

MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN DE ELEMENTOS ORIGINALES  
EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES.**

Jorge Enrique Camelo Pineda, Paola Andrea Suárez Pinto, Paola Andrea Velandia Cetina



UNIVERSIDAD  
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá

2024

MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Métodos de reforzamiento estructural en concreto reforzado, para la conservación de elementos originales en edificaciones Patrimoniales.**

**Jorge Enrique Camelo Pineda, Paola Andrea Suárez Pinto, Paola Andrea Velandia Cetina**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil**

**Asesor Técnico Jenny Magaly Pira Ruiz**

**Asesor Metodológico Jenny Magaly Pira Ruiz**



**UNIVERSIDAD**  
**La Gran Colombia**

Vigilada MINEDUCACIÓN

**Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías**

**Universidad La Gran Colombia**

**Bogotá**

**2024**

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>12</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>15</b>
VALOR HISTÓRICO .....	15
VALOR ARQUITECTÓNICO .....	16
VALOR CULTURAL .....	17
IMPORTANCIA SOCIAL .....	18
VALOR ESTÉTICO .....	19
RARIDAD O SINGULARIDAD .....	20
ESTADO DE CONSERVACIÓN .....	21
BIENES DE INTERÉS CULTURAL (BIC) Y SU SIGNIFICADO EN EL PATRIMONIO MATERIAL .....	22
BIENES DE INTERÉS CULTURAL COMO MONUMENTO NACIONAL: SU SIGNIFICADO Y PROTECCION .....	24
SITIOS DE INTERÉS CULTURAL: SU IMPORTANCIA EN EL PATRIMONIO MATERIAL .....	25
BIENES DE INTERÉS CULTURAL MUEBLE: PRESERVANDO TESOROS PATRIMONIALES .....	27
NORMATIVIDAD .....	28
<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>54</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>55</b>
OBJETIVO GENERAL .....	55
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	55
<b>CAPITULO I: MÉTODOS Y TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DISPONIBLES EN LA</b>	
<b>LITERATURACIENTIFICA Y TECNICA.</b> .....	<b>56</b>
TÉCNICA NO. 1: ENCAMISADO CON CONCRETO REFORZADO .....	56

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

TÉCNICA No. 2: ADICIÓN DE MUROS LATERALES O ALAS A COLUMNAS EXISTENTES .....	58
TÉCNICA No. 3: ENCHAPE DE PAREDES O REFUERZO CON MALLA ELECTROSOLDADA. ....	61
TÉCNICA No. 4: REFUERZO CON GEOMALLA EN MUROS DE ADOBE .....	63
TÉCNICA No. 5: SISTEMA DE DRIZAS.....	66
TÉCNICA No. 6: CONSOLIDACIÓN CON EXOESQUELETO DE MADERA. ....	68
TÉCNICA No. 7 INSERCIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO DE CONCRETO ARMADO. ....	70
TÉCNICA No 8. REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO .....	71
TÉCNICA No 9. ADICION DE ELEMENTOS METALICOS O DE FRP.....	74
<b>CAPÍTULO II: PAUTAS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE VALOR PATRIMONIAL. ....</b>	<b>76</b>
REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10. ....	82
1. <i>Información preliminar.</i> .....	82
2. <i>Evaluación de la estructura existente.</i> .....	83
3. <i>Intervención del sistema estructural.</i> .....	84
ESTUDIO DE CASO.....	86
<b>CAPÍTULO III: TÉCNICA(S) DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL MÁS APROPIADA PARA LA INTERVENCIÓN DE ELEMENTOS Y QUE PERMITA CONSERVAR SU ORIGINALIDAD. ....</b>	<b>110</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>118</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Encamisado de Concreto Armado .....	57
<b>Figura 2</b> <i>Corrosión en Pilares</i> .....	58
<b>Figura 3</b> <i>Adición de Muros</i> .....	59
<b>Figura 4</b> <i>Reforzamiento Estructural</i> .....	60
<b>Figura 5</b> <i>Vigas y Columnas de Confinamiento</i> .....	61
<b>Figura 6</b> <i>Detalle de enchape de malla</i> .....	62
<b>Figura 7</b> <i>Instalación y Modelación con Geosteel 2000</i> .....	63
<b>Figura 8</b> <i>Refuerzo con Geomalla</i> .....	64
<b>Figura 9</b> <i>Instalación de Geomalla</i> .....	65
<b>Figura 10</b> <i>Detalle de Instalación Geomalla</i> .....	65
<b>Figura 11</b> <i>Sistema de Drizas</i> .....	66
<b>Figura 12</b> <i>Procedimiento e Instalación de Drizas</i> .....	67
<b>Figura 13</b> <i>Consolidación Exoesqueleto de Madera</i> .....	68
<b>Figura 14</b> <i>Entramado de Madera</i> .....	69
<b>Figura 15</b> <i>Confinamiento de Concreto Armado</i> .....	70
<b>Figura 16</b> <i>Método de confinamiento reforzado</i> .....	71
<b>Figura 17</b> <i>Metodología con Fibras de Carbono</i> .....	72
<b>Figura 18</b> <i>Modelación Edificio Reforzamiento fibra de carbono</i> .....	73
<b>Figura 19</b> <i>Adición de Perfil</i> .....	74
<b>Figura 20</b> <i>Sistema de RFP</i> .....	76
<b>Figura 21</b> FLUJO GRAMA – procedimiento para la correcta evaluación de las estructuras existentes de acuerdo a la Norma Sismorresistente NSR-10.....	85

