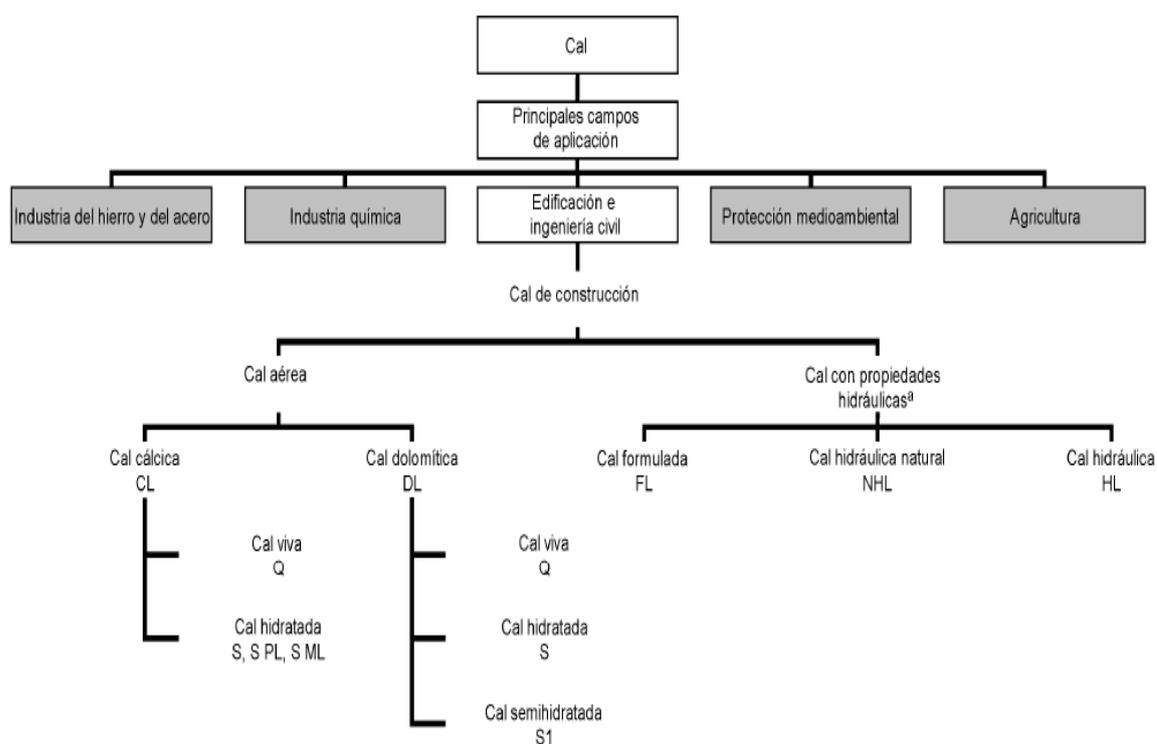
Clasificación de Clase de Cal	Composición Química Inicial	Proceso	Producción	Composición Química Final
Cal viva	CaCO <sub>3</sub>	Calcinación en alto horno liberando CO <sub>2</sub>	900°C - 1100°C	CaO
Cal apagada	CaO	Hidratación	H <sub>2</sub> O	CaO + H <sub>2</sub> O = Ca(OH) <sub>2</sub> + calor
Cal final	Ca(OH) <sub>2</sub>	Carbonatación	CO <sub>2</sub> + tiempo	Ca(OH) <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> + tiempo = CaCO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O

Tabla 4: Resumen de la clasificación de la cal y sus procesos químicos. Ed. Autor.

Cal Hidráulica	Composición	Característica de Producción	Índice Hidráulico	Compuestos Químicos Arcilla	Compuestos Químicos Carbonatos
	Silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos e hidróxido cálcico	Calcinación de caliza con índices de arcillas	$I = \% \text{Arcillas} / \% \text{Carbonatos}$ Si el índice es alto las cales son más resistentes	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

Tabla 5: Resumen de cal hidráulica. Ed. Autor.

### Tipos de cal utilizadas en la edificación en España:



#### Leyenda

Q Cal viva en polvo seco o terrón  
 S Cal hidratada en polvo seco  
 S1 Cal semihidratada en polvo seco  
 S PL Cal en pasta  
 S ML Lechada de cal

<sup>a</sup> Cal con propiedades hidráulicas se produce en forma de polvo

No cubierto por esta norma

Diagrama 1: Representación esquemática de los tipos de cal y los campos de aplicación<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> Asociación Española de Normalización y Certificación 2011, UNE-EN-459-1 Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, Anexo, AENOR, Madrid.

## El origen de la restauración e intervención:

Cronología sobre la Intervención del patrimonio arquitectónico			
Año	Propuesta	Autor	Observación
1883	Cartas Internacionales o cartas de restauro.	Camilo Boito.	De cumplimiento necesario para un monumento y su restauración.
1931	Se aprueban las cartas de restauro.	Sociedad de las Naciones.	Base de los criterios de restauración.
1933	Carta con 6 criterios de restauración de 95 tratados.	Comité Internacional de Arquitectura Moderna.	Se aprueban algunos criterios.
1935	Tratados de Salvaguardia del Patrimonio.	EE.UU, Washington.	En caso de un conflicto bélico.
1964	Carta de Venecia.	Italia.	Genera consenso para aplicar técnicas modernas en la restauración. Siempre y cuando las tradicionales sean inadecuadas y por homologación científica.
1972	Ministerio de Instrucción Pública aplica criterios de restauración a todo edificio patrimonial.	Italia.	Intervenir es también investigación científica de la obra y recopilación histórica.
1975	Carta Europea del Patrimonio Arquitectónico.	Europa.	Se aplica en todo el continente Europeo.
	Se crea concepto de Patrimonio de la Humanidad.	UNESCO.	La preocupación sobre los monumentos arquitectónicos es global.
	Proyecto EUREKA.	Comunidad Europea.	Conservación y mantención del patrimonio histórico europeo.
1985	Ley de 25 de junio de 1985.	España.	Sobre el Patrimonio Histórico Español.
1987	Proyecto Eurocare .	Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.	España gestiona financiación de forma pública para iniciativas sobre patrimonio y su conservación.
El presente	Comunidades Autónomas crean diversas iniciativas para salvaguardar el patrimonio histórico arquitectónico regional.		

Tabla 6. Resumen sobre cronología de criterios de restauración y su desarrollo en el tiempo. Ed. Autor

## 2. ESTADO DEL ARTE

Luego del sismo en 1985 que afecta a la ciudad de Santiago de Chile y en especial a la Basílica del Salvador, en el período de tiempo comprendido entre los años 1985 y 2010 existieron escasas propuestas de investigación relacionadas en generar un trabajo de restauración y rehabilitación. Los organismos públicos y en especial el Arzobispado de Santiago gestor del edificio patrimonial no logran reunir los fondos necesarios para realizar una intervención:

*"Lo que aquí ha fallado es la voluntad política, tanto de la Iglesia como del Gobierno, porque si se hubiese formado un grupo interdisciplinario dedicado al tema lo habrían sacado adelante. Incluso hoy muchas empresas estarían dispuestas a asociar su nombre a la recuperación de esta joya nacional". (Cruz Coke M, 2008)<sup>23</sup>.*

En Julio del año 2006 existe un proyecto de restauración del arquitecto Eugenio Joannon, en conjunto con la oficina de ingeniería de Alfonso Larraín, aprobado por el Consejo de Monumentos Nacionales, pero tal propuesta no se realizó:

*"Cumple todos los estándares internacionales para intervenir un monumento", El punto es que el tiempo apremia, ya que los permisos del Consejo duran sólo tres años. Caduca el 6 de julio de 2009"<sup>24</sup>. (Matzner, 2009).*

En el año 2010, se produce el sismo que afectó gravemente a la zona Centro-Sur de Chile, dañando gravemente a la Basílica del Salvador sin que se logre intervenir la edificación a tiempo. Después de este hecho, recobra importancia y se comienzan a generar iniciativas de rehabilitación para este edificio patrimonial emblemático de la ciudad de Santiago junto con investigación

---

<sup>23</sup> <sup>24</sup> Goycoolea, L, U. 2008, "23 años de buenas intenciones con ningún resultado: La lenta agonía de la Basílica del Salvador" versión online Iglesia.cl conferencia episcopal de Chile, El mercurio, fecha de consulta, Julio 2015,< <http://recortes.iglesia.cl/recorte.php?id=9151>>.

científica. Estas iniciativas de intervención estructural en la Basílica del Salvador solo proponen salvaguardar únicamente la estabilidad de la edificación y generar un refuerzo estructural<sup>25</sup>. Pero no se contempla un estudio multidisciplinario en el cual se proponga e integre una reparación para el problema de grietas y fisuras en los muros existentes de la Basílica. Este aspecto no es considerado y debe ser investigado para generar una reparación adecuada en una edificación con características patrimoniales únicas.

En España, se observan numerosos estudios de morteros de cal para rehabilitación del patrimonio arquitectónico<sup>26</sup>, como las referencias de trabajos de fin de máster<sup>27</sup> e investigación impulsada por la Universidad de Sevilla<sup>28</sup>.

Se distinguen diversos estudios sobre ensayos en morteros de cal y variadas fuentes de información. Un ejemplo de ello son los trabajos de investigación sobre el empleo de morteros de cal y su intervención en el patrimonio arquitectónico<sup>29</sup>.

Con respecto a la caracterización de la cal, se puede observar investigación de tesis doctoral<sup>30</sup>, en la cual se realizan múltiples ensayos por microscópico óptico de áridos, análisis de las propiedades mecánicas en morteros, difracción de rayos X en morteros de cal caracterizados en laboratorio, efecto hidráulico por ensayo hídrico, ensayos de solución salina, evaluación mediante análisis termogravimétrico y aplicación por microscopio electrónico de barrido.

---

<sup>25</sup> Bozzi, op.cit, 2013.

<sup>26</sup> Luxán, M. P. D., & Dorrego, F. 2004. Caracterización y selección de morteros en la restauración de la Portada de los Reyes (Benavente, Zamora). *Materiales de Construcción*, 54(273), 35-44.

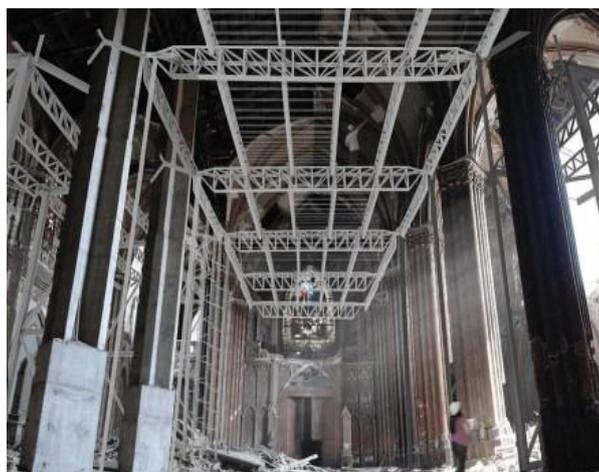
<sup>27</sup> Gozávez Nuevo, A. 2010, "Estudio de los morteros de cal: idoneidad en la rehabilitación del patrimonio arquitectónico", Ed. *Universidad de Sevilla*, Trabajo de fin de master, Sevilla.

<sup>28</sup> Alejandro Sanchez, F, et al. 2014, "La cal: investigación patrimonio y restauración", Ed. *Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla*, Sevilla.

<sup>29</sup> Barluenga, B, G, Laca, R, L, Undurraga, R, & Estirado, F. 2011. "Estudio de los paramentos del Patio de Santo Tomás del Colegio Mayor de San Ildefonso", Universidad de Alcalá, Alcalá

<sup>30</sup> Cazalla Vázquez, O. 2002, "Mortero de cal: aplicación en el patrimonio histórico", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada.

Se han organizado congresos sobre ensayos de cal<sup>31</sup> en los cuales se desarrollan caracterizaciones y comparaciones de morteros de cal para ser utilizados en reparaciones de edificaciones patrimoniales. Otros aspectos de estudio son los ensayos sobre las unidades de ladrillo procedentes de albañilerías patrimoniales<sup>32 33</sup> o ensayos sobre albañilerías de ladrillo y argamasa de cal patrimonial en conjunto<sup>34</sup>. Una propuesta de reparación de patologías de grietas y fisuras en albañilería de ladrillo y aglomerante de cal, debe contemplar los aspectos relacionados sobre la investigación de un diagnóstico de grietas y fisuras, estudiar los materiales a intervenir caracterizando y observando su correcta homologación para formular una dosificación de un mortero de cal. El aporte de esta investigación será en como determinar una propuesta para la solución de patologías de grietas y fisuras en Basílica del Salvador complementando la iniciativa del refuerzo estructural propuesto y en inicio de ejecución.



Fotografía 6: Obras iniciales de refuerzo estructural <sup>35</sup>.

---

<sup>31</sup> Boffil, Y, Blanco H, Lombillo, I, Villegas, L & Thomas, C. 2014. "Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos", Congreso Latinoamericano REHABEND, Santander.

<sup>32</sup> Galindo Díaz, J, A. (2008). "Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán", Revista ingeniería e investigación vol n°28 pág. 15.-21, Colombia.

<sup>33</sup> Fort, R, Álvarez de Buergo, M, López de Azcona, M, C, Mingarro, F, Varas, M, J & Soriano, J. 2004, "Caracterización de la fábrica de ladrillo del Palacio del Infante Don Luis, Boadilla del Monte", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 43(2), pág. 578-582, Madrid.

<sup>34</sup> Valenzuela Solís de Ovando, C, 1991. "La construcción en Chile cuatros siglos de historia", Cámara chilena de la construcción, Santiago.

<sup>35</sup> Diario U Chile cultura. 2015, "Basílica del Salvador: El símbolo del abandono patrimonial será restaurado", consultada 9 de Agosto 2015, <<http://radio.uchile.cl/2015/03/08/basilica-del-salvador-el-simbolo-del-abandono-patrimonial-sera-restaurado>>.

### 3. OBJETIVOS

- **Objetivo General:**

1.- Proponer una reparación para solucionar las patologías de grietas y fisuras en albañilería de ladrillo y aglomerante de cal presentes en la Basílica del Salvador en Santiago de Chile.

- **Objetivos Específicos:**

1.- Investigar el estado actual de la Basílica del Salvador.

2.- Realizar un diagnóstico de las patologías de grietas y fisuras.

3.- Realizar un estudio de las propiedades y características de la albañilería de ladrillo y aglomerante de cal por medio de una caracterización de los materiales.

4.- Proponer un mortero reparador dosificado para la solución de las patologías de grietas y fisuras.

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología empleada para desarrollar la presente investigación se dividió en fases de trabajo, con el propósito de cumplir con el objetivo general y objetivos específicos propuestos:

a) La Basílica del Salvador en Santiago de Chile:

En este primer análisis se realizó un estudio histórico bibliográfico sobre el estado actual de la edificación y la cal junto con la investigación de sus características y propiedades principales. Además, se considera que desde un punto de vista metodológico, es fundamental estudiar e integrar los criterios de restauración básicos y de forma introductoria para así desarrollar una propuesta de reparación adecuada a una obra con características patrimoniales.

b) Diagnóstico de patologías de grietas y fisuras:

Se estudiarán las patologías de grietas y fisuras producidas en la edificación, identificando las diferentes clases y su origen en la Basílica. Este estudio se complementará con un apoyo fotográfico observando la tipología de daño que afecta a los muros de albañilería por consecuencias de estas patologías.

c) Caracterización de albañilería de ladrillo y argamasa de cal:

Se analizarán las propiedades y características de la albañilería de ladrillo de argamasa de cal de acuerdo a trabajos experimentales de caracterizaciones efectuadas en la Basílica del Salvador. La investigación de caracterización se complementará por medio de una recopilación bibliográfica teórica de ensayos y referencias de trabajos experimentales. El procedimiento de caracterización corresponde a la metodología utilizada en el Templo de la Catedral de Pamplona por a Alvarez, J.I, *et al.* (1997), que entrega un procedimiento general para caracterización en edificios patrimoniales de morteros de cal.

Además se observan otras sugerencias de caracterización en morteros de cal para ser utilizados como mortero reparador de acuerdo a (Espinosa, 2014). Siendo este método solamente utilizado para complementar la caracterización general.

#### d) Dosificación:

La dosificación del mortero reparador se realizará por medio del estudio de caracterización de los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal, determinando los materiales más idóneos para generar una correcta propuesta para la solución de patologías de grietas y fisuras. La fusión del mortero reparador y los muros de cal de la Basílica del Salvador deberá generar un comportamiento homólogo entre ambos materiales. Así, realizar una reparación adecuada que no produzca problemas físico, químicos y/o mecánicos. La discriminación y propuesta de materiales constituyentes en la respectiva dosificación se realizará mediante la investigación bibliográfica de ensayos caracterizados de acuerdo a la metodología empleada por (Luxán, M, P. *Et al*, 2004), que define criterios para utilizar un mortero de cal sobre un elemento patrimonial y las recomendaciones necesarias para su correcto empleo.

#### e) Propuesta de reparación

La metodología general a utilizar para la propuesta de reparación será de acuerdo a los trabajos efectuados por (Núñez, 2014), el cual sugiere un procedimiento completo para intervenir una obra patrimonial desde su fase preliminar hasta el seguimiento final de lo intervenido. Se escoge este tipo de metodología porque comprende el mantenimiento del edificio a intervenir y luego de que la intervención es producida, se propone la prevención de patologías que lo afectan y que producen su intervención. Se desarrollará una propuesta de reparación específica, la cual solucione las patologías de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador siguiendo la metodología y procedimientos elaborado por (Moreno, 2009).