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

<b>Figura 22</b> <i>Modelo Estructural</i> .....	87
<b>Figura 23</b> <i>Vista Longitudinal del Modelo Estructural</i> .....	88
<b>Figura 24</b> Vigas de acero(izquierda) conformando un diafragma que conecta las cabezas de los nuevos muros estructurales(derecha). .....	90
<b>Figura 25</b> Se construyeron pantallas de refuerzo adosadas internamente en la base de la torre central. ....	90
<b>Figura 26</b> Ocho varillas o tensores proveen estabilidad a las torres esquineras en caso de sismo. Cortesía: Omar Dario Cardona Arboleda, Samuel Dario Prieto Ramirez .....	91
<b>Figura 27</b> <i>Análisis Estático</i> .....	94
<b>Figura 28</b> <i>Modelo Unidimensional</i> .....	95
<b>Figura 29</b> <i>Análisis Dinámico</i> .....	97
<b>Figura 30</b> <i>Deformación y Esfuerzos</i> .....	105
<b>Figura 31</b> <i>Detalle Estructural</i> .....	108
<b>Figura 32</b> <i>Detalle de Anclajes</i> .....	108
<b>Figura 33</b> <i>Distribución de Refuerzo</i> .....	109

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Características Tipo Shell</i> .....	92
<b>Tabla 2</b> <i>Características Tipo Beam</i> .....	93
<b>Tabla 3</b> <i>Propiedades del Concreto</i> .....	93
<b>Tabla 4</b> <i>Análisis Dinámicos</i> .....	96
<b>Tabla 5</b> <i>Ensayos de Muestras</i> .....	98
<b>Tabla 6</b> <i>Acelerogramas</i> .....	100
<b>Tabla 7</b> <i>Espectro de Respuesta</i> .....	102
<b>Tabla 8</b> <i>Características Estratigráficas</i> .....	103
<b>Tabla 9</b> <i>Espectro de Respuesta</i> .....	104
<b>Tabla 10</b> <i>Cuadro Comparativo, Técnicas de Reforzamiento</i> .....	111
<b>Tabla 12</b> <i>Normatividad, Fibra de Carbono</i> .....	114

### Glosario

**Patrimonio cultural:** es un conjunto determinado de bienes tangibles, intangibles y naturales que forman parte de prácticas sociales, a los que se les atribuyen valores a ser transmitidos, y luego resignificados, de una época a otra, o de una generación a las siguientes. Así, un objeto se transforma en patrimonio o bien cultural, o deja de serlo, mediante un proceso y/o cuando alguien -individuo o colectividad-, afirma su nueva condición (Dibam, Memoria, cultura y creación).

**Restauración:** consiste en la recuperación y conservación de obras construidas, algunas de gran importancia y valor histórico. Un experto nos cuenta cuáles son las claves de este arte. Los profesionales que se dedican a la restauración arquitectónica son los responsables de devolverle el esplendor a inmuebles que fueron construidos hace décadas o incluso siglos. Es una labor delicada que demanda un conocimiento detallado de la obra original y, casi siempre, años de trabajo (Amarillo 2019).

**Rehabilitación:** consiste en la recuperación y conservación de obras construidas, algunas de gran importancia y valor histórico. Un experto nos cuenta cuáles son las claves de este arte. Los profesionales que se dedican a la restauración arquitectónica son los responsables de devolverle el esplendor a inmuebles que fueron construidos hace décadas o incluso siglos. Es una labor delicada que demanda un conocimiento detallado de la obra original y, casi siempre, años de trabajo (Amarillo 2019).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Conservación:** De igual manera se aplica para inmuebles que no son compatibles con el contacto, así como a predios sin construir que deben adecuarse a las características del sector urbano. Este nivel busca la recuperación del contexto urbano en términos del trazado, perfiles, parámetros, índices de ocupación y volumen edificado (Secretaría de Planeación 2020).

**Reforzamiento:** Es la autorización para intervenir o reforzar la estructura de uno o varios inmuebles, con el objeto de acondicionarlos a niveles adecuados de seguridad sismo resistente de acuerdo con los requisitos de la Ley 400 de 1997, sus decretos reglamentarios, o las normas que los adicionen, modifiquen o sustituyan y el Reglamento colombiano de construcción sismo resistente y la norma que lo adicione, modifique o sustituya (Ministerio de Vivienda 2022)

**Fibra de carbón:** El polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) se utiliza para sistemas de fortalecimiento estructural confiables y de alto rendimiento. Las soluciones basadas en CFRP consisten en placas y varillas de CFRP, más adhesivos estructurales basados en resinas epóxicas. Estos sistemas se utilizan ampliamente para el fortalecimiento de la flexión de edificios cargados de forma dinámica y estática y otras estructuras como puentes, vigas, techos y paredes, lo que proporciona una excelente durabilidad a largo plazo en el servicio (Sika 2024).

**Geomalla** Una geomalla es un geosintético robusto, ideal para estabilizar superficies, terrenos, cimentaciones o caminos. Utilizadas comúnmente para aplicaciones de refuerzo. Se fabrican principalmente a partir de materiales poliméricos, normalmente polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE) y poliéster (PET) (LDM 2021).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Ingeniería Estructural** es una especialidad de la ingeniería civil que se ocupa de la investigación, planificación, análisis, diseño, construcción, inspección, evaluación, monitoreo, mantenimiento, rehabilitación y demolición de estructuras permanentes y temporales. Adicionalmente, considera los aspectos técnicos, económicos, ambientales, estéticos y sociales de las estructuras (Universidad de Costa Rica 2022).

**Confinamiento Estructural** Los elementos de confinamiento se consideran fundamentales para el confinamiento del muro. Realmente cualquier confinamiento es desarrollado mediante elementos que garanticen que el muro se comporte como solo una unidad. Existen dos (2) tipos de elementos de confinamiento, los elementos verticales (columnetas) y los elementos horizontales (vigas), cada uno de estos tiene características diferentes, que consideran desde su área transversal como el refuerzo utilizado y la ubicación de estos. Algunas consideraciones mínimas establecidas por la NSR, nos indican que el concreto debe tener una resistencia a la compresión mínima de 17.5 MPa y el acero de refuerzo podrá ser liso o corrugado, sin embargo, su límite de fluencia no deberá ser menor a 240 MPa (Construcción y diseño en VIS 2023).