#### 4.1. RESUMEN DE METODOLOGÍA

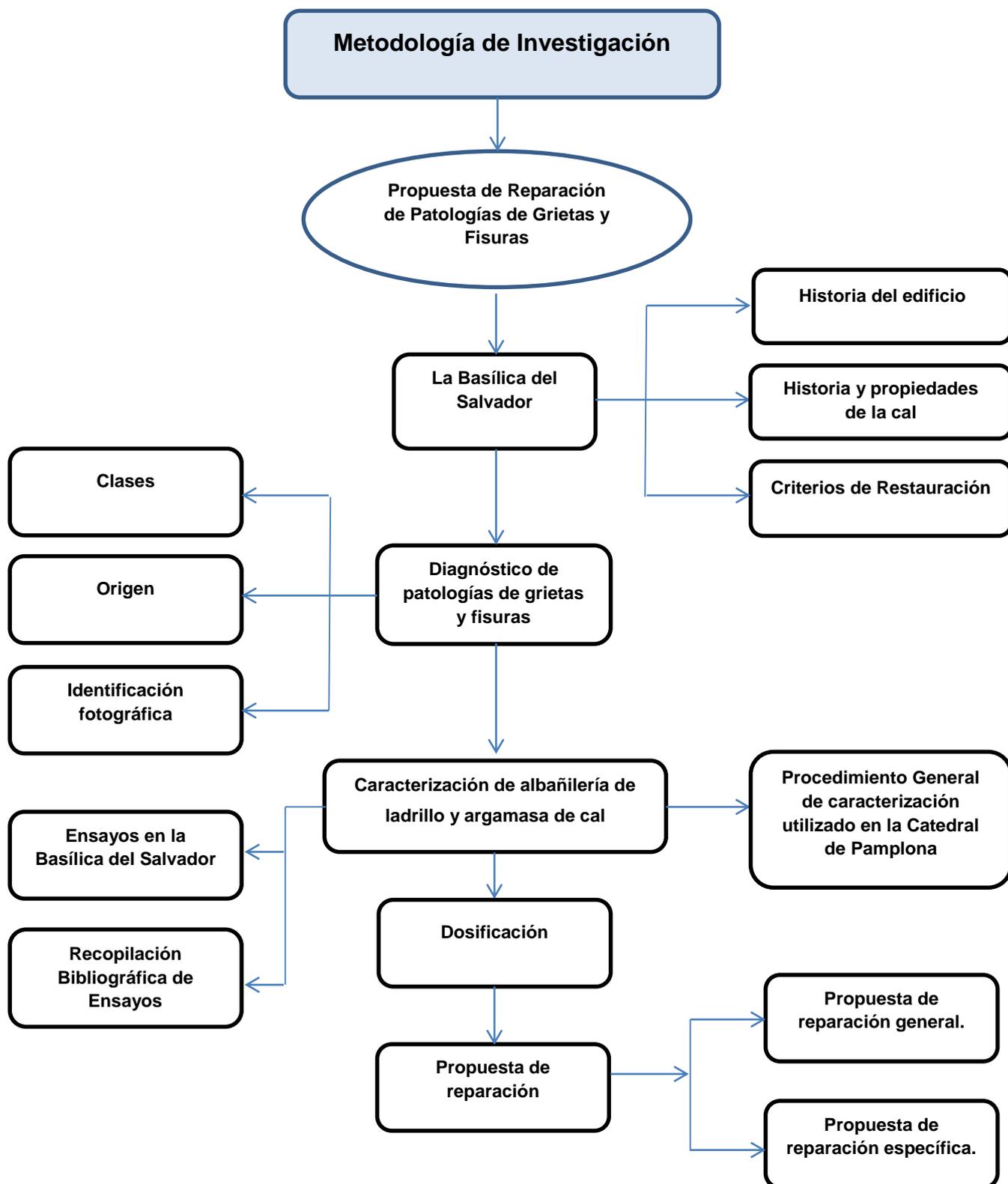


Diagrama 2: Representación esquemática de la metodología de investigación. Ed. Autor.

## **II. DESARROLLO DEL TRABAJO.**

### **5. DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS.**

Se debe comprender la tipología de grietas y fisuras para generar una correcta solución en los muros de albañilería. Lo cual, se debe determinar, el origen de la patología, clasificación y análisis para su posterior solución.

#### **5.1. CLASIFICACIÓN DE GRIETAS Y FISURAS EN ALBAÑILERÍA.**

Las grietas en la albañilería de la Basílica del Salvador se pueden clasificar en dos grupos, grietas de carácter estructural y fisuras sin un compromiso estructural:

##### **1.- Grietas estructurales:**

Las grietas de carácter estructural son aquellas ocasionadas principalmente por los sismos del año 1985 y 2010. Los cuales destruyeron parte de la estructura y por ende debilitaron el sostenimiento de la estructura de ladrillo y mortero de cal.

La estructura no estaba correctamente diseñada para soportar las sollicitaciones sísmicas produciendo grietas de carácter grave que dejan en peligro la estabilidad en la edificación.

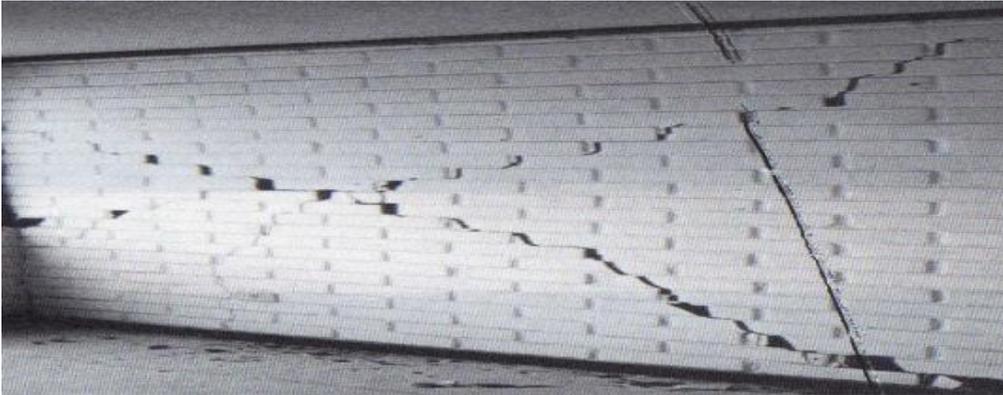
Las grietas de carácter estructural se pueden sub-clasificar de acuerdo a su origen por (Flores, 1993):

- Grietas originadas por fallas del esfuerzo de corte:

Se dividen en dos tipos:

➤ Grietas de corte en sentido diagonal:

Se originan por la acción del esfuerzo de corte producto de la fuerza sísmica, agrietando comúnmente las dos diagonales de la superficie rectangular o diagonalmente un cierto elemento. La resistencia del material no es capaz de soportar la magnitud de la fuerza aplicada.



Fotografía 7: Ejemplo de un muro de albañilería fisurado por corte en sentido diagonal. Después de una sollicitación sísmica en el año 1985<sup>36</sup>.

➤ Grietas de corte en sentido horizontal y vertical:

Se presentan por la acción del esfuerzo de corte, y se producen por bajas propiedades de adherencia entre el mortero y los bloques de ladrillo.



Fotografía 8: Ejemplo de un muro de albañilería fisurado por corte en sentido horizontal y vertical. Después de una sollicitación sísmica en el año 1985<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> <sup>37</sup> Flores, op.cit, 1993.

- Grietas originadas por fallas debido a flexión:

Cuando se producen fallas en la albañilería debido a flexión es favorable con respecto a las fallas de tipo corte, dentro del daño estructural. Debido a que no afecta la resistencia del elemento a las cargas horizontales. Pero cuando la capacidad del elemento que falló por flexión tiene deficiencias importantes a soportar la compresión, lo más probable es que dicho elemento colapse.

- Grietas por aplastamiento:

Generalmente se producen en los encuentros de los muros. La albañilería se pulveriza en los refuerzos.

Independientemente del origen de la grieta, los tipos de daños referentes al comportamiento de una grieta estructural se pueden clasificar en:

1. Grietas pasantes:

Las grietas pasantes influyen notablemente en la estructura haciendo colapsar parte de esta ya que cortan el elemento por completo.

2. Grietas no pasantes:

Las grietas no pasantes no cortan el elemento en su totalidad.

Con respecto a la Basílica del Salvador el daño producido por las grietas de tipo estructural es de una gran magnitud. La categoría de albañilería de la Basílica del Salvador, pertenece a una albañilería reforzada con amarras metálicas antiguas y que difiere en todos los aspectos a la albañilería de ladrillo cerámico y refuerzo de hormigón tradicional. El problema radica en que los refuerzos metálicos fueron ejecutados sin una normativa adecuada y sin suficientes conocimientos sísmicos, claro está, con la tecnología disponible de

la época. Esto contribuyó en forma negativa a que se originaran los problemas estructurales sísmicos actuales.

El tipo de daño más frecuente en el sismo de 1985 y 2010 en Santiago fue el originado por:

- Fallas de esfuerzo de corte con presencias de grietas pasantes y no pasantes.

Con respecto a los daños en la ciudad de Santiago. Los edificios de ladrillo cerámico con alturas superiores a los 2 pisos fueron afectados. Las estructuras de 1 o 2 pisos no se vieron afectadas.

La Basílica del Salvador presentó fallas más graves en los puntos más altos de la estructura, siguiendo la tendencia de que a mayor altura de la edificación, menor es la resistencia al esfuerzo de corte cuando estamos en presencia de una albañilería. Pero el daño se incrementó en la Basílica debido a un inadecuado refuerzo metálico o sea prácticamente albañilería sin confinar, la cual tiene bajas propiedades para soportar la energía sísmica. La albañilería de la Basílica del Salvador falló a la sollicitación sísmica por las causas siguientes:

- Sobre las unidades de ladrillo es difícil precisar si existió una falla estructural por falta de propiedades resistentes en los bloques de ladrillo cuando estos fueron sometidos al esfuerzo sísmico.
- Existe evidencia de que las grietas siguen una trayectoria de la llaga y tendel en las hiladas, o sea, problemas de adherencia entre mortero y ladrillo.
- Un diseño de albañilería sin confinar y con refuerzos metálicos inadecuados. En otras palabras, una albañilería sin refuerzo.
- El sentido del sismo fue lo más desfavorable para el diseño de la estructura.

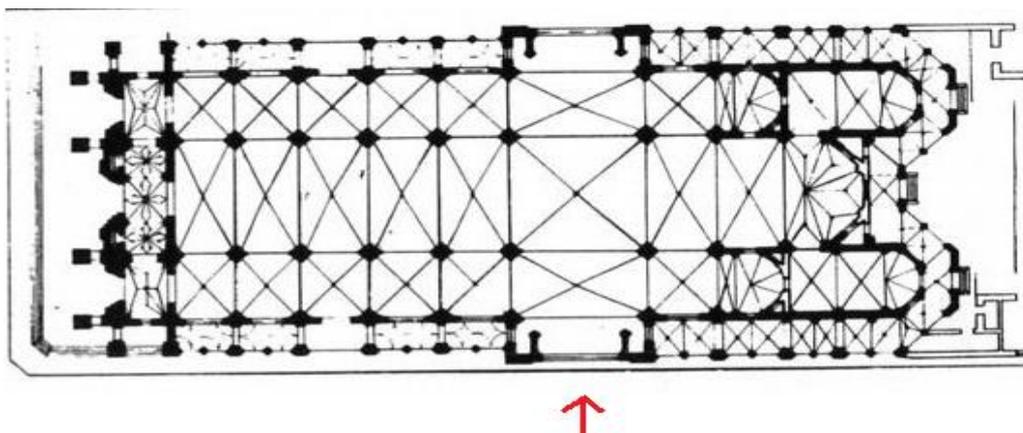


Figura 1: Planta de la Basílica del Salvador y sentido real del sismo del año 1985<sup>38</sup>.

De acuerdo a la figura 1, se ilustra la flecha roja, el sentido desfavorable de la carga sísmica en que la estructura recibió las ondas. El epicentro del sismo del 3 de marzo de 1985 fue en la costa de la ciudad de San Antonio, las ondas viajaron hacia la ciudad de Santiago en dirección (Oeste-Este).

La Basílica del Salvador absorbió la magnitud sísmica por la fachada más desfavorable (Calle Almirante Barroso). Los muros se comportan de forma más adecuada cuando el sentido del sismo es de forma paralela a ellos y no perpendicular a este. Si la magnitud sísmica hubiese afectado la fachada Norte o Sur, el edificio se hubiese comportado de mejor forma debido a que presenta una cantidad alta de muros en esa dirección.

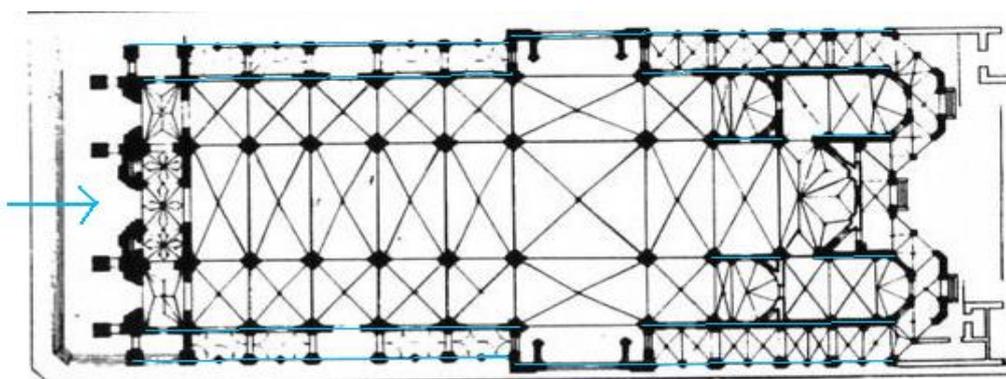


Figura 2: Planta de la Basílica del Salvador sentido más favorable a la sollicitación sísmica del año 1985<sup>39</sup>

<sup>38</sup> <sup>39</sup> MOP. 2009, Ministerio de Obras Públicas de Chile, Ficha número 97, *Registro Monumentos Nacionales Departamento de Arquitectura, Archivo*, Santiago.

La magnitud sísmica más favorable que se pudo presentar para el sismo del año 1985 se indica de acuerdo a la figura 2 según la flecha celeste. Los muros y nervaduras de los arcos de medio punto trabajarían según la dirección sísmica resistiendo de mejor forma ya que parte de la energía es contrarrestada. Con respecto al sismo del año 2010, la energía sísmica liberada aumenta los daños y grietas estructurales. Lo que acrecienta los problemas de estabilidad estructural. Debido a que las ondas sísmicas ejercieron su magnitud desde la costa hacia el interior del valle de Santiago, muy similar al sismo del año 1985.



Fotografía 9: La Basílica del Salvador, vista lateral y fachada sur. Después del sismo del año 2010<sup>40</sup>.



Fotografía 10: La Basílica del Salvador, vista interior, pérdida de cielo y muros laterales. Después del sismo 2010.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup> <sup>41</sup> Paulina Ibarra, 2014, Derrumbes de la Basílica del Salvador, *vista 5 de mayo 2015*, <<http://redesvision.com/articulo.php?var1=11862&var2=1000>>.



Fotografía 11: La Basílica del Salvador, vista interior. Después del sismo 2010<sup>42</sup>.

## 2.- Fisuras:

Las fisuras, son ocasionadas por múltiples factores, ya que además de ser producidas por los movimientos sísmicos indicados anteriormente, se pueden producir por otros efectos como eflorescencias y por acción biológica la cual se adosa en las piezas del ladrillo. Las fisuras son de un grado de daño relativamente bajo en comparación con las grietas debido a su espesor menor pero pueden producir la fragmentación constante del ladrillo debilitando la albañilería en su conjunto con el paso del tiempo. Por lo tanto las fisuras que afectan principalmente a la Basílica del Salvador se pueden dividir en:

- Acción biológica<sup>43</sup>:

Los daños en la albañilería son producidos por el crecimiento sistemático de raíces vegetales, hongos, líquenes y organismos de similar naturaleza.

---

<sup>42</sup> Marambio Mardones, E. 2010, Fotos de la Basílica del Salvador, *consultada 10 de junio 2015, minube* <<http://www.minube.com.br/fotos/sitio-preferido/897871/5740291>>.

<sup>43</sup> Flores Alés, V. 1999, "Estudio, caracterización y restauración de materiales cerámicos", *Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla*.

Las zonas húmedas son las más frecuentes e idóneas para que se desarrolle esta patología. Como se observa en la fotografía 12. Las raíces crecen en la superficie del ladrillo y a medida que estas se profundizan dañan el ladrillo sistemáticamente. De acuerdo a (Flores, 1999) *“Comúnmente no producen alteraciones a las propiedades mecánicas, salvo en el caso de que se produzca la exfoliación de las capas superficiales de las piezas”*.



Fotografía 12: Presencia de patología por acción biológica en fachada Este<sup>44</sup>.

- Eflorescencia.

De acuerdo con Castillo, *et al*, (1991), la eflorescencia es un depósito salino que se cristaliza de forma superficial en los muros u obras de mampostería debido a que una disolución de agua, produce un traspaso de sales en la superficie de ladrillo y cuando se genera evaporación rápida de agua, genera la patología en el material. El ladrillo por ser un material poroso, no puede evitar el paso del agua hacia el interior o exterior. Ya que si el ladrillo fuese impermeable no existiría la posibilidad de que se formen sulfatos y por ende eflorescencias<sup>45</sup>.

---

<sup>44</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.

<sup>45</sup> Castillo Ruiz, J. et al. 1991, “Jornadas sobre restauración y conservación de monumentos, 24 y 25 de abril de 1989”: Ministerio de Cultura. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales , Madrid.

Las causas para que se produzcan eflorescencias en el ladrillo, se pueden clasificar en tres fenómenos fisicoquímicos:

- a) Existencia de sales solubles.
- b) Presencia de humedad para la disolución de sales.
- c) Disolución, transporte y recristalización.



Fotografía 13: Eflorescencias detectadas en la Basílica del Salvador<sup>46</sup>.

Se estima que el límite de absorción de agua de la albañilería que no permite la formación de sulfatos, es del orden de 6%<sup>47</sup>, bajo de este porcentaje de absorción, no puede existir eflorescencia en el ladrillo, por lo tanto no hay ladrillos que cumplan con este límite de absorción ya que es un material que está por sobre el 6% de absorción y toda albañilería presentará problema de eflorescencia si no es tratada con una barrera hidrófuga, evitando el ingreso de agua en los capilares del ladrillo.

---

<sup>46</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.

<sup>47</sup> Castillo, op.cit, 1991.

La Basílica del Salvador en su fachada Sur, Este y Oeste no tiene revestimiento alguno dejando la albañilería expuesta a las condiciones climáticas, contaminación urbana etc... La decisión de no ejecutar un revestimiento apropiado en la estructura, tiene consecuencias importantes ya que produce patologías y deterioro. Como un ejemplo de eflorescencias en el ladrillo, se puede distinguir por ser una mancha de color blanco-grisáceo y no afecta a la estructura en lo que respecta a la seguridad estructural.

Las composiciones químicas salinas de las eflorescencias en lo ladrillos pueden ser:

$\text{Na}_2\text{SO}_4$	-Sulfato sódico	$\text{FeSO}_4$	-Sulfato de hierro
$\text{K}_2\text{SO}_4$	-Sulfato potásico	$\text{CaCO}_3$	-Carbonato cálcico
$\text{MgSO}_4$	-Sulfato magnésico	$\text{NaCO}_3$	-Carbonato sódico
$\text{CaSO}_4$	-Sulfato cálcico	$\text{VSO}_4$	-Sulfato de Vanadio
$\text{ClNa}$	-Cloruro sódico	$\text{KCO}_3$	-Carbonato Potásico

En mayor o menor concentración estas sales pueden estar presentes en la albañilería de la Basílica del Salvador.

La eflorescencia tiene detección ya que se puede apreciar fácilmente por el exterior, pero el ladrillo al evaporar agua hacia el exterior también absorbe agua hacia el interior, esto se conoce como criptoflorescencia o inflorescencia.

La inflorescencia es similar a la eflorescencia en lo que respecta a la composición química, lo que difiere es la solubilidad de las sales. Esto tiene relación al transporte de sales hacia el interior como también hacia el exterior del ladrillo.