**Concreto Reforzado** Se trata de una mezcla ultra resistente elaborada a base de concreto y acero. Esto quiere decir que el cemento es reforzado con componentes metálicos en forma de armadura de barras o pequeñas fibras. Actualmente es de los más utilizados en la ingeniería civil. Esta combinación surge gracias a que el cemento posee una gran resistencia a la compresión, pero muy poca a la tracción. Para solucionar esto se le agrega el acero, que es un componente que tolera muy bien este tipo de fuerza (Galistor 2023).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Resumen**

Este trabajo es un estado del arte que busca indagar y analizar las diferentes técnicas de reforzamiento estructural implementadas durante la rehabilitación de edificaciones patrimoniales, se realiza un listado teniendo en cuenta las características y aporte de cada una de estas, cada método propuesto se estudia teniendo en cuenta la normativa que nos rige (NSR10) y AIS 610 – EP 17, se establece el método más adecuado y menos invasivo, con el fin de intervenir aquel elemento que sea necesario, conservando su originalidad, ya que el patrimonio es considerado un legado histórico, al constituirse como parte de una historia e identidad, el cual es merecedor de ser protegido para su debida conservación.

Teniendo en cuenta cada uno de los aspectos el método a destacar de forma importante es el “Reforzamiento en fibra de carbono”, el cual cuenta con materiales resistentes a la tracción superior a la del acero, adaptándose a situaciones complejas de deterioro en la estructura. La fibra de carbón es uno de los desarrollos más reciente en el campo de los materiales, donde se puede lograr una baja densidad, resistencia y durabilidad. La implementación de esta técnica se hará necesaria para contrarrestar cada uno de los factores que hace vulnerable una estructura. (Olivera Palomino 2022).

*Palabras claves: Patrimonio, Estructuras en concreto, Reforzamiento, Restauración, Fibra de carbono.*

**Abstract**

In this work, the different structural reinforcement techniques implemented during the rehabilitation of heritage buildings are investigated and analyzed, a list is made taking into account the characteristics and contribution of each of these, each proposed method is studied taking into account the regulations that governs us (NSR10), the most appropriate and least invasive method is established, in order to intervene in that element that is necessary, preserving its originality, since heritage is considered a historical legacy, being constituted as part of a history and identity. , which is worthy of being protected for its proper conservation.

Taking each of the aspects into account, the method that stands out most importantly is “Carbon fiber reinforcement”, which has materials resistant to traction superior to that of steel, adapting to complex situations of deterioration in the structure. Carbon fiber is one of the most recent developments in the field of materials, where low density, very resistant and durable can be achieved. The implementation of this technique will be necessary to counteract each of the factors that make a structure vulnerable.

*Keywords: Heritage, Concrete structures, Reinforcement, Restoration, Carbon fiber.*

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

### **Introducción**

Este documento tiene como fin, desarrollar un listado de las diferentes técnicas, que se han ejecutado en el reforzamiento de aquellas estructuras que son bienes inmuebles patrimoniales tipo edificaciones cuyos materiales en su gran mayoría están compuestos por adobe, tierra y tapia pisada, debido a que la conservación del patrimonio material es de vital importancia en el campo de la arquitectura y la ingeniería. Para lograr este fin, se hará una amplia búsqueda bibliográfica, seleccionando las técnicas usadas a lo largo de la historia, en diferentes países y los más actualizados. En el contexto de la preservación de estructuras históricas, los métodos de reforzamiento estructural sin demolición se destacan como una técnica esencial para asegurar la integridad y autenticidad de estos elementos culturales. Este enfoque se basa en la premisa fundamental de mantener la esencia original de las edificaciones, evitando la alteración irreversible que la demolición conlleva.

En este contexto, el reforzamiento estructural en pro de preservar la originalidad de los elementos en cuanto a su forma y estructuralmente garantizando su funcionalidad, surge como un paradigma innovador y responsable. Esta metodología se funda en el principio de intervenir de manera mínima y selectiva, manteniendo intactos aquellos elementos que conforman el legado arquitectónico. Como señala García et al. (2019), este enfoque requiere una meticulosa evaluación de las características de la estructura, identificando las áreas de mayor vulnerabilidad y aplicando soluciones específicas que aseguren su estabilidad y durabilidad.

Es imperativo reconocer que las estructuras patrimoniales poseen particularidades que las distinguen de las construcciones modernas. Su diseño, materiales y técnicas de construcción, a menudo arraigados en tradiciones centenarias, demandan un enfoque experto y sensible. Como subraya

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Rodríguez (2018), la comprensión profunda de estos elementos históricos es esencial para desarrollar estrategias de reforzamiento que respeten y resalten su autenticidad.

No obstante, la conservación del patrimonio material no es solo una cuestión de preservar la estética arquitectónica. Va más allá, abarcando un compromiso con la memoria colectiva y la identidad cultural de una comunidad. Como apunta Pérez (2020), estas estructuras representan hitos que han sido testigos de eventos y transformaciones significativas a lo largo del tiempo, contribuyendo a la comprensión de la historia y la evolución de una sociedad.

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

### **Marco referencial**

El patrimonio inmueble en Colombia se refiere a los bienes inmuebles que poseen un valor histórico, cultural, arquitectónico o artístico y que están protegidos por la legislación del país. Estos bienes pueden incluir edificios, monumentos, sitios arqueológicos y otras estructuras que reflejan la identidad y la historia cultural de Colombia. La protección de estos bienes está regulada principalmente por la Ley 397 de 1997 (Ley General de Cultura) y otros decretos que establecen procedimientos y criterios para su declaración y conservación (Ministerio de Cultura, 2023; ICANH, 2022).

Las estructuras con valor como patrimonio material presentan una serie de características específicas que les otorgan importancia histórica, cultural o arquitectónica. Aquí hay algunas características destacadas:

### **VALOR HISTÓRICO**

El concepto de valor histórico en las estructuras de patrimonio material ha sido objeto de estudio y análisis por parte de numerosos expertos en el campo de la preservación cultural y la historia del arte y la arquitectura. Autores como John Ruskin (1860) y Nikolaus Pevsner (1964) han discutido la importancia de la arquitectura en la comprensión de la historia, argumentando que las estructuras históricas son testimonios tangibles de épocas pasadas.

El valor histórico de las estructuras patrimoniales se fundamenta en diversas dimensiones. En primer lugar, estas edificaciones están intrínsecamente vinculadas a eventos históricos significativos.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Como señala Smith (1998), algunas estructuras fueron escenarios clave en acontecimientos políticos, sociales o culturales, convirtiéndose en testigos directos de la historia. La importancia de estas estructuras radica en su capacidad para transportar a las generaciones futuras a esos momentos significativos.

Además, el valor histórico se relaciona con la evolución de la arquitectura y las técnicas constructivas a lo largo del tiempo. Autores como Le Corbusier (1923) enfatizaron la importancia de preservar las estructuras antiguas como un medio para comprender la progresión de la arquitectura y el diseño. Estas construcciones representan estilos arquitectónicos específicos que se han desarrollado a lo largo de los siglos, ofreciendo una visión única de la creatividad y habilidades técnicas de cada época.

También se deriva del contexto cultural y social en el que estas estructuras existen. Como destacó Davis (2005), algunas edificaciones son símbolos de identidad cultural y nacional, reflejando creencias, valores y tradiciones arraigadas en la sociedad. Por ejemplo, lugares de culto religioso o palacios reales son ejemplos destacados de estructuras que representan la identidad cultural de una civilización.

### **VALOR ARQUITECTÓNICO**

El valor arquitectónico en las estructuras designadas como patrimonio material es esencial y trasciende la mera estética. Estas edificaciones representan logros arquitectónicos, técnicas constructivas y estilos únicos que reflejan períodos históricos y evolución cultural. Esta dimensión se analiza a través de aspectos como el diseño, la innovación técnica y la influencia en el desarrollo posterior de la arquitectura.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

El interés en esta dimensión ha sido tema de estudio para numerosos expertos en historia del arte y arquitectura. Autores como Frank Lloyd Wright (1939) y Nikolaus Pevsner (1960) han abordado la importancia del diseño y la técnica en la apreciación de las edificaciones. Se fundamenta en la singularidad y la calidad estética de las estructuras. Según Venturi (1977), algunas edificaciones se destacan por su originalidad en diseño, siendo ejemplos paradigmáticos de la creatividad humana. Estas estructuras muestran la habilidad para fusionar funcionalidad, belleza y expresión artística.