El grado de complejidad de la eflorescencia se puede determinar de acuerdo a la clasificación de la eflorescencia y son de tipo I, II, III, IV y V.

La eflorescencia puede afectar a la Basílica del Salvador produciendo fisuras en la albañilería dependiendo del origen y contacto con la estructura de acuerdo a (Castillo, 1991):

- Eflorescencia tipo I:

Las sales superficiales que dan la coloración blanca son muy solubles con agua, son abundantes y se sitúan en los centros o bordes de la cara expuesta del ladrillo cubriendo además la llaga y tendel.

Suele aflorar con temperaturas elevadas en ambientes lluviosos y secados rápidos producto del viento y sol. Son los compuestos químicos comunes de este tipo de eflorescencia:  $K_2SO_4$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  y  $CaSO_4$ .

La detección y clasificación de esta categoría es simple ya que se debe hacer una prueba con agua en la eflorescencia para verificar si las sales son disueltas con facilidad.

- Eflorescencia tipo II:

La eflorescencia del tipo II se produce por sustancias químicas altamente tóxicas en una zona industrializada. En el caso de la Basílica del Salvador no está en una zona industrial peligrosa. Pero no se puede descartar que la contaminación atmosférica en Santiago pueda contener contaminantes peligrosos y agresivos para la formación de este tipo de eflorescencia.

- Eflorescencia tipo III:

Se presenta cuando el mortero es de cemento portland pero tiene relación con la cal ya que el compuesto químico que lo forma es el carbonato cálcico y es lo

que da resistencias mecánicas al mortero de cal en su proceso reológico. Además, producto de las reparaciones en base a cemento portland en el año 1985. La albañilería de ladrillo ha quedado expuesta al contacto y contaminación química de estos dos materiales incompatibles.

La eflorescencia de tipo III. No representa peligro para a la estructura pero pueden producir deterioro a largo plazo y causar fisuras. Son manchas u oxidaciones que dan una mala visión en la fachada.

- Eflorescencias tipo IV:

Son de origen ferroso. Se puede lograr su detección visual ya que este tipo de eflorescencia aflora en forma de goterones de color pardo. Son más peligrosas por la agresividad de penetración, generando inflorescencias que logran traspasar los enlucidos formando manchas en ellos. No representa un riesgo a la integridad de la estructura.

- Eflorescencias tipo V:

Son producto de la fabricación del ladrillo y no se aplican a este caso ya que no se ocupaban productos químicos de coloración en la confección de los ladrillos.



Fotografía 14: Fachada Oeste de la Basílica del Salvador antes del sismo del año 2010<sup>48</sup> <sup>49</sup>.

---

<sup>48</sup> La Basílica del Salvador no es revestida apropiadamente generando gran cantidad de problemas en 3 fachadas por agentes contaminantes en la atmósfera o inclemencias del tiempo.

<sup>49</sup> Fotografía del autor 2009, Santiago de Chile.

De acuerdo a la fotografía 14, se aprecia el daño en la albañilería por presencia de eflorescencias y acción biológica. Se observa sobre los arcos de albañilería, el relieve irregular con desprendimiento de piezas de ladrillos. En el lado izquierdo de la fotografía, se puede observar un pilar de hormigón con eflorescencia de tipo I. Estas incompatibilidades químicas alteran las prestaciones de los materiales nobles existentes en la estructura disminuyendo el ciclo de vida de estos.

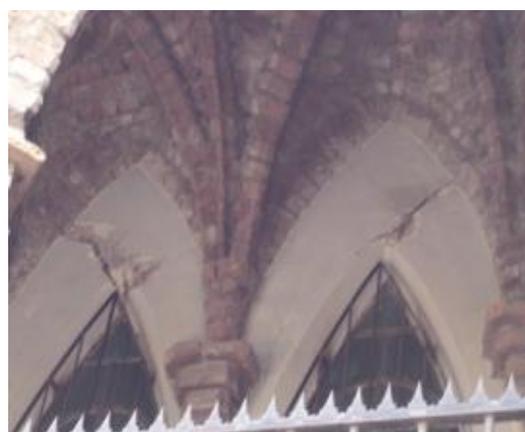
Los ladrillos y mortero de cal, además de soportar las inclemencias ambientales, deben resistir la magnitud de la degradación de materiales químicamente modificados e industrializados. Lo que produce que la degradación sea agresiva, esto se explica debido a una falta de revestimiento apropiado en la fachada y reparaciones sin un estudio de caracterización adecuado, que exponen materiales en contacto permanente de naturalezas diferentes.

## 5.2. GRIETAS Y FISURAS EN LA BASILICA DEL SALVADOR.

Se realizó una inspección en los muros de albañilería de la Basílica del Salvador para confeccionar un diagnóstico fotográfico, detectando claros ejemplos de tipologías de grietas con compromiso estructural estudiados anteriormente:



Fotografía 15. Grieta de corte en sentido vertical:  
Falla por adherencia del mortero. Ed Autor.



Fotografía 16. Grietas de corte diagonal.  
Ed. Autor



Fotografía 17. Grietas y fisuras con daños superficiales en el ladrillo. Ed. Autor



Fotografía 18. Grieta de corte en sentido vertical Ed. Autor



Fotografía 19. Daño en extremo superior: Grieta pasante. Ed Autor.



Fotografía 20. Grieta de corte vertical en la albañilería y grieta pasante. Ed. Autor.



Fotografía 21. Grieta de corte vertical y pérdida del elemento estructural. Ed Autor.



Fotografía 22. Grieta de corte en sentido vertical. Falla de adherencia del mortero pega. Ed Autor.



Fotografía 23. Grieta pasante en sentido vertical. Pérdida del arco. Ed Autor.



Fotografía 24. Grieta de corte vertical. Ed Autor



Fotografía 25. Grieta de corte vertical. Ed Autor.



Fotografía 26. Grieta de corte vertical. Ed Autor.

### 5.3. RESUMEN DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS DE GRIETAS Y FISURAS.

A modo de síntesis se presentan las tablas 7 y 8:

Consecuencia de acción sísmica	
Grietas y fisuras en la albañilería	No se puede determinar si el origen es por falla de las unidades del ladrillo
	Problemas de adherencia entre bloques y mortero
	Comportamiento errático del diseño frente a un sismo
	Albañilería sin confinar
	Refuerzos metálicos inapropiados
	Sentido del sismo desfavorable con respecto a la estructura

Tabla 7: Consecuencia de acción sísmica en la Basílica del Salvador. Ed. Autor

Categoría	Clasificación	Subclasificación	Causas	Características
I. Grietas Estructurales	1.-Grietas por Esfuerzo de corte	1.1 Grietas en sentido diagonal	Sismos 1985 y 2010	Se agrieta el elemento en dos secciones
		1.2 Grietas en sentido vertical		El mortero falla por adherencia entre bloques de ladrillo
		1.3 Grietas en sentido horizontal		Si el elemento estructural no es capaz de soportar la compresión o es comprometido únicamente a flexión falla la estructura
	2.-Grietas por Flexión			Las grietas cortan el elemento en su sección completa.
	3.-Grietas por Aplastamiento	3.1 Grietas pasantes		Las grietas dañan el elemento pero no corta la estructura de extremo a extremo
		3.2 Grietas no pasantes		
II. Fisuras	Eflorescencia	Eflorescencia tipo I	Composición química del ladrillo al contacto con agua y medio ambiente	Salas superficiales. Producen daños mínimos.
		Eflorescencia tipo II	Se producen por agentes contaminantes altamente tóxicos	No se detectan en la estructura
		Eflorescencia tipo III	Se produce por el carbonato de calcio	Deterioro a largo plazo. Producen fisuras, si no se controla
		Eflorescencia tipo IV	Origen ferroso	No produce daño estructural. Pero produce daños importantes ornamentales
		Eflorescencia tipo V	Se producen por los compuestos químicos del ladrillos	No se detecta en la estructura
	Acción Biológica		Crecimiento sistemático de raíces vegetales, hongos, líquenes etc...	Se producen en zonas húmedas y las raíces son el principal agente degradador

Tabla 8: Características de fallas en la albañilería en la Basílica del Salvador. Ed. Autor.

## 6. CARACTERIZACIÓN

Una caracterización sobre un determinado material corresponde al estudio de sus propiedades físicas, mecánicas, composición química y mineralógica<sup>50</sup>, analizando sus componentes, para determinar su grado de prestación con respecto al material existente en una edificación patrimonial. El objetivo de una caracterización, es reproducir el material analizado debido a su desuso en la actualidad y que este se comporte de forma homogénea al material existente en la edificación a intervenir, así evitar incompatibilidades de materialidad producto de patologías que se puedan producir.

En el caso de la Basílica del Salvador se debe caracterizar el mortero de cal y la albañilería de ladrillo para así, determinar una dosificación de un mortero de cal para ser aplicado en la reparación.

<sup>50</sup> Flores, op.cit, 1999.

Los ensayos de caracterización para morteros de cal difieren de los ensayos tradicionales normalizados<sup>51 52 53 54 55 56 57 58</sup>. De acuerdo a (Espinosa, 2014) para un mortero fresco de cal, se debe hacer especial cuidado en el estudio de las variables de trabajabilidad, consistencia y contenido de agua. En los casos de morteros endurecidos de cal, se debe estudiar el comportamiento y evolución de la carbonatación junto al estudio de las propiedades físico-mecánicas que se determinan mediante ensayos de resistencia a la compresión y flexión. De acuerdo a Cazalla, *et al*, (citado en Alejandre, 2014)<sup>59</sup>, el seguimiento de la carbonatación en morteros de cal se realiza mediante el control del parámetro R que es la relación con el paso del tiempo de calcita / portlandita, mediante difracción de rayos X. Otro método es realizar ensayos de fenolftaleína, se pueden observar una variada gama de estudios aplicados a los morteros de cal para determinar las propiedades y caracterizar el material con respecto al mortero existente. De esta forma se pueden dividir los ensayos de caracterización en dos grandes grupos:

a) Ensayos destructivos:

Los ensayos destructivos se pueden realizar de acuerdo a los contenidos de agua, tipos de cal, tipo de árido o técnica constructiva empleadas en los

---

<sup>51</sup> UNE-EN 196-1 Métodos de ensayo de cementos, Parte 1: Determinación de Resistencias mecánicas.

<sup>52</sup> UNE-EN 1015-6 Métodos de ensayo para mortero de albañilerías, Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

<sup>53</sup> UNE-EN 1015-3 Determinación de la consistencia de morteros. Método de la mesa de sacudidas.

<sup>54</sup> UNE-103200 Determinación del contenido de carbonatos en los suelos.

<sup>55</sup> UNE-EN-1936 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

<sup>56</sup> UNE-EN-1015-11 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero.

<sup>57</sup> UNE-459-2/02. Cales para construcción. Parte 2. Métodos de ensayo.

<sup>58</sup> UNE-EN- 13139/02: Áridos para morteros.

<sup>59</sup> Alejandre, op.cit, 2014.

morteros en laboratorio<sup>60</sup>. Estas variables determinarán las prestaciones y propiedades mecánicas futuras. Además se puede determinar cuáles son las variables que influirán en el proceso de carbonatación y por ende el incremento de resistencias mecánicas. La restricción lógica que pueden tener los ensayos destructivos es referente al grado de intervención si se realizan en una obra patrimonial. Por este motivo, se limita en gran medida a ensayos controlados en laboratorios con el fin de reproducir el mortero de cal existente para su uso en la obra patrimonial.

#### b) Ensayos no destructivos.

Los ensayos no destructivos son ampliamente empleados y aceptados. Se pueden realizar mediante ensayos químicos in situ o físicos como son las pruebas de ultra sonido<sup>61</sup>. Por este motivo, los dos tipos de ensayos son diferentes entre uno y otro pero a la vez complementarios para determinar correctamente las propiedades de un material patrimonial a homologar.

Es fundamental comprender las diferencias entre un ensayo no destructivo y un ensayo destructivo en lo que respecta a la caracterización cuando se trabaja con morteros de cal. Cada uno de ellos representa ventajas y desventajas para determinar sus propiedades, ya que como ejemplo, al preparar un mortero caracterizado en laboratorio para ser ensayado en busca de sus resistencias mecánicas, no es posible observar únicamente sus propiedades a los 28 días como un ensayo tradicional de un mortero con cemento portland de acuerdo a la norma UNE EN 459:2011. Debido a que su período de carbonatación o de aumento de propiedades mecánicas es notablemente mayor en el transcurso de tiempo y no reflejará las propiedades actuales de un mortero patrimonial, objetivo que se busca en una caracterización como ejemplo, por discriminación de la cal en resistencias mecánicas.

---

<sup>60</sup> Valek, J & Bartos, P. 2001, "Influences affecting compressive strength of modern non-hydraulic lime mortars used in masonry conservation" Ed. In *C.A Structural Studies, Repairs and Maintenance of historical buildings. Advances in Architecture Series VII*, Brebbia, p. 571-580.

<sup>61</sup> Boffil, op.cit, 2014.

## 6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CAL.

Para efectos prácticos y teóricos se desarrollará un procedimiento general de caracterización utilizado en los trabajos patrimoniales de la Catedral de Pamplona desarrollado por (Álvarez et al, 1997), el cual señala las clases y procesos fundamentales de ensayos del mortero de cal a intervenir<sup>62</sup>, de esta forma se aplicará como una guía, para la caracterización del mortero de cal requerido en la Basílica del Salvador. La elección de este procedimiento radica en que fue utilizado con éxito en las obras de restauración observando que abarca todos los aspectos requeridos para determinar la compatibilidad de materiales y que estos no generen problemas a consecuencia de la intervención. A continuación se indica el procedimiento general utilizado en la Catedral de Pamplona para ser incorporado en la caracterización de un mortero de cal para la Basílica del Salvador.

## 6.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CARACTERIZACIÓN

El procedimiento general se divide en dos etapas de caracterización para los morteros de cal:

### A) Primera etapa de caracterización:

El método clasifica a los morteros empleados en la edificación de acuerdo a las diversas fases de construcción, los morteros deben ser identificados por los períodos de tiempo de construcción, ya que pueden diferir en cuanto a sus propiedades y características, en el caso de la Basílica del Salvador, no existen antecedentes tanto históricos<sup>63</sup> como de materiales, en los cuales se utilicen morteros diferentes en su fase de construcción. El mortero utilizado corresponde a solo un período de tiempo. Si fuese el caso, se deben clasificar

---

<sup>62</sup> Álvarez, J, I, Martín, A, & Casado. 1997. "Propuesta de una metodología analítica de caracterización de morteros antiguos". 26ª Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Química, Ed. César Mira, Cádiz, 2, 645-647.

<sup>63</sup> Laborde, op.cit, 1987.

y estudiar los morteros por separado para caracterizar cada uno y proponer dosificaciones por lotes de forma diferente.

Se analizarán ensayos efectuados en la Basílica del Salvador de acuerdo a la primera etapa de caracterización, con la consideración de que solamente corresponde a un solo tipo de mortero presente en la albañilería y con respecto al procedimiento, solo se realizó de forma práctica el ensayo macroscópico visual y el ensayo por difracción de rayos X en el mortero de cal presente en la Basílica del Salvador, el estudio por HCL a (1:5) en caliente y la agrupación de datos experimentales, no se llevó acabo por razones prácticas:

#### **A.1) Examen macroscópico visual de la Basílica del Salvador, Universidad Andrés Bello. 2009, Santiago.**

Este ensayo preliminar consiste en observar los muros de albañilería para analizar el estado actual del mortero de cal en la edificación.



Fotografía 27: Vista de los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal en la Basílica del Salvador. Ed. Autor.

-Con respecto al ensayo, observó una pérdida de carga de mortero entre bloques de ladrillos por lavados y por efectos de la exposición a la intemperie, además sobre el bloque de ladrillo encasillado, se aprecia un nuevo emboquillado de cemento portland debido a reparaciones posteriores, esto produce incompatibilidades de material y la promoción de eflorescencias entre varias patologías. La falta de revestimiento ha producido una erosión constante del ladrillo. Se aprecia una albañilería uniforme y construida en solo una fase de construcción, concluyendo que el tipo de ladrillo y mortero es ejecutado de forma global en toda la estructura y datado de finales del siglo XIX por recopilación bibliográfica y materiales observados in situ.

-El bloque típico de ladrillo que se encuentra en la albañilería de la Basílica del Salvador mide: 41cm de largo x 6,5 cm de alto.

-Se observa un ladrillo altamente poroso y débil en su superficie.

-El mortero se desprende con relativa facilidad en la unión de la llaga y tendel.

-La separación del tendel es de no mayor a 2,5 cm.

-La separación de la llaga es irregular, se observan diferencias entre 0,5 cm y 2 cm. Se infiere que no se controló el procedimiento de unión de ladrillo y mortero dejando a libre criterio la separación de la llaga, lo que produce consecuencias inevitables en la calidad de la mampostería de ladrillo en lo que respecta a bajas resistencias mecánicas.

## **A.2) Ensayo por difracción de rayos X al mortero presente en la Basílica del Salvador. Laboratorios de Cristalografía, Facultad de Física, Universidad de Chile. 2009, Santiago.**

El ensayo por difracción de rayos X fue solicitado con el objeto de analizar una muestra del mortero extraído en los muros de la Basílica del Salvador, así determinar la naturaleza del material que se debe intervenir.

La cristalografía de rayos X de acuerdo a (Nicasio, 2005) *“Es una técnica que utiliza un haz de rayos X que atraviesa un cristal (...), el haz se divide en varias direcciones, debido a la simetría y agrupación de los átomos y por difracción da a lugar a un patrón de intensidad que puede interpretarse según la ubicación de los átomos de los cristales, aplicando la ley de Bragg”*

Esta técnica mide la intensidad reflectante de los minerales por medio de un difractor, de acuerdo a (Cazalla, 2002), la difracción de rayos X se puede realizar mediante el método de polvo cristalino desorientado en donde se recopilan los datos mediante un software específico. También existen dos métodos utilizados como el de Laue y el método de movimiento o rotación total o parcial del cristal.

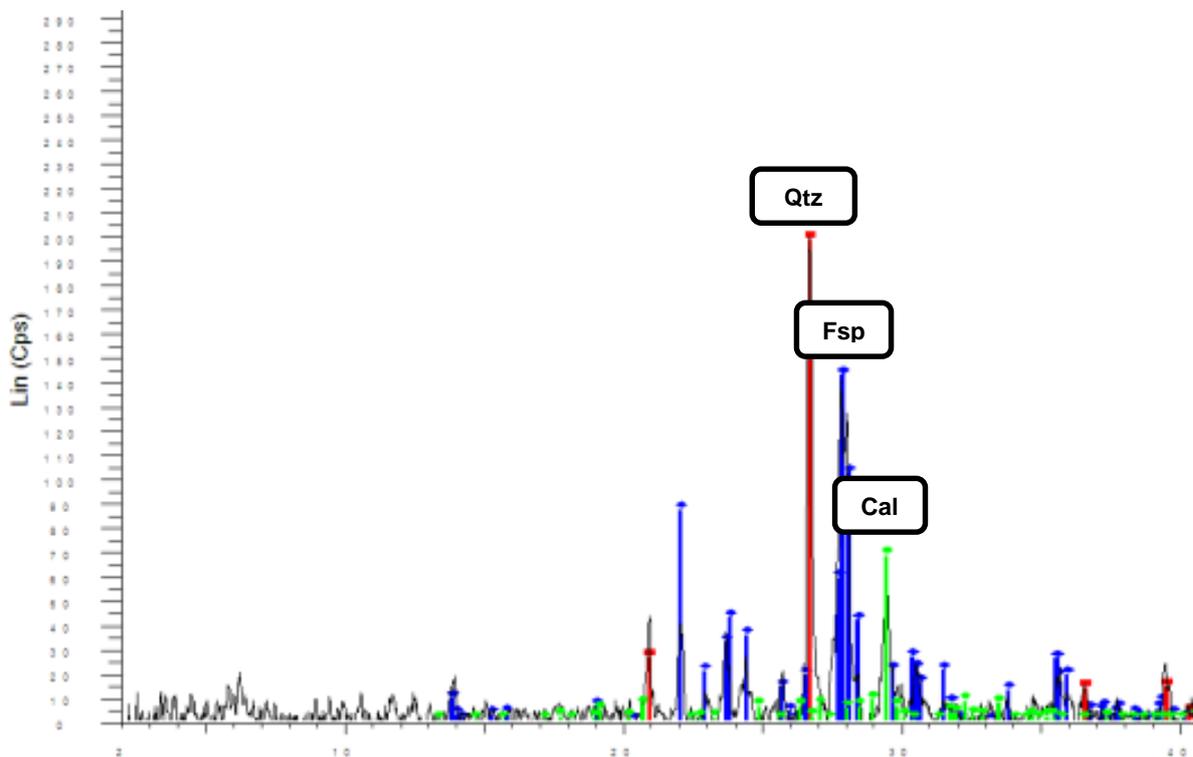


Gráfico 1: Difracción de rayos X a los cristales del mortero en la Basílica del Salvador<sup>64</sup>.

<sup>64</sup> Ensayo de difracción de rayos X a la argamasa de cal de la Basílica del Salvador a petición del autor. Ensayo realizado en el laboratorio de cristalografía de la Facultad de Física, Universidad de Chile, 2009.

Con respecto al gráfico 1, las intensidades observadas por difracción de rayos X corresponden a un mortero a la cal. El estudio de los policristales entrega resultados observados en los picos más altos de la intensidad reflejada de los cristales. Se observa que el pico de color rojo corresponde a Cuarzo (Qtz), azul a Feldespatos (Fsp) y verde a Calcita (Cal). Se observó en el ensayo, la presencia de otros compuestos químicos como el Sulfato de Vanadio, lo cual es común encontrarlo en forma de patología como eflorescencia.

## **B) Segunda etapa de caracterización:**

En esta segunda etapa, se debe realizar una caracterización del mortero de cal de forma directa, de acuerdo a Álvarez et al, (1997) el cual recomienda analizar: 1) morfología; 2) química, se divide en: 2a) macroquímica global-árido-ligante, 2b) microquímica, 2c) efecto hidráulico y 2d) sales solubles; 3) físico-química, se divide en: 3a) difracción de rayos X del mortero, 3b) análisis termodiferencial y termogravimétrico del mortero y 3c) aplicación del microscopio electrónico de barrido; 4) mineralógico petrográfica, se divide en: 4a) examen microscópico en láminas delgadas y 4b) análisis granulométrico.

En el caso de los ensayos experimentales realizados, se trabajó sobre la granulometría del mortero de cal presente en la Basílica del Salvador y una muestra de cal hidráulica comercial chilena para determinar sus propiedades en lo que respecta a resistencias mecánicas en compresión. El análisis se complementó con información bibliográfica siendo esta netamente de carácter teórico.

### **B.1) Granulometría del aglomerante de la Basílica del Salvador. Laboratorio de Resistencia de Materiales, Universidad Nacional Andrés Bello. 2009, Santiago.**

El ensayo es confeccionado bajo la norma Nch 2256-1-2001 (Norma Chilena para bandas granulométricas) y Nch 165 (Norma Chilena sobre áridos). La

muestra corresponde a una arena separada del mortero de cal correspondiente a la Basílica del Salvador. El peso de la muestra es de 66,05 gr.

-El tamaño máximo nominal por el método de Faury es de 5 mm.

-El módulo de finura es de 4.52, catalogado como arena gruesa, el mortero pudo presentar problemas de trabajabilidad en el momento de su utilización a pie de obra. Con respecto al contenido de finos en la muestra, presenta un tamaño inferior a 0,075mm, lo que incrementa la demanda de agua debido a que posee mayor superficie específica, si los finos están adheridos a los áridos en la fabricación del mortero, se impide una buena unión con el aglomerante generando una mala adherencia y por ende una pérdida de resistencias mecánicas. Se presenta la tabla 9 con respecto a los resultados de la granulometría del mortero efectuada en la Basílica del Salvador:

Tamiz(mm)	Retenido (gr.)	% Retenido	Retenido Acumulado	% No retenido
10	0	0	0	100
5	13.41	20.3	20.3	79.7
2,5	22.14	33.52	53.82	46.2
1,25	19.41	29.39	83.21	16.8
0,63	9	13.63	96.84	3.2
0,32	0.94	1.42	98.26	1.7
0,16	0.6	0.91	99.17	0.8
0,08	0.32	0.48	99.65	0.3
Finos	0.23	0.35	100	0

Tabla 9: Resultados Granulométricos de la arena en la Basílica del Salvador. Ed. Autor.

## **B.2) Ensayo: Caracterización de cal hidráulica, Laboratorio de Resistencia de Materiales, Universidad Nacional Andrés Bello. 2009, Santiago.**

Se realizó un ensayo experimental para determinar la resistencia en compresión analizando el producto comercial de cal hidráulica Sopracal 6, la dosificación estimada se confecciona de acuerdo a la tabla 10:

Dosificación: Ensayo de caracterización por resistencias mecánicas en compresión					
Dosificación mezcla (volumen)	1 : 1	1 : 1.5	1 : 2	1 : 2.5	1 : 3
Cal (Kg.)	0.445	0.385	0.375	0.305	0.205
Arena (Kg.)	1.34	1.625	2.21	2.19	2.23
Agua (ml)	390	410	380	350	440
Agua:Cal	0.88	1.06	1.01	1.15	2.15
Fluidez (cm) promedio	19.4	20.7	14	14	19.5

Tabla 10: Dosificación, ensayo caracterización mortero de cal hidráulica. Ed. Autor.

Debido a la falta de fluidez y por no cumplir con los requerimientos de la mesa de sacudidas para un mortero, se procede a rectificar la dosificación de agua:

Rectificación por Falta de Fluidez		
Dosificación (Volumen)	1 : 2	1 : 2.5
Cantidad Cal (Kg)	0.375	0.305
Arena(Kg)	2.21	2.19
Agua (ml)	430	400
Razón Agua/Cal	1.15	1.31
Fluidez (cm) promedio	17.4	16.8

Tabla 11: Rectificación de fluidez. Ed. Autor.

Los resultados del ensayo en compresión se indican de acuerdo a la tabla 12:

Ensayo Compresión (Kgf/cm <sup>2</sup> )					
Probetas 4cm x 4cm x 16cm	1 : 1	1 : 1.5	1 : 2	1 : 2.5	1 : 3
Tipo 1	6.2	6.4	8.6	5.6	5.4
Tipo 2	6.7	6.1	6.1	10.3	6.2
Tipo 3	4.6	4.8	9.1	7.7	5.7
Tipo 4	-	-	-	8.7	5.1
Tipo 5	-	-	-	-	6

Tabla 12: Resultados a la compresión después de 28 días de curado. Ed. Autor.

-Se observan bajas resistencias en compresión con respecto al producto comercial Sopracal 6, sin un patrón claro que relacione las diferentes muestras

en cuanto a su dosificación y resistencias mecánicas en compresión obtenidas, por consiguiente, el resultado del ensayo es disperso y poco representativo.

-En Chile, la cal no está permitida para su uso estructural. Debido a la falta de reglamentación por ser una zona altamente sísmica. Se concluye que el material ensayado tiene propiedades resistentes muy pobres debido a que es fabricado para fines distintos a un mortero de cal para ser utilizado en albañilería estructural.

-El ensayo fue realizado a los 28 días, lo que es una causa probable de la baja de resistencia debido a la falta de carbonatación. En el caso de la cal, el tiempo reológico debe ser más prolongado para que adquiera resistencias mayores.

Con el fin de complementar la caracterización y determinar una dosificación del mortero de cal para la reparación de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador, se apoyó el análisis de acuerdo a los trabajos de (Cazalla Vázquez, 2002) y (Barluenga, G, et al, 2011) indicados en las tablas 13 y 14, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para los ensayos. Con respecto al análisis de ensayos por resistencias mecánicas en compresión se complementó la información de acuerdo a la tabla 15:

Procedimiento general de caracterización en un edificio patrimonial: El caso de la Basílica del Salvador					
Caracterización	Primera Etapa de Caracterización	Nombre de Ensayo	Autor	Año	Lugar
I.- Agrupación o clasificación de los morteros empleados en las diversas etapas de la construcción.	1.- Realizar un examen macroscópico visual y microscópico óptico.	Examen: Macroscópico visual de la Basílica del Salvador.	Ed. Autor.	2009	Santiago.
		Microscópico óptico de áridos y su uso en morteros de cal.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.
	2.- Efectuar un análisis de difracción de rayos X.	Difracción de rayos X al mortero de cal en la Basílica del Salvador.	Ed. Autor.	2009	Santiago.
	3.- Se deberá estudiar las propiedades químicas con HCl a (1:5) en caliente.	4.- De acuerdo a la información obtenida se agruparán los morteros de acuerdo a su clase y de forma auxiliar, con diagramas triangulares o agrupados relacionando R/FS.			

Tabla 13: Resumen de procedimientos de caracterización tipo I de ensayos para determinar propiedades en los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal. Ed. Autor.

La Basílica del Salvador en Santiago de Chile: Propuesta de Reparación de Patologías de Grietas y Fisuras en Albañilería de Ladrillo y Aglomerante de Cal.

Procedimiento general de caracterización en un edificio patrimonial: El caso de la Basílica del Salvador						
Caracterización	Segunda Etapa de Caracterización	Nombre de Ensayo	Autor	Año	Lugar	
II.- Caracterización.	1.-Caracterización morfológica:					
	2.- Caracterización química:	a) Composición macroquímica global, árido y ligante: Difracción de rayos X para diferentes tipos de cales.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.	
		b) Composición microquímica (elementos traza).				
		c) Efecto hidráulico: Efecto hidráulico para diferentes clases de cales.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.	
		d) Sales solubles: Efecto de diferentes soluciones salinas en morteros de cal.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.	
	3.-Caracterización mineralógico-petrográfica:	a) Examen microscópico en láminas delgadas.				
		b) Análisis granulométrico: Granulometría del aglomerante de la Basílica del Salvador.	Ed. Autor.	2009	Santiago.	
	4.-Caracterización físico-química:	a) Difracción de rayos x del árido.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.	
		b) Análisis termodiferencial y termogravimétrico del mortero.	Cazalla Vázquez, O.	2002	Granada.	
		c) Aplicación microscopio electrónico de barrido: Estudio de los parámetros del Patio de Santo Tomás del Colegio Mayor de San Ildefonso.	Barluenga, G. <i>et al.</i>	2011	Alcalá.	

Tabla 14: Resumen de procedimientos de caracterización tipo II de ensayos para determinar propiedades en muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal. Ed. Autor.

Criterio	Ensayos	Observación	Resultados	Autor
Resistencias Mecánicas en Compresión	Propiedades mecánicas	Comparación entre materiales	La cal Cálctica posee mayores propiedades de resistencias mecánica en compresión que la cal Dolomítica siendo prácticamente el doble más resistente. Se debe utilizar áridos dolomíticos y cálcicos	<b>Cazalla. (2002)</b>
	Morteros para la Iglesia de San Miguel de Jerez de la Frontera	Comparación de aglomerantes con árido definido y dosificado para todas las muestras	26kgf/cm <sup>2</sup> , 90 días	<b>Espinoza. (2014)</b>
	Congreso Latinoamericano REHABEND	Comparación de áridos	30,59kgf/cm <sup>2</sup> , 182 días	<b>Boffill, Y, et al. (2014)</b>

Tabla 15: Ensayos de resistencias mecánicas en compresión para morteros de cal analizados. Ed. Autor

Existen variados criterios para caracterizar un mortero de cal y que este sea utilizado en un edificio patrimonial. Como un ejemplo diferente al análisis, de acuerdo a (Espinoza, 2014), define 3 criterios en cuanto a estudiar un mortero de cal:

- **Compatibilidad:**

La compatibilidad consiste en evitar efectos negativos sobre el material existente cuando a este se aplica un material nuevo y diferente en propiedades y características. El análisis de compatibilidad lo podemos clasificar de la siguiente manera: a) Químico-mineralógico, b) Selección de materias primas para el mortero (áridos, aglomerantes, agua, y posibles aditivos), c) Aspectos físicos, granulometría, petrográficos o físicos, d) Cualidades de puesta en obra y f) Técnicas analíticas: Estudio de difracción y fluorescencia de rayos X, microscopia electrónica de barrido con microanálisis EDX.

Estos estudios son fundamentales para diagnosticar y prevenir una futura patología por incompatibilidad del material.

- **Calidad Técnica:**

Se debe realizar mediante ensayos normalizados en laboratorio y reproduciendo el mortero que se ejecutará en la obra. La calidad técnica deberá seguir los procesos posteriores a la dosificación como endurecimiento de la pasta y curado. Este trabajo corresponde a observar y cuantificar los comportamientos de propiedades y características en laboratorio del mortero de cal con el objeto de controlar las variables para una homologación del material nuevo (controlado en laboratorio) y la cal existente (muro patrimonial).

- **Durabilidad**

La durabilidad depende directamente de las condiciones medioambientales en las que será sometido el mortero reparador aplicado al muro patrimonial. Esta

variable se debe determinar con respecto a los posibles agentes de degradación. Esta degradación o envejecimiento del mortero se puede cuantificar mediante ensayos normalizados de envejecimiento acelerado de acuerdo a los trabajos de Espinosa, Luque, Alcalde y Villegas (citado en Alejandre et al 2014).

## 6.2. CARACTERIZACION EN ALBAÑILERIA.

En el primer análisis de caracterización se ha estudiado la cal como mortero, pero se debe analizar la albañilería en su conjunto, para determinar cuáles son las prestaciones finales que se deben cumplir. El criterio utilizado para estudiar la caracterización en la albañilería será por los ensayos de resistencia mecánica en compresión debido a que la estructura de albañilería a reparar trabajará principalmente en compresión. Se analizan los ensayos de acuerdo a la bibliografía investigada y descrita en la tabla 16:

Ensayos de Caracterización en Albañilerías de ladrillo	Nombre de Ensayo	Autor	Año	Lugar	Resultados
Caracterización de unidades de ladrillo	Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán	Galindo Díaz. <i>et al</i>	2008	Colombia	58,12 Kgf/cm <sup>2</sup>
Caracterización mixta de unidades de ladrillo y aglomerante de cal	Albañilería de ladrillo y argamasa de cal patrimonial	IDIEM, Valenzuela Solís de Ovando, C	1970	Santiago	56,5 Kgf/cm <sup>2</sup>
	Estudio de los materiales y de las fabricas de la Torre de Comares de la Alhambra	Gonzales Limon, T. <i>et al</i>	1997	Granada	40 Kgf/cm <sup>2</sup>

Tabla 16: Resumen de caracterización en albañilerías patrimoniales. Ed. Autor.

Con respecto a la tabla 16, se observan resistencias mecánicas en compresión bajas, en contraposición, a una albañilería que carece de valor patrimonial la cual, posee como mínimo una resistencia mecánica en compresión de 100

Kgf/cm<sup>2</sup> <sup>65</sup>, (valor muy superior a los ensayos en compresión analizados). Con respecto a los ensayos en muros patrimoniales se recomienda un método para medir resistencias mecánicas en compresión por ensayos no destructivos mediante esclerómetro y realizando una correlación de resultados con una desviación menor. No obstante, es necesario aclarar que debido a la imposibilidad de realizar ensayos en los muros de albañilería de la Basílica del Salvador para determinar específicamente la resistencia mecánica en compresión, se deberán fijar valores referenciales con respecto a la bibliografía investigada siendo la resistencia mínima que deberá poseer el mortero de cal en compresión de 58,1 Kgf/cm<sup>2</sup>, <sup>66</sup> (tabla 16), la mayor resistencia mecánica en compresión analizada.

Como un antecedente adicional, la caracterización de ladrillos se puede estudiar referente a la fábrica, propiedades físicas, propiedades mecánicas (análisis del presente trabajo), composición química, composición mineralógica, estudios por comportamiento térmico, estudios de acción biológica, técnicas de datación etc...<sup>67</sup>



Fotografía 28: Albañilería de ladrillo y argamasa de cal analizada sobre el puente Popayan del río Cauca, Colombia. Se realizan ensayos de caracterización para estudiar propiedades mecánicas<sup>68</sup>.

---

<sup>65</sup> Flores, op.cit, 1999.

<sup>66</sup> Galindo Díaz, J, A. *Et al*, (2008). "Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán", Revista ingeniería e investigación vol n°28 pág. 15.-21, Colombia.

<sup>67</sup> Flores, op.cit, 1999.

<sup>68</sup> Galindo Díaz, J, A. (2008). "Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán", Revista ingeniería e investigación vol n°28 pág.17, Colombia. Fotografía: Muñoz, J,C. 2007.