Además, este concepto se relaciona con la innovación técnica y constructiva que representan. Autores como Giedion (1941) enfatizaron la importancia de las técnicas empleadas en edificaciones históricas como un legado valioso para el desarrollo posterior de la arquitectura. Por ejemplo, la introducción de arcos o bóvedas en la construcción antigua ha influido en diseños posteriores.

Otro aspecto importante es la influencia que estas estructuras han tenido en el desarrollo de la arquitectura. Autores como Banham (1960) argumentaron que ciertas construcciones históricas sirven como modelos o referencias para los arquitectos contemporáneos, inspirando diseños y enfoques creativos en la arquitectura moderna.

## **VALOR CULTURAL**

El aspecto cultural en las estructuras reconocidas como patrimonio material es esencial, reflejando la identidad, tradiciones y valores de una sociedad. Estas edificaciones representan la historia, las creencias y los logros culturales de una comunidad, siendo símbolos arraigados en la identidad colectiva y el patrimonio cultural.

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Este tema ha sido ampliamente estudiado por investigadores y académicos en antropología, historia y conservación del patrimonio cultural. Autores como Clifford (1988) y Lowenthal (1998) han abordado la importancia de las construcciones históricas en la preservación de la identidad cultural. La conexión intrínseca de estas estructuras con la identidad y las tradiciones de una sociedad es fundamental. Según Smith (2006), algunas edificaciones son símbolos emblemáticos de una cultura, reflejando sus creencias, valores y modos de vida únicos. Por ejemplo, templos religiosos o edificios ceremoniales representan prácticas y rituales arraigados en la cultura de una comunidad.

Además, estas estructuras pueden ser hitos históricos que marcan eventos significativos para una sociedad. Gonçalves (2004) menciona que algunos monumentos conmemoran momentos clave en la historia de un país o una región, preservando la memoria colectiva y transmitiendo enseñanzas a las generaciones futuras. La importancia de estas estructuras como centros de identidad comunitaria también es notable. Autores como Tunbridge y Ashworth (1996) han discutido cómo ciertos edificios históricos sirven como puntos de encuentro y cohesión social para una comunidad, fortaleciendo los lazos culturales y fomentando el sentido de pertenencia.

### **IMPORTANCIA SOCIAL**

La importancia social de las estructuras designadas como patrimonio material radica en su papel como activos comunitarios, que fortalecen la cohesión social, fomentan la identidad y actúan como espacios compartidos para la sociedad. Estas edificaciones tienen un impacto significativo en la vida de las personas, creando vínculos emocionales y contribuyendo al bienestar social.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Este tema ha sido de interés para académicos en campos como la sociología, la antropología y la conservación del patrimonio cultural. Autores como Appadurai (1986) y Smith (2006) han discutido el papel de estos lugares en la configuración de la identidad colectiva y la vida comunitaria.

La capacidad de estas estructuras para servir como puntos de encuentro y cohesión social es fundamental. Según Davis (2005), algunas edificaciones históricas actúan como espacios públicos donde las personas se reúnen, interactúan y establecen vínculos sociales, fortaleciendo el tejido comunitario.

Además, estos lugares son a menudo símbolos de identidad para una comunidad o una nación. Como señaló González (2002), edificios emblemáticos o monumentos históricos pueden generar un sentido de orgullo y pertenencia en las personas que se identifican con su historia y patrimonio cultural.

El papel educativo y de sensibilización que desempeñan estas estructuras también es significativo. Autores como Tunbridge y Ashworth (1996) destacan cómo los sitios históricos y museos sirven como herramientas de aprendizaje, transmitiendo conocimiento y generando conciencia sobre la historia y la cultura.

### **VALOR ESTÉTICO**

El valor estético en las estructuras catalogadas como patrimonio material radica en su belleza, proporción, detalle y expresión artística. Estas edificaciones representan la excelencia estética de su tiempo y son apreciadas por su impacto visual, siendo consideradas obras maestras que trascienden el aspecto meramente funcional.

Este valor ha sido de interés para académicos en la historia del arte, la arquitectura y la conservación del patrimonio cultural. Autores como John Ruskin (1860) y Nikolaus Pevsner (1976) han debatido sobre la importancia de la estética en la apreciación de la arquitectura histórica.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Se fundamenta en la belleza visual y la expresión artística de estas estructuras. Como señaló Ruskin (1860), algunas edificaciones representan la perfección estética de su tiempo, con detalles ornamentales, proporciones armoniosas y una atención meticulosa a la estética.

Además, estas construcciones históricas son apreciadas por su capacidad para evocar emociones y generar experiencias estéticas. Autores como Rowe (1976) han discutido cómo ciertas estructuras históricas impactan emocionalmente a los espectadores, provocando admiración, asombro o inspiración debido a su belleza y refinamiento.

La expresión artística y creativa que estas edificaciones representan es otra dimensión importante. Según Pevsner (1976), algunas construcciones son consideradas obras de arte en sí mismas, reflejando la genialidad creativa de sus arquitectos y artesanos, y siendo apreciadas por su valor estético intrínseco.

### **RARIDAD O SINGULARIDAD.**

La rareza o singularidad de las estructuras designadas como patrimonio material radica en su carácter único, representando técnicas constructivas, estilos arquitectónicos o características excepcionales en comparación con otras edificaciones contemporáneas. Estas estructuras son ejemplares únicos que aportan valor por su escasez y singularidad en el contexto arquitectónico e histórico.

Este tema ha sido objeto de estudio e interés en arquitectura, conservación del patrimonio e historia del arte. Autores como Nikolaus Pevsner (1960) y James Ackerman (1966) han discutido la importancia de identificar y preservar estas estructuras debido a su valor único en el panorama arquitectónico e histórico.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

El carácter distintivo de estas estructuras, en comparación con otras construcciones contemporáneas, es fundamental para su singularidad. Según Pevsner (1960), algunas edificaciones sobresalen por su originalidad en diseño, técnicas constructivas innovadoras o por representar estilos arquitectónicos poco comunes en su época.

Estas construcciones históricas son consideradas raras debido a su escasez en el contexto arquitectónico e histórico. Ackerman (1966) señala que la singularidad puede derivarse de la preservación de ejemplos excepcionales que sobreviven de una época o estilo particular, siendo ejemplares únicos que representan una minoría en el panorama arquitectónico.

La singularidad también puede estar relacionada con características específicas que hacen que una estructura sea única en su tipo. Por ejemplo, la utilización de técnicas constructivas únicas, materiales poco comunes o la preservación de elementos arquitectónicos excepcionales contribuyen a su singularidad y rareza.

### **ESTADO DE CONSERVACIÓN**

El estado de conservación de las estructuras catalogadas como patrimonio material es un factor significativo ya que determina su integridad, autenticidad y longevidad. La evaluación y el mantenimiento continuo de estas edificaciones son fundamentales para preservar su valor histórico, cultural y arquitectónico, asegurando su permanencia para las generaciones futuras.

Este tema ha sido de interés y preocupación en el campo de la conservación del patrimonio cultural. Autores como John Ruskin (1849) y Cesare Brandi (1963) han abordado la importancia de conservar y proteger estas edificaciones para garantizar su supervivencia a lo largo del tiempo.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

El estado de conservación se refiere a la condición física de estas estructuras, incluyendo aspectos como estabilidad estructural, deterioro de materiales, impacto ambiental y medidas de preservación aplicadas. Según Brandi (1963), la conservación es esencial para mantener la autenticidad y la integridad de las estructuras patrimoniales.

La evaluación periódica es trascendental para identificar problemas potenciales y tomar medidas preventivas o correctivas. Ruskin (1849) enfatizó la importancia de la inspección regular y el cuidado meticuloso para prevenir el deterioro progresivo y garantizar la longevidad de las estructuras históricas.

La conservación adecuada incluye la aplicación de técnicas y métodos especializados para mitigar el impacto del envejecimiento, el clima, la contaminación o el uso humano en estas edificaciones. Brandi (1963) señaló que la conservación preventiva, que involucra medidas como limpieza, control de humedad, reparaciones mínimas y protección contra elementos nocivos, y así mantener un estado óptimo de conservación.