### 6.3. RESUMEN DE CARACTERIZACIÓN

Se resume el procedimiento general de caracterización utilizado, de acuerdo al diagrama 3:

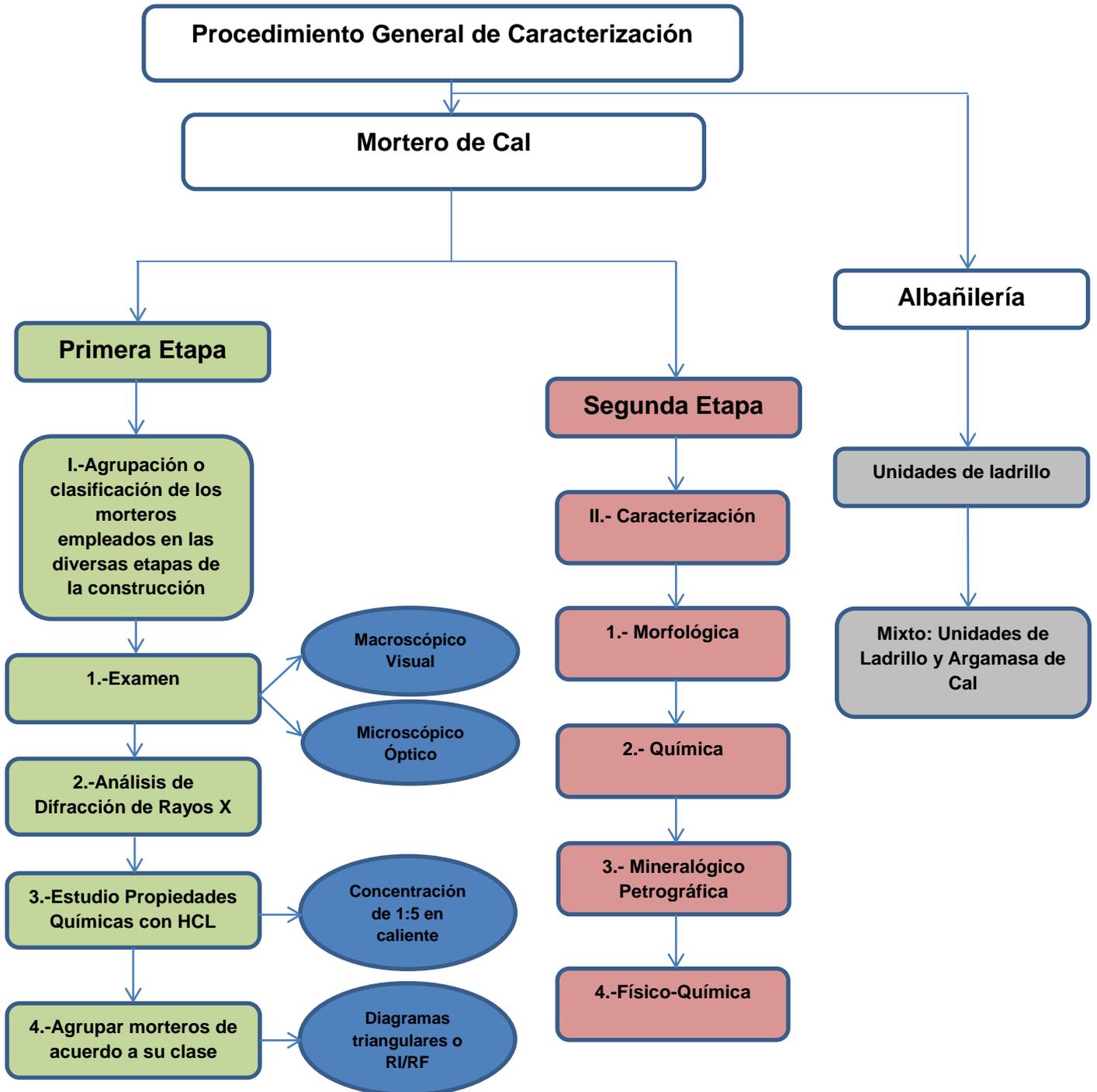


Diagrama 3: Procedimiento general de caracterización aplicado en la Basílica del Salvador. Ed Autor.

## 7. DOSIFICACIÓN

Se desarrollará una dosificación teórica para proponer un mortero reparador que solucione las patologías de grietas y fisuras estudiadas anteriormente, presentes en los muros patrimoniales de la Basílica del Salvador, de acuerdo al análisis de caracterización sobre morteros de cal y albañilería de ladrillo.

### 7.1. CAL

Como un primer análisis se debe definir los criterios fundamentales por los cuales se escogerán las variables requeridas de los materiales existentes en el edificio patrimonial. Un ejemplo de aquello, son los trabajos realizados en la Portada de los Reyes<sup>69</sup> donde se escogen criterios para la dosificación del morteros en cuanto las prestaciones de compatibilidad, ciclo de vida útil y removilidad.

En nuestro caso, el primer criterio de elección para establecer una dosificación será de acuerdo a su compatibilidad como material. De acuerdo a los ensayos por difracción de rayos X efectuados al edificio patrimonial (ver gráfico 1. Página 56), demuestra que estamos en presencia de un mortero de cal, por esta razón el uso de un mortero en base a cal será de obligado cumplimiento.

La justificación en que se basa este primer criterio radica en que los edificios con patrimonio arquitectónico constructivo elaborados con albañilería de ladrillo y argamasa de cal deben ser reparados por homologación de sus características y propiedades que presentan sus materiales constitutivos.

De acuerdo con los estudios de (Espinoza, 2014)<sup>70</sup> referente a los morteros para restauración e intervención de obras patrimoniales. Los edificios

---

<sup>69</sup> Luxán, M. P. D., & Dorrego, F. 2004. Caracterización y selección de morteros en la restauración de la Portada de los Reyes (Benavente, Zamora). *Materiales de Construcción*, 54(273), 35-44.

<sup>71</sup> Espinosa Gaitán J. 2014, "Estudio de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla)" en Alejandro Sánchez, F, et al. La cal: investigación patrimonio y restauración, Sevilla: Ed. Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla.

patrimoniales deben ser reparados siguiendo las mismas características de materialidad que presentaban antes de la falla estructural, así la reparación buscará reestablecer nuevamente las propiedades perdidas. Emplear materiales sin un estudio adecuado puede presentar problemas importantes con respecto a las resistencias mecánicas, tensiones o eflorescencias. Por este motivo el estudio de los materiales existentes es obligado:

De acuerdo a (Espinoza, 2014). *“Los criterios de intervención actuales sobre patrimonio arquitectónico establecen que los morteros de restauración, además de reunir las cualidades técnicas necesarias, deben asemejarse en lo posible a los morteros originales”.*

Es fundamental trabajar con morteros los cuales posean propiedades homogéneas a los morteros existentes. Esta definición justifica proponer un mortero reparador en base a la cal que se adecue a las propiedades existentes de la albañilería de ladrillo y cal patrimonial. Por lo tanto la compatibilidad de entre los morteros antiguos con los nuevos es crucial para lograr una adecuada reparación.

De acuerdo a (Robador, 2014)<sup>71</sup>. Los morteros de cal son los más idóneos para producir restauración: *“Pues con ellos se construyeron y se revistieron los edificios que ahora se han de restaurar (...)”* *“Y no utilizarla puede ocasionar lamentables consecuencias estéticas y técnicas, por incompatibilidades físicas, químicas y/o mecánicas (...)”.*

El segundo criterio fundamental para generar la elección de los materiales para dosificar un mortero cal en la presente investigación será por resistencias mecánicas en compresión, escogiendo de acuerdo a los trabajos experimentales bibliográficos, la cal más idónea para este fin. No se debe perder de vista, el objetivo principal de la reparación, que corresponde a devolver las resistencias mecánicas perdidas en compresión a la estructura y

---

<sup>71</sup> Robador González, M. 2014, “Ennoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta” en Alexandre Sánchez, F, et al. La cal: investigación patrimonio y restauración, Sevilla: Ed. Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla.

asegurar su estabilidad en caso de una sollicitación sísmica futura. Para definir la magnitud de resistencia mecánica por compresión máxima que debe cumplir el mortero de cal a dosificar, es un error determinar la resistencia a la compresión del mortero patrimonial de forma exclusiva sino, debemos observar el análisis efectuado en la caracterización de las albañilerías patrimoniales las cuales poseen una resistencia en compresión investigada de 40 kgf/cm<sup>2</sup> <sup>72</sup>, un rango de 43,7kgf/cm<sup>2</sup> - 56,5kgf/cm<sup>2</sup> <sup>73</sup>, y 58,12kgf/cm<sup>2</sup> <sup>74</sup>, ya que es el muro de albañilería que se desea reparar y este es un material mixto de ladrillos y argamasa de cal. El mortero que se utilizará en la reparación debe cumplir con las propiedades de las fábricas estructurales.

El mortero a proponer en base a cal deberá satisfacer los requerimientos mínimos de 58,1kgf/cm<sup>2</sup> en resistencia a compresión. Con respecto a la determinación del tipo de cal a utilizar en la dosificación, existen 2 alternativas de cal que pueden ser utilizadas en un mortero. La cal aérea y la cal hidráulica. Con respecto a la primera, esta se divide en cal dolomítica y cal cálcica. La cal dolomítica no se debe utilizar para obtener buenos resultados en lo que respecta a resistencias mecánicas en compresión<sup>75</sup> debido a que posee bajas propiedades de acuerdo a los ensayos bibliográficos estudiados.

Con respecto a la cal hidráulica en comparación con la cal cálcica, posee bajas resistencias en compresión a los 28 días. Obteniendo un máximo de 10,3 kgf/cm<sup>2</sup> de acuerdo a los ensayos efectuados, (ver tabla 12. Página 59). Se debe hacer la salvedad de que no se descarta categóricamente utilizar este tipo de material, en el caso que se cuantifique su velocidad de carbonatación y su cumplimiento resistente en compresión para que adquiera la magnitud en compresión definida en el estudio de la caracterización de albañilería analizada anteriormente. La discriminación entre cal viva y cal hidratada corresponde a

---

<sup>72</sup> González Limón, T. & Casas Gómez, A. 1997, "Estudio de los materiales y de las fábricas de la Torre de Comares de la Alhambra", *Junta de Andalucía*, Granada.

<sup>73</sup> Valenzuela, op.cit, 1991.

<sup>74</sup> Galindo, op.cit, 2008.

<sup>75</sup> Cazalla, op.cit, 2002.

que esta última se utiliza para elaborar morteros por sus propiedades resistentes<sup>76</sup> y de acuerdo a su proceso final de apagado (ver página 17) la cal hidratada o apagada obtiene las propiedades para carbonatar.

Efectuado este análisis y observando que la cal cálcica es recomendable para ser utilizada para dosificar el mortero reparador, siguiendo la discriminación por resistencias mecánicas en compresión, se analizó la cal aérea cálcica hidratada en pasta y cal aérea cálcica hidratada en polvo<sup>77</sup>. En el análisis, se observa una resistencia de 26kgf/cm<sup>2</sup> a los 90 días de carbonatación. Dando propiedades resistentes superiores a la cal hidratada en polvo, se destaca que la cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL- S) es aún insuficiente para obtener las resistencias mecánicas en compresión requeridas del análisis de caracterización de albañilería pero se observan los mejores resultados investigados.

De acuerdo a (Nuñez, 2014) en (Alejandre *et al.*, 2014): *“Los morteros más usados para estos fines son los morteros aéreos que tienen como aglomerante el hidróxido cálcico al que se añade una carga inerte, por lo general un árido tradicional o de mármol”*.

El tercer criterio de dosificación escogido es la trabajabilidad, será fundamental al momento de dosificar el mortero reparador ya que este podrá tener la compatibilidad de materiales y resistencias mecánicas, pero deberá ser capaz de ser inyectado en la grieta al momento de producirse el trabajo a pie de obra. Sin esta cualidad, el mortero no sería práctico de utilizar, por este criterio, la cal aérea cálcica hidratada en polvo tiene buenas resistencias mecánicas a la compresión y una buena trabajabilidad que es fundamental para obtener un mortero fluido para la reparación de grietas y fisuras de un espesor bajo.

---

<sup>76</sup> Undurraga, R. Conde, J. F. Agua, F. Barluenga, B. Villegas, M. & García H. 2014. “El hospital de Antezana (Alcalá de Henares, Madrid): Estudio arqueométrico y análisis arquitectónico de ladrillo y morteros”. Universidad de Alcalá, Madrid.

<sup>77</sup> Espinoza Gaitán, J. 2014, “Estudio de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla)” en Alejandre Sánchez, F, et al. La cal: investigación patrimonio y restauración, Sevilla: *Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla*.

En resumen y luego de analizar los tres criterios que definen al mortero investigado por: Compatibilidad, resistencias mecánicas y trabajabilidad sobre este análisis, el tipo de cal más adecuado para dosificar el mortero reparador será: cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL- S).

## 7.2. ÁRIDOS.

Es fundamental seguir el procedimiento de discriminación de materiales para generar una dosificación de acuerdo a los áridos presentes en el mortero de la edificación patrimonial. Se ha definido el tipo de cal a utilizar en la dosificación y con respecto al árido, este puede influir notablemente en las prestaciones finales de un mortero de cal siendo una variable fundamental en lo referente a resistencias mecánicas, trabajabilidad, adherencia, durabilidad, etc...

De acuerdo a los ensayos por microscopio óptico y por propiedades mecánicas<sup>78</sup>, en diferentes clases de árido: Silíceo, calcítico y dolomítico. El árido silíceo favorece la trabajabilidad, el árido calcítico favorece las resistencias mecánicas en desmedro de la trabajabilidad y el árido dolomítico está en equilibrio con estas dos propiedades. De acuerdo a (Cazalla, 2002) sugiere la mezcla de árido calcítico y dolomítico logrando un aumento de trabajabilidad y resistencias mecánicas. El árido silíceo no se debe utilizar ya que por ser una granulometría muy heterogénea en cuanto a tamaños del árido, impide la formación de poros por lo cual dificulta el ingreso de CO<sub>2</sub> para carbonatar al mortero, obteniéndose bajas resistencias mecánicas. El estudio referente a las diferencias en resistencias mecánicas en compresión para una cal aérea con árido de origen cálcico y una cal aérea con árido de origen silíceo<sup>79</sup> muestra un valor máximo de 3,05 Mpa o 30,59kgf/cm<sup>2</sup>, valor en compresión de cal con áridos de origen cálcico a los 182 días. El análisis granulométrico para los áridos presentes en el mortero de cal de la Basílica del

---

<sup>78</sup> Cazalla, op.cit, 2002.

<sup>79</sup> Boffill, Y, Blanco, H, Lombillo, I, Villegas, L & Thomas, C. 2014, "Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos", Congreso Latinoamericano REHABEND. Santander.

Salvador (ver tabla 9. Página 58), infiere que el mortero existente posee bajas propiedades de trabajabilidad, una gran presencia de finos y por ende, bajas resistencias mecánicas teóricas. Con respecto a este estudio, se debe dosificar el mortero reparador de acuerdo a una arena con baja cantidad de árido fino el cual logre una buena unión entre la superficie específica del árido y el aglomerante logrando buenas propiedades mecánicas y de trabajabilidad.

Es de interés que el mortero sea fluido para que este penetre en las grietas y fisuras que se deben reparar. Luego de este análisis, definimos los tipos de áridos más idóneos para dosificar el mortero de cal como: áridos de origen cálcico y dolomítico.

Con respecto al agua de agregado no debe poseer sustancias químicas u otro agente contaminante que pueda alterar las propiedades del material. Se debe seguir la normativa vigente para ser utilizada en morteros de cal<sup>80 81</sup>.

Los ensayos bibliográficos investigados en los cuales es utilizado el Metacaolín como aditivo en los morteros de cal no aumentan las resistencias mecánicas en los morteros de forma satisfactoria<sup>82</sup>. Se debe restringir su uso únicamente si se logra un aporte real a las sollicitaciones finales requeridas.

### **7.3. PROPUESTA DE DOSIFICACIÓN.**

De acuerdo al análisis anterior, en resumen se propone la siguiente dosificación para elaborar el mortero reparador que trate las patologías de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador: cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL90- S) con árido dolomítico y cálcico.

---

<sup>80</sup> Asociación Española de Normalización y Certificación 2011, UNE-EN-459-2 Métodos de Ensayo, AENOR, Madrid.

<sup>81</sup> Asociación Española de Normalización y Certificación 2011, UNE-EN-459-1 Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, AENOR, Madrid.

<sup>82</sup> Cazalla, op.cit, 2002.

### A) Razón agua y cal:

La dosificación de agua/cal con mejores resultados en cuanto a propiedades mecánicas y trabajabilidad es de 0,8. (Espinosa, 2014). Para un mortero elaborado con una cal aérea cálcica hidratada.

### B) Relación de áridos y cal:

La relación entre aglomerante de cal y árido será de 1:2:1 en peso. Para una cal aérea cálcica hidratada en polvo seco, árido dolomítico y árido cálcico.

Puede ser factible también la proporción de 1:3 en peso, donde corresponde al aglomerante de cal indicado y árido dolomítico. (Espinosa, 2014).

### C) Granulometría

Con el fin de generar una adecuada dosificación que caractericé al mortero y siguiendo las recomendaciones de acuerdo a (Luxán *et al.* 2004), el árido a dosificar se deberá comportar siguiendo la curva granulométrica referente al ensayo efectuado al mortero presente en la Basílica del Salvador según el gráfico 2.

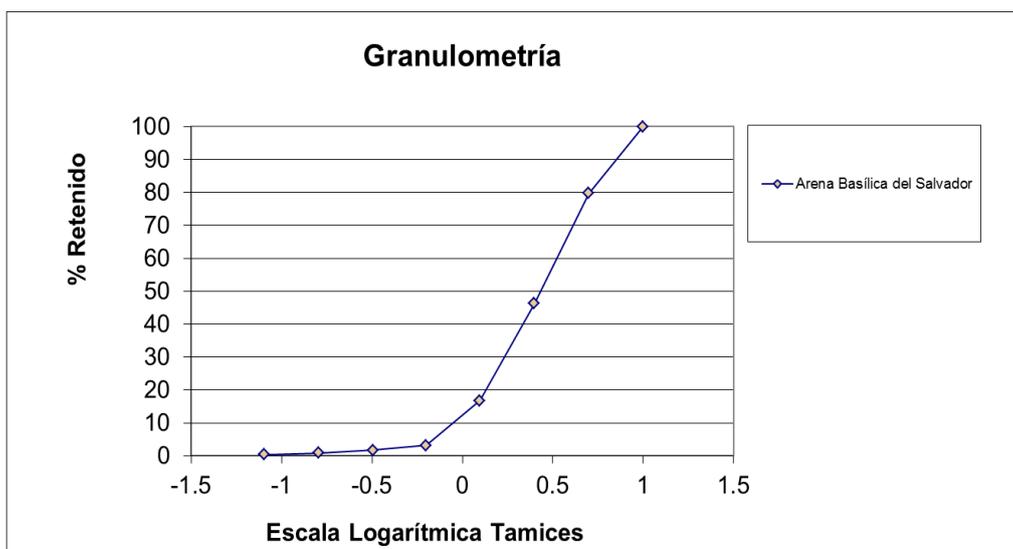


Gráfico 2: Curva granulométrica del mortero de cal en la Basílica del Salvador. Ed Autor

Se debe tener precaución sobre los finos en la arena y mantener los valores de ellos en niveles aceptables en donde el tamaño máximo de la arena será de 5mm.

#### **D) Durabilidad:**

La durabilidad del mortero con respecto a la propuesta de dosificación será siempre una variable de interés, para así evitar como ejemplo, que la acción del agua (la cual es uno de los principales agentes degradadores de las obras de edificación) afecte al mortero utilizado en el reparación. Se puede medir su efecto de acuerdo al ensayo hidráulico<sup>83</sup> y comparar la cal de origen cálcico en pasta con la cal de origen dolomítico dando una mayor durabilidad a la cal de origen cálcico, lo cual avala la clase de cal escogida. Si analizamos los ensayos por sales solubles, la cal cálcica obtiene buenos resultados pero por debajo de la cal de 14 años de hidratación.

#### **E) Trabajabilidad:**

Como se ha indicado anteriormente, el mortero de cal deberá cumplir con una buena trabajabilidad, el parámetro para definir la magnitud de esta variable será por medio del cumplimiento normativo de la mesa de sacudidas de acuerdo a la respectiva norma UNE española y la fluidez que debe cumplir el mortero para ser inyectado en la grieta y fisura. Esta fluidez será condicionada mediante el equipo mecánico que se utilizará a pie de obra en la reparación específica de grietas y fisuras, siendo las características del equipo recomendadas y definidas de acuerdo a (Moreno, 2009), en donde se deberá inyectar en la grieta y fisura mediante boquillas con un equipo de presión de 60 libras/pulg<sup>2</sup>. El mortero deberá ser capaz de cumplir con las recomendaciones del equipo de bombeo y atravesar las boquillas para rellenar por presión los volúmenes de las grietas y fisuras a reparar. En este punto se debe considerar que pueden existir dos dosificaciones que definan la reparación ya que la grieta tiene una abertura mayor que una fisura. Esto se debe definir al momento de

---

<sup>83</sup> Cazalla, op.cit, 2002.

reproducir la propuesta de dosificación del mortero en laboratorio y realizar pruebas in situ en los muros patrimoniales para establecer el comportamiento práctico de la dosificación propuesta, siempre será preferente definir una dosificación única para un trabajo ordenado a pie de obra, el tamaño máximo del árido influirá directamente en el requerimiento de la reparación in-situ, de forma tal de asegurar un correcto llenado de las grietas y fisuras en su totalidad.

#### **F) Normativa:**

La dosificación deberá seguir los procedimientos normalizado en España ya que existen limitaciones propias por falta de una normativa específica y adecuada para morteros de cal en Chile. Se deberá cumplir la dosificación en laboratorio de acuerdo a las normas UNE-EN 459-1-2011 y UNE-EN 459-2-2011.

#### **G) Ensayos por resistencias mecánicas en compresión:**

De acuerdo a la caracterización investigada en el presente trabajo y sobre las resistencias mecánicas analizadas en compresión en los morteros de cal cálcica, no alcanzan los valores definidos mínimos a cumplir investigados en la albañilería de 58,12kgf/cm<sup>2</sup> (Galindo, 2008) con respecto a las analizadas en el mortero de cal cálcica de 30,59 kgf/cm<sup>2</sup> a los 182 días, (Boffill *et al*, 2014). Los ensayos experimentales prácticos en laboratorio de acuerdo al mortero de cal dosificado propuesto, deberá cumplir con los valores aproximados de los ensayos en la albañilería. Para ello, será recomendable medir por medio de un ensayo de ultrasonido las probetas para correlacionar los resultados de acuerdo a la ecuación propuesta por (Boffill. *et al*, 2014):

$$R_c (CA-C) = 0.0026 V_u - 3.3471.^{84}$$

---

<sup>84</sup> R<sub>c</sub>, corresponde a la resistencia a la compresión y V<sub>u</sub>, la velocidad ultrasónica aplicada solamente a la cal de origen cálcico.

De esta forma predecir la resistencia mecánica que se puede lograr obtener realizando ensayos reiterados, ya que la correlación de resultados es lineal de acuerdo al gráfico 3. La predicción de las resistencias mecánicas en compresión resuelve el problema práctico en laboratorio ya que no es posible realizar un estudio sobre un mortero de cal para formular una reparación a los 182 días o más, para asegurar el cumplimiento resistente de este.

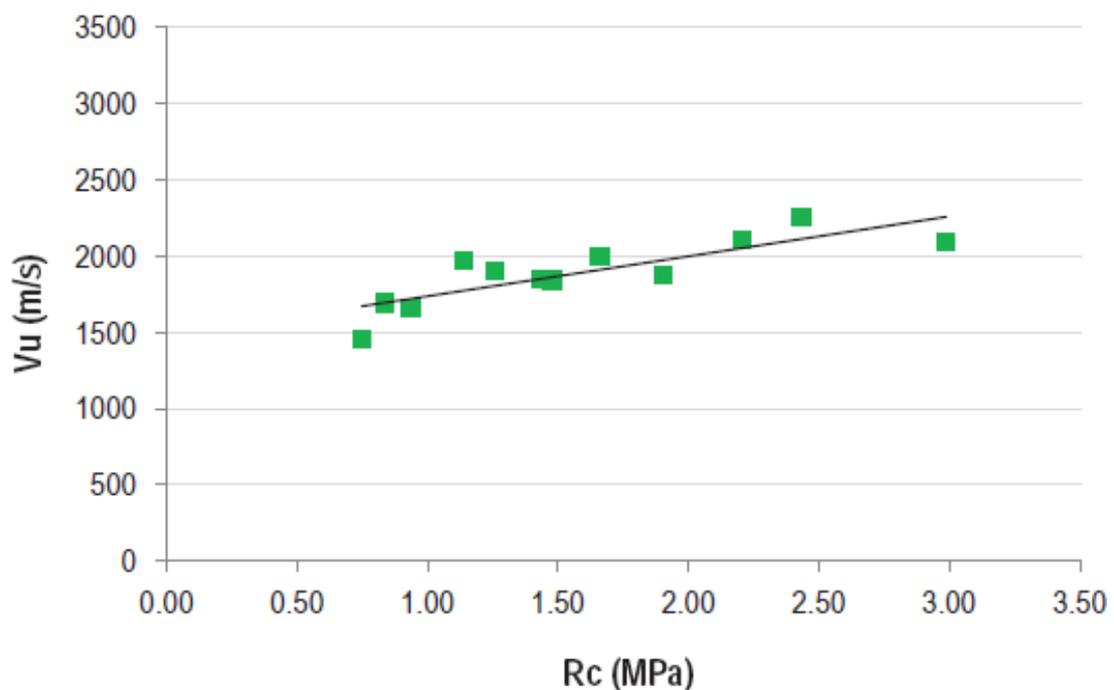


Gráfico 3: Correlación entre la resistencia a compresión (Rc) y la velocidad ultrasónica (Vu), para un mortero de cal cálcica.<sup>85</sup>

<sup>85</sup> Boffill, op.cit, 2014.

## 7.4. RESUMEN DOSIFICACIÓN

Se presenta un resume sobre el capítulo de dosificación:

Criterios de Dosificación		
Criterios	Justificación	Autor
Compatibilidad	Ensayo por Difracción de Rayos X en el mortero de la Basílica del Salvador	Ed. Autor
	“Los criterios de intervención actuales sobre patrimonio arquitectónico establecen que los morteros de restauración, además de reunir las cualidades técnicas necesarias, deben asemejarse en lo posible a los morteros originales”	(Espinoza, 2014)
	“Pues con ellos se construyeron y se revistieron los edificios que ahora se han de restaurar (...).” “Y no utilizarla puede ocasionar lamentables consecuencias estéticas y técnicas, por incompatibilidades físicas, químicas y/o mecánicas (...).”	(Robador, 2014)
Resistencias Mecánicas en Compresión	40 Kg/cm <sup>2</sup>	(González. <i>et al</i> , 1997)
	(43,7 - 56,5) Kg/cm <sup>2</sup>	(Valenzuela, 1991)
	58,1 Kg/cm <sup>2</sup>	(Galindo, 2008)
Trabajabilidad	El mortero estará condicionado de acuerdo a la capacidad de ingreso por la grieta y fisura	Ed. Autor

Tabla 17: Criterios de dosificación de la cal para ser utilizada en el mortero reparador. Ed Autor.

Mortero Reparador Teórico								
Cal	Tipo de árido	Razón Agua/Cal	Aditivos	Relación Aridos/Cal	Durabilidad	Trabajabilidad	Normas	Material a Dosificar
Cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL90- S)	Árido dolomítico y cálcico.	0,8	No utilizar.	Primera opción = 1:2:1 (Una medida de cal por dos medidas de árido dolomítico y una medida de árido cálcico). En peso Segunda opción = 1:3 (Una medida de cal por 3 medidas de árido dolomítico). En peso	Resiste de mejor forma la degradación del agua por ensayo hidráulico, buen comportamiento por ensayo (humedad-sequedad), ensayo heladicidad y cristalización de sales.	Mortero apto para ser utilizado en la reparación de grietas y fisuras.	UNE-EN 459-1-2011 UNE-EN 459-2-2011	Cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL90- S) con árido dolomítico y cálcico.

Tabla 18: Mortero reparador teórico y su dosificación teórica para la reparación de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador. Ed. Autor.

Justificación para la elección de dosificación por el criterio de resistencias mecánicas en compresión para un mortero reparador elaborado de cal:

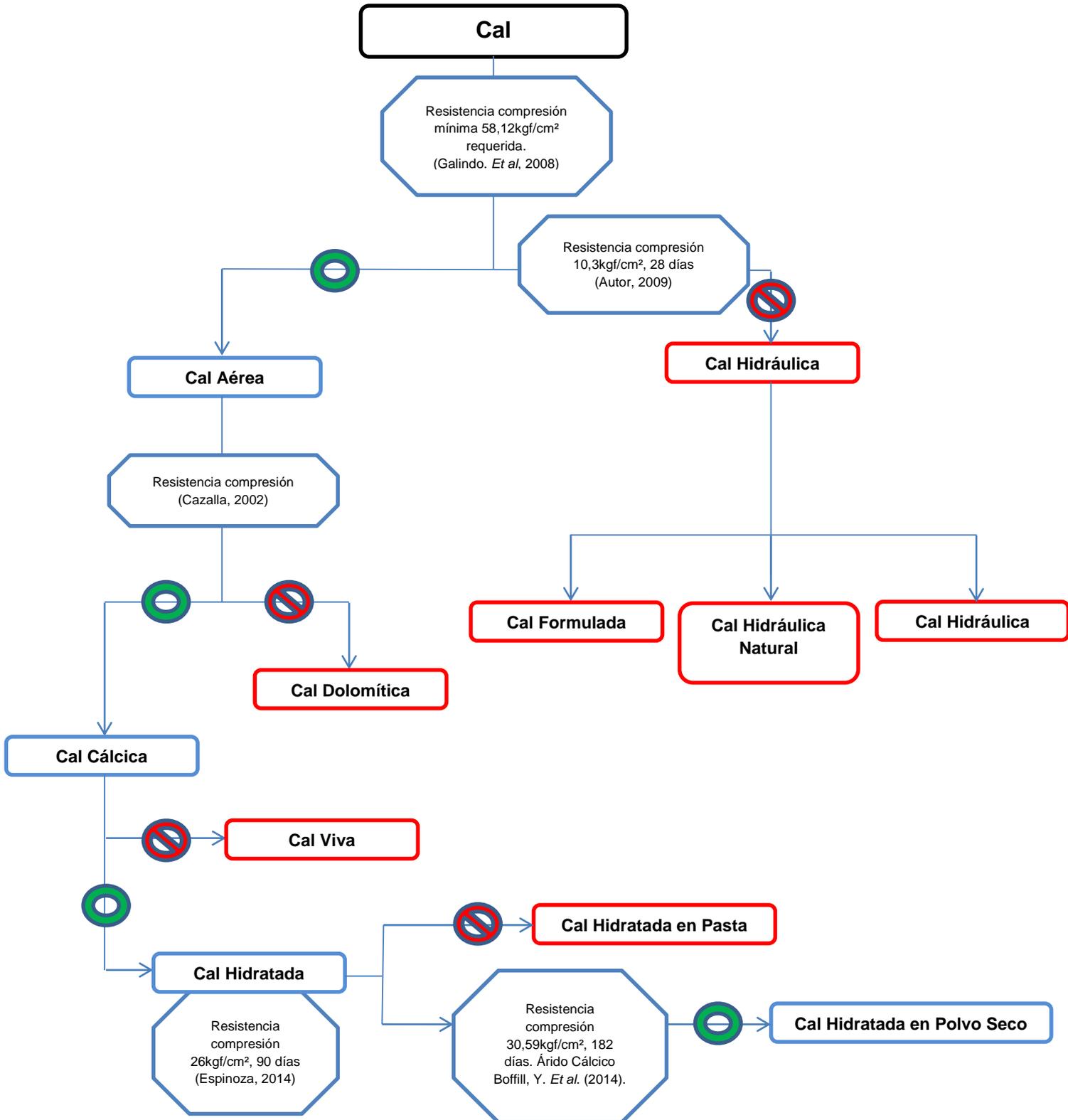


Diagrama 4: Justificación teórica de dosificación. Ed Autor.

Se resumen los ensayos bibliográficos y los análisis para determinar el tipo de cal y árido utilizados en la discriminación de materiales para ser utilizados en el mortero reparador de la Basílica del Salvador:

Justificación Teórica de Dosificación del Mortero de Cal en la Basílica del Salvador						
Análisis del Material	Criterio	Ensayos	Observación	Resultados	Elección de Material	Autor
Albañilería de Ladrillo y Argamasa de Cal	Compatibilidad de material del mortero existente y mortero teórico	Difracción de rayos X al mortero de cal en la Basílica del Salvador	Comprobación técnica del material existente en la obra patrimonial	Es homólogo con el material a utilizar en la reparación	Cal	Ed. Autor
	Resistencias Mecánicas en Compresión	Albañilería de ladrillo y argamasa de cal patrimonial	Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán	Comparación de resistencias mecánicas en compresión de albañilerías para determinar la sollicitación mínima que debe resistir el mortero.	La resistencia mínima en compresión requerida es de 58,1 [kgf/cm <sup>2</sup> ].	Mortero de Cal que cumpla con los requerimientos mínimos impuestos
Galindo Díaz, J. A. (2008)						
Cal Hidráulica		Caracterización de cal hidráulica	Análisis de resistencias mecánicas en compresión	Se observa que la resistencia en compresión obtenida es de 10.3 [kgf/cm <sup>2</sup> ] a los 28 días.	Se determina que es muy inferior a las resistencias mínimas exigidas. Se descarta el material.	Ed. Autor
Cal Aérea Dolomítica y Cal Aérea Cálctica		Propiedades mecánicas	Comparación entre materiales	La cal Cálctica posee mayores propiedades de resistencias mecánicas en compresión que la cal Dolomítica siendo prácticamente el doble más resistente. Se debe utilizar áridos dolomíticos y cálcicos	Cal Aérea Cálctica con áridos dolomíticos y cálcicos	Cazalla. (2002)
Cal Aérea Cálctica Hidratada en pasta y Cal Aérea Cálctica Hidratada en polvo		Morteros para la Iglesia de San Miguel de Jerez de la Frontera	Comparación de aglomerantes con árido definido y dosificado para todas las muestras	Se determina que la Cal Aérea Cálctica Hidratada en pasta posee menores resistencias mecánicas en compresión con respecto a una Cal Aérea Cálctica Hidratada en polvo	Cal Aérea Cálctica Hidratada en polvo seco (CL- S).	Espinoza. (2014)
Cal Aérea Cálctica Hidratada en pasta con árido de origen cálcico y Cal Aérea Cálctica Hidratada en pasta con árido silíceo.		Congreso Latinoamericano REHABEND	Comparación de áridos	Cal Aérea Cálctica Hidratada en pasta con árido de origen cálcico posee mayores resistencias mecánicas en compresión que la Cal Aérea Cálctica Hidratada con árido silíceo.	Árido de origen Cálctico	Bofill, Y, et al. (2014)
Áridos Silíceo, Calcítico y Dolomítico	Granulometría	Microscópico óptico de áridos y su uso en morteros de cal	Comparación entre áridos en un mortero de cal	Se determina que el árido de origen Silíceo favorece la trabajabilidad y el árido de origen cálcico favorece las resistencias mecánicas. No se debe utilizar árido Silíceo por que disminuye las resistencias mecánicas. La trabajabilidad aumenta en el mortero si existe una mezcla entre árido Dolomítico y árido Cálctico	Árido Cálctico y Dolomítico	Cazalla. (2002)
Áridos		Granulometría del aglomerante de la Basílica del Salvador	Análisis de la arena en el mortero de cal en la Basílica del Salvador	Alta presencia de finos, puede existir problemas de adherencia entre la pasta del mortero y la superficie específica del árido. Se debe reducir en la dosificación el módulo de finura.	Arena gruesa evitando presencia de finos. Dando fluidez al mortero para reparación de grietas	Ed. Autor

Tabla 19: Justificación de caracterización por compatibilidad, resistencias mecánicas y trabajabilidad.

Ed. Autor.

## 8. PROPUESTA DE REPARACIÓN.

Se desarrollará una propuesta de reparación general<sup>86</sup> en la cual contempla una propuesta de reparación específica<sup>87</sup>, para la solución de las patologías de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador.

### 8.1. PROPUESTA DE REPARACIÓN GENERAL.

Se propone a continuación una propuesta de reparación general con el objeto de formular un procedimiento por fases de trabajo desde su etapa inicial hasta el término del proceso de reparación de patologías de grietas y fisuras. El objeto de la propuesta de reparación general es comprender que al momento de realizar un trabajo patrimonial no solo consta de la reparación de la patología como una sola actividad sino, involucra varias fases de trabajo que deben ser ejecutadas de forma directa y la omisión de una de ellas puede conducir a un deterioro mayor sobre el edificio en estudio. La elección de este método de propuesta de reparación general corresponde a las recomendaciones de (Nuñez, 2014).

#### A).- Documentación:

Etapa preliminar de la reparación en donde se debe realizar una investigación de la información disponible referente al edificio patrimonial y sus patologías. En la presente investigación, se analizó información variada con respecto a la recopilación histórica, gráfica, fotográfica, caracterizaciones, estudios de materiales con respecto a la cal y ladrillo. Se recomienda incluso que de ser necesario, se deben realizar estudios arqueológicos ya que de acuerdo a (Núñez, 2014). *“Esta es una fase fundamental del proyecto que se suele infravalorar, anteponiendo como objetivo inmediato la ejecución material de los*

---

<sup>86</sup> Núñez Guerrero, C. 2014, “Las técnicas de la cal, apuntes para su conservación y restauración” en Alejandro Sánchez, F, et al. *La cal: investigación patrimonio y restauración*, Sevilla: Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla.

<sup>87</sup> Moreno Sepúlveda, N. 2009, “Apuntes de reparación de grietas de carácter estructural y solicitaciones sísmicas resistentes, *Universidad Andrés Bello*, Santiago.

*trabajos de conservación y restauración (...)*”. Esto puede llevar como ejemplo, a cometer errores técnicos por incompatibilidades de materiales si no se desarrolla esta etapa abarcando la mayor información posible al problema de estudio.

### **B).- Preconsolidación:**

Esta etapa es crítica en el caso de la Basílica del Salvador, ya que se debe asegurar la estabilidad del edificio a intervenir, el trabajo es de una alta peligrosidad y de riesgo estructural. El diseño y propuesta referente al sostenimiento de la estructura como refuerzo, es primordial y solamente consolidando la edificación se puede proponer un trabajo para las grietas y fisuras.

Actualmente se desarrolla una investigación para generar una reparación estructural por el arquitecto (Bozzi. *et al*, 2013) en la cual se proponen aislamientos sísmicos en la base de la estructura y un refuerzo interior. La primera etapa del proyecto se ha iniciado a principios del año 2015 con la ejecución de un refuerzo metálico estructural.

### **C).- Limpieza:**

En esta etapa, comienzan los trabajos preliminares que se deben realizar para la solución de grietas y fisuras de esta forma es recomendable eliminar los agentes degradadores. Esto será crucial para la posterior conservación del edificio. El trabajo de reparación sobre revestimientos interiores o eliminación de cualquier clase de ellos debe quedar documentado y justificado. Según (Nuñez, 2014) no se deberá trabajar sobre una patología sin un tratamiento previo que la elimine.

Para el tratamiento de patologías de eflorescencias en el ladrillo y prevenir la aparición de fisuras, se desarrolló el siguiente procedimiento de acuerdo a (Fombella, 1994)<sup>88</sup>:

#### C.1) Eflorescencia Tipo I:

-Se deberá cepillar con un cepillo no metálico con suficiente fuerza para retirar las sales en la superficie procurando no desgastar la cara del ladrillo, esto se logra lavando la superficie con agua totalmente limpia para arrastrar la eflorescencia.

-Si la eflorescencia tipo I que se sospecha que puede ser la que está presente persiste, se puede mejorar el lavado con una disolución de HCL al 10%, pero teniendo la precaución de no ocupar cerca de refuerzos metálicos y mojando previamente la albañilería con agua para evitar que entre en los poros del ladrillo.

-Mejorar el sistema, protegiendo la albañilería cerca del suelo con una barrera antihumedad ya que el agua escurre por gravedad y se acumula en mayor cantidad en el suelo. Esto es para evitar que las sales acumuladas del lavado reingresen a la albañilería a nivel de la rasante.

#### C.2) Eflorescencia Tipo II:

No se detectan en la estructura.

#### C.3) Eflorescencia Tipo III:

Se eliminan con una solución de HCL al 10%, haciendo el tratamiento descrito como eflorescencia de tipo I. La eflorescencia tipo III es más difícil de eliminar por lavados y se debe repetir la operación reiteradas veces.

---

<sup>88</sup> Fombella, R 1994, "Estructuras de ladrillo", *Ed. Fund. escuela de la edificación*, Madrid.

#### C.4) Otras patologías:

No se detectan en la estructura, pero de acuerdo a (Fombella, 1994), es común su aparición en edificaciones patrimoniales:

##### C.4.1) Manchas de mortero:

Cepillar enérgicamente con un cepillo no metálico y lavar con una solución de ácido clorhídrico en proporción de 1:10 en volumen. No emplear una concentración mayor.

##### C.4.2) Manganeso:

Lavar bien con agua y formar una solución de: 1 parte de ácido acético, 1 parte de agua oxigenada y 6 partes de agua.

##### C.4.3) Óxido de hierro:

Formar una pasta con: 7 partes de glicerina, 1 parte de citrato sódico, 6 partes de agua tibia. Luego lavar con agua.

##### C.4.4) Humo:

Lavar la fachada con detergente comercial, si persiste la mancha se puede aplicar tricloroetileno.

##### C.4.5) Pintura proveniente de graffiti:

Emplear disolvente comercial y lavar con agua. Además se puede ocupar una solución de fosfato trisódico y agua 1:5 en peso. Esto ablanda la mancha y se puede eliminar por cepillo o espátula, luego se lava con jabón y agua, para hacer un enjuague final con agua limpia.

#### C.4.6) Alquitrán:

Producto de repavimentaciones asfálticas de las calzadas, se elimina con espátula, luego limpiar con tetracloruro de carbono.

#### C.4.7) Aceite y grasa

Dependerá del tipo de aceite (mineral o vegetal), en el caso mineral: petróleo y gasolina. En el caso vegetal: aguarrás o tetracloruro de carbono.

#### C.4.8) Hongos y musgo

Se eliminan con una solución de silicofluoruro de magnesio y agua con la proporción 1:40 en peso.

#### C.5) Sulfato de Vanadio

Los tratamientos para la coloración amarilla y verde producto del sulfato de vanadio son con: Ácidos y/o bases, el ácido clorhídrico es una buena solución teniendo las precauciones correspondientes.

El alto poder de penetración de la eflorescencia producto del sulfato de vanadio hace más difícil su eliminación y tiene una alta recuperación en la coloración. Se estima que el sulfato de vanadio es la eflorescencia más agresiva y más difícil de eliminar, pero no pone en riesgo a la estructura. Sólo pone en riesgo y no es menor, a la ornamentación de frescos en el interior producto de una inflorescencia hacia el interior de la Basílica y deteriora el ladrillo produciendo fisuras que con el tiempo hacen desprender partes de él. Se puede considerar un hidro-repelente o barreras antihumedad para su conservación una vez eliminada la patología.

## **D).- Consolidación:**

Etapa crítica de la restauración en el caso de la Basílica del Salvador, se deberá aplicar el mortero reparador de cal dosificado en los muros, como una reparación específica para la solución de grietas y fisuras. De acuerdo a (Núñez, 2014), una vez aplicado el material nuevo en los poros abiertos es prácticamente imposible realizar un proceso reversible ya que los poros quedan saturados de material y existirían problemas de adherencia u otras patologías que se pueden producir. Es importante destacar que favorece a la reparación una resistencia mecánica menor del material nuevo con respecto al actual. *“Esto se debe a la producción de tensiones entre ambos materiales”*<sup>89</sup>.

Se propone un procedimiento específico para la solución de patologías de grietas y fisuras presentes en la Basílica del Salvador el cual se divide en grietas no pasantes, pasantes y fisuras de acuerdo a (Moreno, 2009):

### D.1) Procedimiento para grietas no pasantes:

- 1.- Se deberá determinar el espesor de la grieta estructural, El diagnóstico previo a esta medición, determinará el diámetro de la barra de acero a utilizar.
- 2.- Se realizan ranuras en el sentido perpendicular a la grieta, haciendo este procedimiento en forma mecánica, con un ancho mínimo de 10 cm, luego con un procedimiento manual, se da un relieve irregular para generar adherencia salvo en los encuentros con los arcos ya que quita estabilidad a la estructura existente. En estos encuentros es más factible perforar mediante taladro mecánico hacia el interior del arco, sin hacer un corte ya que debilita su capacidad resistente.
- 3.- La profundidad óptima de la reparación de la grieta es cortar hasta la mitad del muro.

---

<sup>89</sup> Núñez, op.cit, 2014.

- 4.- Dependiendo del ancho de la grieta es la dimensión de la barra de refuerzo de acero de calidad chilena A63 – 42H con estrías para generar buena adherencia y no ocupar barras de refuerzo lisas. Así la barra de acero mínima será de 8mm.
- 5.- El corte perpendicular se realiza cada 30cm. Así hay seguridad que por cada ladrillo existe un refuerzo de acero.
- 6.- Antes de colocar las barras de refuerzo se debe eliminar toda partícula proveniente de los cortes aspirando con equipos mecánicos, no se deberá ocupar aire comprimido para retirar partículas ya que gran parte de estas se depositarán en el interior del corte generando mala adherencia con el mortero reparador y la barra de refuerzo. Esto incluye la no utilización del método de hidrolavado ya que el agua produce deterioro.
- 7.- Se debe utilizar para fijar las barras de refuerzo en los puntos de perforación un puente adherente<sup>90</sup> que sea compatible al mortero de cal y ladrillos.
- 8.- Cuando las barras de refuerzo estén en su correcta posición, colocar un puente adherente compatible en los cortes y sobre las barras de acero así generar una unión firme entre el mortero, la barra de acero y el ladrillo.
- 9.- Las grietas se deberán llenar con el mortero de cal dosificado estudiado, previamente ensayado y demostrando que las resistencias mecánicas mínimas definidas en compresión sean cumplidas.
- 10.- La inyección en la grieta se realizará con una presión de 60 libras/pulg<sup>2</sup>.

---

<sup>90</sup> Se debe considerar investigar la caracterización de un correcto puente adherente. Sin embargo, puede ser factible utilizar cal para fijar la barra de acero en la grieta preparada. Esto se debe determinar de acuerdo a ensayos de tracción entre barra y aglomerante de cal. Así cumplir con los requisitos mínimos de seguridad estructural.

11.- Se recomienda colocar moldajes o encofrados que cubran toda la zona a llenar con perforaciones, así colocar la boquilla, inyectar el mortero y verificar el llenado cuando exista un rebalse del mortero en las perforaciones.

#### D.2) Procedimiento para grietas pasante:

1.- Se deberá seguir el procedimiento como una grieta no pasante con la diferencia de realizar el corte mecánico en las dos caras del muro.

2.- Se debe colocar los encofrados o moldajes en las dos caras. Una cara lisa (muro interior) y otra cara perforada muro exterior, así verificar un correcto llenado en el volumen de la grieta de forma tal de observar la salida del mortero al exterior.

#### D.3) Procedimiento para fisuras:

1.- Se deberá colocar el encofrado con perforaciones de diámetro mínimo.

2.- No se deberá cortar la grieta debido a que generará un mayor daño en la estructura.

3.- Se instalarán boquillas que aseguren su correcta inyección y tener las precauciones de que estas ingresen correctamente entre el diámetro de la perforación del encofrado y la fisura.

4.- Puede existir incompatibilidad por trabajabilidad entre el tamaño de la fisura y el tamaño máximo del árido en el mortero dosificado. De ser así. Se deberá reformular el tamaño máximo del árido (arenas) en el mortero. Para dosificar un mortero más fluido y el cual aseguren su ingreso en la fisura. Es recomendable generar una sola dosificación para realizar los trabajos a pie de obra.

### **E).- Reintegración:**

Corresponde a la etapa en donde se analiza la restitución, homologación y compatibilidad íntegra del material nuevo con respecto al antiguo para asegurar y controlar su conservación. Además, se debe contrastar los procedimientos de restauración (Cartas de Restauración, ver página 20) diferenciando lo existente y lo restaurado en el procedimiento de ejecución. En el caso de grietas y fisuras estas deben ser un elemento visible y contrastado. Que a su vez sea integrado en el edificio patrimonial.

### **F).- Protección:**

La reparación no será eficaz, si no se protege o se conserva lo intervenido. En este punto y en el caso de la Basílica del Salvador se debió trabajar de inmediato después del sismo de 1985. Esto hubiese disminuido notablemente los daños posteriores al sismo del 2010. La falta de leyes y normativas de protección patrimonial junto con el estado de abandono y la nula voluntad han hecho peligrar todas las acciones posteriores de intervención y restauración.

La protección de la restauración de acuerdo a (Nuñez, 2014), debe poseer una cierta flexibilidad debido a la gran envergadura de las obras, se hace prácticamente imposible y costosa su mantención. Por este motivo se debe idear un procedimiento de aplicación con hidrófugos para disminuir costos y proteger los trabajos realizados.

## 8.2. RESUMEN DE PROPUESTA DE REPARACIÓN:

A continuación se desarrollará un resumen sobre el capítulo desarrollado:

Propuesta de reparación general	
Fases	Características
Documentación	Realizar recopilación histórica, gráfica, fotográfica, caracterizaciones, estudios de materiales, de ser necesario investigación arqueológica para recabar la mayor información posible sobre la patología a
Preconsolidación	Se deberá ejecutar un refuerzo estructural antes de generar una acción de reparación
Limpieza	Trabajos preliminares de reparación, se deben eliminar las patologías antes de reparar.
Consolidación	Propuesta de reparación específica a los problemas de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador
Reintegración	Análisis de restitución, homologación y compatibilidad integra del material nuevo utilizado. Estudio sobre los resultados y seguimiento de los procedimientos de restauración
Protección	Proteger o conservar lo intervenido de forma tal de disminuir costos evitando un mantenimiento reiterado.

Tabla 20: Resumen propuesta de reparación general. Ed Autor.

Procedimiento General específico para patologías que originan fisuras y daños visuales			
Patología	Origen	Solución	
Fisuras	Manchas de mortero	Acido clorhídrico	
	Manganeso	Acido acético + agua oxigenada + agua	
	Oxido de hierro	Glicerina + citrato sódico + agua	
	Humo	Detergente + tricloroetileno.	
	Pinturas	Disolvente comercial y agua + fosfato trisódico	
	Alquitrán	Se elimina con espátula, luego limpiar con tetracloruro de carbono.	
	Aceite y grasas		Caso mineral: Petróleo y gasolina.
			Caso vegetal: Aguarrás o tetracloruro de carbono.
	Hongos y musgos	Silicofluoruro de magnesio + agua	
	Vanadio		Con Acidos
		Con Bases	

Tabla 21: Tipos de Patologías de fisuras y su respectiva solución a la problemática de eflorescencias y otros agentes degradadores. Ed. Autor.

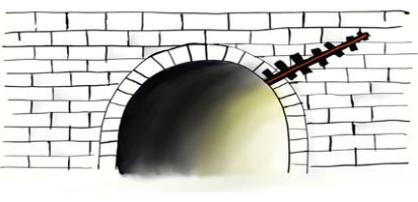
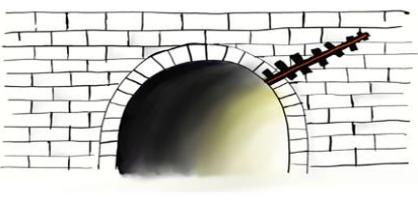
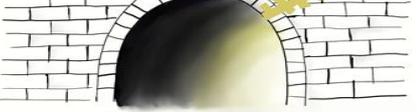
<p>1.- Determinar espesor de la grieta y diámetro de la barra a utilizar</p>	
<p>2.- Se realizarán ranuras en el sentido perpendicular a la grieta, haciendo este procedimiento en forma mecánica, con un ancho mínimo de 10 cm, luego con un procedimiento manual, se da un relieve irregular para generar adherencia salvo en los encuentros con los arcos ya que disminuye la estabilidad de la estructura existente. En estos encuentros es más factible perforar mediante taladro mecánico hacia el interior del arco, sin hacer un corte.</p>	
<p>3.- La profundidad óptima de la reparación de la grieta es cortar hasta la mitad del muro. En los casos con grietas pasantes se deberá seguir el procedimiento indicado por ambas caras</p>	
<p>4.- Dependiendo del ancho de la grieta es la dimensión de la barra de refuerzo de acero de calidad chilena A63 – 42H con estrías para generar buena adherencia y no ocupar barras de refuerzo lisas. Así la barra de acero mínima será de 8mm.</p>	
<p>5.- El corte perpendicular se realiza cada 30cm. Así hay seguridad que por cada ladrillo existe un refuerzo de acero.</p>	
<p>6.- Antes de colocar las barras de refuerzo se debe eliminar toda partícula proveniente de los cortes aspirando con equipos mecánicos, no se deberá ocupar aire comprimido para retirar partículas ya que gran parte de estas se va depositar en el interior del corte generando mala adherencia con el mortero reparador y la barra de refuerzo. Esto incluye la no utilización del método de hidrolavado.</p>	
<p>7.- Se debe utilizar para fijar las barras de refuerzo en los puntos de perforación un puente adherente que sea compatible al mortero de cal y ladrillos.</p>	
<p>8.- Cuando las barras de refuerzo estén en su correcta posición, colocar un puente de adherencia compatible en los cortes y sobre las barras de acero así generar una unión firme entre el mortero, la barra de acero y el ladrillo.</p>	
<p>9.- Las grietas se deberán llenar con el mortero de cal dosificado estudiado. Previamente ensayado y demostrando las resistencias mecánicas mínimas en compresión.</p>	
<p>10.- La inyección en la grieta se realizará con una presión de 60 libras/pulg<sup>2</sup> para tener la seguridad de que no queden zonas sin llenar.</p>	
<p>11.- Se recomienda colocar moldajes o encofrados que cubran toda la zona a llenar con perforaciones, así colocar la boquilla, inyectar el mortero y verificar el llenado cuando exista un rebalse del mortero en las perforaciones.</p>	

Tabla 22: Procedimiento de reparación específico para la solución de grietas no pasantes<sup>91</sup>.

<sup>91</sup> En el caso de grietas pasantes, realizar el procedimiento en las dos caras del muro y la aplicación del mortero será desde el interior al exterior.

## 9. CONCLUSIÓN

Atendiendo al objetivo general propuesto, con respecto a generar una reparación para solucionar las patologías de grietas y fisuras en albañilería de ladrillo y argamasa de cal en la Basílica del Salvador, junto con el desarrollo de los objetivos específicos, se concluye que la dosificación recomendada para generar un mortero reparador que sea capaz de ser utilizado en la propuesta de reparación podría ser elaborado en base a: cal aérea cálcica hidratada en polvo seco (CL90- S) con árido dolomítico y/o cálcico. La proporción sugerida será de 0,8 para (cal/agua), cal y áridos 1:3 (cal/árido dolomítico) y/o 1:2:1 en proporción (cal/árido dolomítico/árido cálcico), en peso. La granulometría a utilizar en la dosificación deberá seguir la curva granulométrica con respecto al gráfico 2 evitando un contenido de finos alto que impida una correcta unión del aglomerante con el árido. La dosificación propuesta es de carácter teórico ya que es necesario realizar un análisis en laboratorio para corroborar los resultados de forma práctica, principalmente los medidos a compresión, de esta forma devolver las propiedades resistentes perdidas en los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal tras la reparación propuesta en el presente trabajo de investigación. No es concluyente el uso de aditivos en el mortero de cal a dosificar, este aspecto se debe estudiar más a fondo con datos teóricos y prácticos.

Referente a la resistencia máxima que se debe especificar en la dosificación del mortero reparador, se determinó que de forma teórica, debiera alcanzar un valor máximo de 58,12 Kg/cm<sup>2</sup> en compresión. Este valor se debe corroborar y analizar mediante ensayos in-situ en la albañilería de ladrillo y aglomerante de cal, ya que puede variar y aumentar la prestación final que el mortero dosificado debe poseer en compresión, siendo esta variable resistente fundamental para determina la naturaleza del mortero de cal, para que cumpla con seguridad la reparación.

Es de obligado estudio, analizar los materiales idóneos que conformará el mortero reparador por medio de las caracterizaciones respectivas para

asegurar la homologación natural de materiales. Es recomendable seguir este proceso y solo reparando con materiales idóneos y caracterizados se evitará un daño adicional en la estructura. Se concluye que los criterios de uso del material en la edificación patrimonial y su relación con el nuevo material para la reparación de grietas y fisuras son la base para la discriminación de materiales en la dosificación del mortero reparador, lo cual las variables de prestación del mortero estarán condicionadas por: compatibilidad, resistencias mecánicas en compresión y trabajabilidad. Se determina que el método de caracterización como procedimiento utilizado en los trabajos realizados en la Catedral de Pamplona, es ordenado, metodológico y analiza en todas las dimensiones las propiedades de los morteros de cal, otorgando una buena aproximación a las propiedades y característica del material en estudio y es factible ser utilizado en la caracterización del mortero de cal en la Basílica del Salvador, pero se debe hacer la salvedad, de que es necesario siempre apoyar la teoría con una comprobación experimental práctica en laboratorio, siguiendo la normativa vigente en España en ausencia de una normativa adecuada para la cal con prestaciones de resistencias estructurales en Chile, así realizar en laboratorio el proceso de elaboración de las probetas y controlando su resistencia mecánica en compresión, este control, podría ser medido a través de la ecuación de (Boffill, Y. *Et al*, 2014), realizando ensayos de ultrasonido en diferentes períodos de tiempo para proyectar las resistencias mecánicas idóneas a obtener, esta ecuación solo se aplica en el caso de una cal aérea cálcica hidratada en polvo seco, otro tipo de cal no es recomendable utilizar y no asegura una proyección eficaz en los resultados.

Las patologías referentes a grietas y fisuras que afectan a un edificio patrimonial en base a ladrillo y aglomerante de cal como es el caso de la Basílica del Salvador, se deben diagnosticar de acuerdo al origen de la patología, en este caso, se determinó que la falla estructural más grave por patologías de grietas es debido a: esfuerzo de corte como grietas pasantes y no pasantes originados por los sismos de 1985 y 2010. Las fisuras no representan un riesgo estructural pero si generan un deterioro a largo plazo y se debe seguir las recomendaciones indicadas como un tratamiento diferente a

las grietas, esto condiciona la acción de reparación a realizar, son de diferente clase y por ende su tratamiento debe ser realizado de forma diferente.

Se recomienda seguir la propuesta de reparación general descrita siguiendo cada una de sus fases: documentación, preconsolidación, limpieza, consolidación, reintegración y protección en donde las soluciones específicas en el caso de la fase de consolidación serán fundamentales para intervenir la estructura, pero sin menoscabar a las fases restantes ya que forman parte integral del proceso de reparación. Será fundamental la evaluación del grado de intervención en la estructura ya que se concluye que para generar una reparación de las grietas existentes es necesario utilizar barras de refuerzo en acero de acuerdo a los métodos tradicionales de reparación, esto lleva a un trabajo mecánico agresivo y se debe analizar el impacto con respecto a los criterios de restauración. En el caso de fisuras la intervención es menor y es factible realizar dicha acción de trabajo ya que es contraindicado el uso de barras de acero evitando cortar la albañilería para evitar mayores daños.

Con respecto al procedimiento específico, se recomienda aplicar un solo tipo de mortero reparador ya que los espesores de inyección de grietas y fisuras son diferentes y pueden representar un problema al momento de aplicar el material. Esto tiene relación al tamaño máximo del árido a utilizar, el cual está directamente condicionado al equipo de presión para la inyección en los encofrados y las aberturas de las grietas o fisuras a tratar. Se sugiere realizar probetas experimentales y realizar reparaciones de control específicas en la albañilería tanto en fisuras como en grietas y de forma preliminar, para determinar su correcta ejecución antes de reparar la edificación en su totalidad de esta forma controlar la variable de trabajabilidad que podría afectar la reparación al momento de ser realizada.

## 10. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

. A continuación se describen las futuras líneas de investigación:

- Reproducir la dosificación del mortero de cal reparador propuesto de forma práctica para analizar sus propiedades y ser utilizado en la Basílica del Salvador para el tratamiento de grietas y fisuras
- Investigar un mortero de cal con propiedades adherentes el cual sea utilizado para generar una correcta unión entre las barras de acero y el mortero reparador.
- Investigar sobre las propiedades de los aditivos en la cal en cuanto a otorgar mayores resistencias mecánicas. Analizando sus ventajas y desventajas al ser incorporado.

## 11. BIBLIOGRAFÍA.

**ALEJANDRE, F, FLORES, A & MARTÍN, J.** (2014), *“La cal: investigación patrimonio y restauración”*, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla.

**ALEJANDRE SÁNCHEZ, F.** (2002). *“Historia caracterización y restauración de morteros”*, Secretariado de publicaciones, Universidad de Sevilla, Sevilla.

**ALVAREZ, J, I, MARTÍN, A, & CASADO, P, G.** (1995). *“Historia de los morteros”*. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico, Sevilla, 13: 52-59.

**ALVAREZ, J, I, MARTÍN, A, & CASADO, P, G.** (1997). *“Propuesta de una metodología analítica de caracterización de morteros antiguos”*, 26ª Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Química César Mira, Cádiz, 2: 645-647.

**ARANDIGOYEN, M & ÁLVAREZ, J, I.** (2006). *“Materiales de construcción volumen 56 número 281”*. CSIC, Madrid.

### **ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN.**

*“UNE-103200-1993: Determinación del contenido de carbonatos en los suelos”*. AENOR, Madrid.

*“UNE-EN 1015-3-2000: Determinación de la consistencia de morteros. Método de la mesa de sacudidas”*. AENOR, Madrid.

*“UNE-EN- 13139/02-2004: Áridos para morteros”*. AENOR, Madrid.

*“UNE-EN 196-1-2005: Métodos de ensayo de cementos, Parte 1: Determinación de Resistencias mecánicas”*. AENOR, Madrid.

“UNE-EN 1015-6-2007: Métodos de ensayo para mortero de albañilerías, Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco”. AENOR, Madrid.

“UNE-EN-1015-11-2007: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero”. AENOR, Madrid.

“UNE-EN-1936-2007: Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total”. AENOR, Madrid.

“UNE-EN-459-1-2011: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad”, AENOR, Madrid.

“UNE-EN-459-2-2011: Métodos de Ensayo”, AENOR, Madrid.

**BARLUENGA, B, G, LACA, R, L, UNDURRAGA, R, & ESTIRADO, F.** (2011). “*Estudio de los paramentos del Patio de Santo Tomás del Colegio Mayor de San Ildefonso*”, Universidad de Alcalá, Alcalá.

**BOFFIL, Y, BLANCO H, LOMBILLO, I, VILLEGAS, L & THOMAS, C.** (2014). “*Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos*”, Congreso Latinoamericano REHABEND, Santander.

**CANO GUILLÉN J, GRAZÓN GARZÓN, E & MARÍN VALIÑO, B.** (2000). “*La Cal Como Aglomerante*”, Servicio de Publicaciones, Universidad de Almería, Almería.

**CASTILLO RUIZ, J.** (1991). “*Jornadas sobre restauración y conservación de monumentos, 24 y 25 de abril de 1989*”, Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Ministerio de cultura, Madrid.

**CAZALLA VÁZQUEZ, O.** (2002). *“Morteros de cal: aplicación en el patrimonio histórico”*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada.

**COSCOLLANO RODRÍGUEZ, J.** (2003). *“Restauración y Rehabilitación de Edificios”*, Thomson paraninfo, Madrid.

**ESPINOSA GAITÁN J.** (2014). *“Estudio de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla)”* en Alejandro Sánchez, F, et al. *“La cal: investigación patrimonio y restauración”*, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla.

**FERNÁNDEZ ALLER, R.** (2014). *“Estructura de la producción de cal en España”* en Alejandro Sánchez, F, et al. *“La cal: investigación patrimonio y restauración”*, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla.

**FLORES ALÉS, V.** (1999). *“Estudio, caracterización y restauración de materiales cerámicos”*, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla.

**FLORES ÁLVAREZ, R.** (1993). *“El caso del sismo 3 de marzo de 1985”*, Hachette, Santiago.

**FOMBELLA, R.** (1994). *“Estructuras de ladrillo”*, Fund. Escuela de la edificación, Madrid.

**FORT, R, ALVAREZ DE BUERGO, M, LÓPEZ DE AZCONA, M, C, MINGARRO, F, VARAS, M, J & SORIANO, J.** (2004) *“Caracterización de la fábrica de ladrillo del Palacio del Infante Don Luis, Boadilla del Monte”*, Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madrid, 2: 578-582.

**GALINDO DÍAZ, J, A.** (2008). *“Caracterización de los ladrillos constitutivos de un puente histórico en Popayán”*, Revista ingeniería e investigación, Colombia, 28: 15-21

**GONZÁLEZ LIMÓN, T., & CASAS GÓMEZ, A, D, L.** (1997). *“Estudio de los materiales y de las fábricas de la Torre de Comares de la Alhambra”*, Junta de Andalucía, Granada.

**GONZÁLVEZ NUEVO, A.** (2010). *“Estudio de los morteros de cal: idoneidad en la rehabilitación del patrimonio arquitectónico”*, Trabajo de fin de máster, Universidad de Sevilla, Sevilla.

**IRUJO, MEZQUIRIZ M, A.** (2004). *“De hidráulica romana: el abastecimiento de agua a la ciudad romana de Andelos”*, Trabajos de arqueología número 17, Navarra.

**MORENO SEPÚLVEDA, N.** (2009). *“Tecnología del hormigón”*, Universidad Andrés Bello, Santiago.

**MORENO SEPÚLVEDA, N.** (2009). *“Apuntes de reparación de grietas de carácter estructural y sollicitaciones sísmicas resistentes”*, Universidad Andrés Bello, Santiago.

**LABORDE, M.** (1987). *“Templos Históricos de Santiago”*, Ed. el Mercurio, Santiago.

#### **NORMA CHILENA INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN.**

*“NCH 2257-1-1996: Morteros, Determinación de la consistencia: Método del extendido en la mesa de sacudidas”*. INN, Santiago.

*“NCH 433 of 1996: Diseño sísmico de edificios”*. INN, Santiago.

*“NCH 2256-1-2001: Morteros, Requisitos generales”*. INN, Santiago.

**NÚÑEZ GUERRERO, C.** (2014). “*Las técnicas de la cal, apuntes para su conservación y restauración*” en Alejandro Sánchez, F, et al. “*La cal: investigación patrimonio y restauración*”, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla, Sevilla.

**LUXÁN, M, P, D. & DORREGO, F.** (2004). “*Caracterización y selección de morteros en la restauración de la Portada de los Reyes*”, Materiales de Construcción, Benavente, Zamora. 54(273): 35-44.

**MOP.** (2009). “*Ministerio de obras públicas*”, Ficha número 97, Registro Monumentos Nacionales Departamento de Arquitectura, Archivo, Santiago.

**ROBADOR GONZÁLEZ, M.** (2014). “*Ennoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta*” en Alejandro Sánchez, F, et al. “*La cal: investigación patrimonio y restauración*”, Secretariado de publicaciones Universidad de Sevilla. Sevilla.

**UNDURRAGA, R, CONDE, J, F, AGUA, F, BARLUENGA, B, VILLEGAS, M & GARCÍA, H.** (2014). “*El hospital de Antezana (Alcalá de Henares, Madrid): Estudio arqueométrico y análisis arquitectónico de ladrillo y morteros.*” Universidad de Alcalá, Madrid.

**VALEK, J & BARTOS, P.** (2001). *Influences affecting compressive strength of modern non-hydraulic lime mortars used in masonry conservation*, In C.A Structural Studies, Repairs and Maintenance of historical buildings. Advances in Architecture Series VII, Brebbia, 571-580.

**VALENZUELA SOLÍS DE OVANDO, C.** (1991). “*La construcción en Chile cuatro siglos de historia*”, Cámara chilena de la construcción, Santiago

## Enlaces web

- **BOZZI, D & PRADO, F.** (2013). *“Obras en la Basílica del Salvador”*, Versión on-line ISSN 0717-6996 ARQ Santiago no. 88, Scielo, Universidad Católica de Chile, consultada Diciembre 2014.

[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-69962014000300003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-69962014000300003&script=sci_arttext)

- **DIANA TORRES.** (2010), “Basílica del Salvador: El símbolo del abandono patrimonial será restaurado”, consultada 5 de mayo 2015,

<http://radio.uchile.cl/2015/03/08/basilica-del-salvador-el-simbolo-del-abandono-patrimonial-sera-restaurado>.

- **EL MERCURIO.** (2009)

<http://www.emol.com>

- **GDA.** (2015), “La Basílica El Salvador y casas del casco antiguo de la capital de Chile, resultaron destruidos por el terremoto”, consultada 25 de Marzo 2015,

[http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra\\_fotogaleria.html?idgal=7888](http://fotos.eluniversal.com.mx/coleccion/muestra_fotogaleria.html?idgal=7888).

- **MARAMBIO MARDONES, E.** (2010), “Fotos de la Basílica del Salvador, consultada 10 de junio 2015”, minube.

<http://www.minube.com.br/fotos/sitio-preferido/897871/5740291>.

- **PAULINA IBARRA.** (2014), “Derrumbes de la Basílica del Salvador”, consultada 5 de mayo 2015,

<http://redesvision.com/articulo.php?var1=11862&var2=1000>.

- **SOMOS9.** (2011), “*El terremoto que azotó la zona central de Chile en 1985 ocurrió en un día como hoy*”, Victoria de Chile, consultada 6 de Mayo 2015.

[http://somos9.cl/2012/03/03/el-terremoto-que-azoto-la-zona-central-de-chile-en-1985-ocurrio-en-un-dia-como-hoy/.](http://somos9.cl/2012/03/03/el-terremoto-que-azoto-la-zona-central-de-chile-en-1985-ocurrio-en-un-dia-como-hoy/)

## 12. ANEXO

### ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografías	Descripción	Autor	Página
1	Vista de la fachada norte de la Basílica del Salvador	Ed. Autor	7
2	Daños estructurales en fachada sur-poniente producto del terremoto de 1985	Ed. Autor	9
3	Daños en el interior de la Basílica del Salvador tras el terremoto de 1985, vista del transepto y la nave central	Somos9	10
4	Vista fachada sur de la Basílica del Salvador en estado de abandono antes del sismo 2010	Ed. Autor	11
5	Vista fachada sur-poniente luego del sismo del año 2010	GDA	12
6	Obras iniciales de refuerzo estructural	Diario U Chile cultura	30
7	Ejemplo de un muro de albañilería fisurado por corte en sentido diagonal. Después de una sollicitación sísmica en el año 1985	Flores Álvarez, R	36
8	Ejemplo de un muro de albañilería fisurado por corte en sentido horizontal y vertical. Después de una sollicitación sísmica en el año 1985	Flores Álvarez, R	36
9	La Basílica del Salvador, vista lateral y fachada sur. Después del sismo del año 2010	Paulina Ibarra	40
10	La Basílica del Salvador, vista interior, pérdida de cielo y muros laterales. Después del sismo 2010	Paulina Ibarra	40
11	La Basílica del Salvador, vista interior. Después del sismo 2010	Marambio Mardones	41
12	Presencia de patología por acción biológica en fachada Este	Ed. Autor	42
13	Eflorescencias detectadas en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	43
14	Fachada Oeste de la Basílica del Salvador antes del sismo del año 2010	Ed. Autor	46
15	Grieta de corte en sentido vertical: Falla por adherencia del mortero	Ed. Autor	47
16	Grietas de corte diagonal	Ed. Autor	47
17	Grietas y fisuras con daños superficiales en el ladrillo	Ed. Autor	48
18	Grieta de corte en sentido vertical	Ed. Autor	48
19	Daño en extremo superior: Grieta pasante	Ed. Autor	48
20	Grieta de corte vertical en la albañilería y grieta pasante	Ed. Autor	48
21	Grieta de corte vertical y pérdida del elemento estructural	Ed. Autor	48
22	Grieta de corte en sentido vertical: Falla de adherencia del mortero pega	Ed. Autor	48
23	Grieta pasante en sentido vertical: Pérdida del arco	Ed. Autor	49
24	Grieta de corte vertical	Ed. Autor	49
25	Grieta de corte vertical	Ed. Autor	49
26	Grieta de corte vertical	Ed. Autor	49
27	Vista de los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	54
28	Albañilería de ladrillo y argamasa de cal analizada sobre el puente Popayan del río Cauca. Se realizan ensayos de caracterización para estudiar propiedades mecánicas	Muñoz, J,C	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Descripción	Autor	Página
1	Resumen cronológico de la Basílica del Salvador	Ed. Autor	24
2	Resumen Cronológico de la Historia de la Cal	Ed. Autor	25
3	Resumen Propiedades y características de la cal	Ed. Autor	25
4	Resumen de la clasificación de la cal y sus procesos químicos	Ed. Autor	25
5	Resumen de cal hidráulica	Ed. Autor	26
6	Resumen sobre cronología de criterios de restauración y su desarrollo en el tiempo	Ed. Autor	27
7	Consecuencia de acción sísmica en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	49
8	Características de fallas en la albañilería en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	50
9	Resultados Granulométricos de la arena en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	58
10	Dosificación, ensayo caracterización mortero de cal hidráulica	Ed. Autor	59
11	Rectificación de fluidez.	Ed. Autor	59
12	Resultados a la compresión después de 28 días de curado	Ed. Autor	59
13	Resumen de procedimientos de caracterización tipo I de ensayos para determinar propiedades en los muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal	Ed. Autor	60
14	Resumen de procedimientos de caracterización tipo II de ensayos para determinar propiedades en muros de albañilería de ladrillo y argamasa de cal	Ed. Autor	61
15	Ensayos de resistencias mecánicas en compresión para morteros de cal analizados	Ed. Autor	61
16	Resumen de caracterización en albañilerías patrimoniales	Ed. Autor	63
17	Criterios de dosificación de la cal para ser utilizada en el mortero reparador	Ed. Autor	76
18	Mortero reparador teórico y su dosificación teórica para la reparación de grietas y fisuras en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	76
19	Justificación de caracterización por compatibilidad, resistencias mecánicas y trabajabilidad	Ed. Autor	78
20	Resumen propuesta de reparación general	Ed. Autor	88
21	Tipos de patologías de fisuras y su respectiva solución a la problemática de eflorescencias y otros agentes degradadores	Ed. Autor	88
22	Procedimiento de reparación específico para la solución de grietas no pasantes	Ed. Autor	89

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagramas	Descripción	Autor	Página
1	Representación esquemática de los tipos de cal y los campos de aplicación	Asociación Española de Normalización y Certificación 2011, UNE-EN-459-1	26
2	Representación esquemática de la metodología de investigación	Ed. Autor	34
3	Procedimiento general de caracterización aplicado en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	65
4	Justificación teórica de dosificación	Ed. Autor	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Descripción	Autor	Página
1	Planta de la Basílica del Salvador y sentido real del sismo del año 1985	Ministerio de Obras Públicas de Chile	39
2	Planta de la Basílica del Salvador sentido más favorable a la sollicitación sísmica del año 1985	Ministerio de Obras Públicas de Chile	39

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráficos	Descripción	Autor	Página
1	Difracción de rayos X a los cristales del mortero en la Basílica del Salvador	Facultad de Física, Universidad de Chile	56
2	Curva granulométrica de los áridos presentes en el mortero de cal en la Basílica del Salvador	Ed. Autor	72
3	Correlación entre la resistencia a compresión ( $R_c$ ) y la velocidad ultrasónica ( $V_u$ ), para un mortero de cal cálcica	Boffill, Y. <i>Et al</i>	75