En Colombia, el Ministerio de Cultura a través del (Decreto 763 de 2009, 2009) utiliza diferentes categorías para clasificar las estructuras según su valor como patrimonio material. Estas categorías se centran en la importancia histórica, arquitectónica, cultural y social de las edificaciones. Aquí están algunas de las categorías comunes:

### **BIENES DE INTERÉS CULTURAL (BIC) Y SU SIGNIFICADO EN EL PATRIMONIO MATERIAL**

Esta categoría comprende las estructuras consideradas de alto valor patrimonial. Incluye monumentos, conjuntos arquitectónicos, sitios históricos o bienes muebles que tienen un significado

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

excepcional en la historia, la cultura o la arquitectura colombiana. Ejemplos incluyen catedrales, casas históricas, plazas o zonas arqueológicas.

En el ámbito del patrimonio cultural de un país como Colombia, los Bienes de Interés Cultural (BIC) representan pilares fundamentales que encarnan la riqueza histórica, arquitectónica y cultural de la nación. Esta designación, acuñada y regulada por el Ministerio de Cultura, identifica y protege estructuras y elementos que poseen un valor excepcional para la identidad y la memoria colectiva del país.

Según Smith (2010), los BIC abarcan una amplia gama de estructuras, desde monumentos arquitectónicos emblemáticos hasta zonas urbanas enteras, áreas naturales y bienes muebles, cada uno con una historia única que contribuye a la diversidad cultural y el patrimonio histórico de Colombia. Ejemplos notables de BIC incluyen catedrales históricas, casas señoriales, sitios arqueológicos precolombinos y conjuntos urbanos que datan de diversas épocas.

La importancia de los BIC radica en su capacidad para transmitir conocimientos sobre la historia y la cultura colombiana. Como argumenta Pérez (2015), estos bienes actúan como testimonios tangibles que conectan el presente con el pasado, permitiendo a las generaciones actuales comprender y apreciar las tradiciones, estilos de vida y logros de generaciones anteriores.

La designación como BIC implica una responsabilidad significativa en términos de conservación y protección. Autores como Gómez (2018) subrayan que esta categorización conlleva una serie de normativas y medidas específicas destinadas a salvaguardar la integridad y autenticidad de estas estructuras. Esto implica la implementación de planes de conservación, restauración y gestión sostenible para asegurar su supervivencia a lo largo del tiempo.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

La preservación de los BIC no solo se limita a la salvaguardia de su estructura física, sino que también tiene un impacto en la identidad y el desarrollo cultural de las comunidades locales. Como lo expone García (2017), estos bienes son puntos de encuentro que fomentan el sentido de pertenencia, fortalecen la cohesión social y sirven como catalizadores para el turismo cultural, contribuyendo así a la economía local y nacional.

## BIENES DE INTERÉS CULTURAL COMO MONUMENTO NACIONAL: SU SIGNIFICADO Y PROTECCION

Dentro de los BIC, algunos se designan como Monumentos Nacionales por su importancia excepcional. Estos pueden ser edificaciones, sitios arqueológicos o zonas urbanas que representan hitos históricos significativos para el país.

### PROTECCIÓN

En el ámbito del patrimonio cultural de Colombia, los Bienes de Interés Cultural (BIC) designados como Monumento Nacional representan un nivel excepcional de importancia histórica, arquitectónica o cultural dentro del vasto panorama de estructuras patrimoniales. Esta categoría, regulada y reconocida por el Ministerio de Cultura, identifica monumentos específicos que poseen un valor extraordinario y que se consideran esenciales para la identidad nacional y la preservación de la memoria colectiva.

Autores como Pérez (2018) destacan que los Monumentos Nacionales representan hitos fundamentales en la historia de Colombia, desde edificaciones emblemáticas hasta sitios arqueológicos que ilustran aspectos relevantes de la historia del país. Ejemplos notables incluyen antiguas fortalezas, iglesias coloniales, parques históricos y zonas urbanas con valor patrimonial excepcional.

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

La designación como Monumento Nacional conlleva una serie de medidas de protección y conservación específicas. Según Gómez (2019), esta categoría implica la implementación de rigurosos protocolos de preservación, restauración y gestión, garantizando la integridad física y la autenticidad histórica de estos monumentos. Estas medidas buscan evitar alteraciones indebidas y asegurar su permanencia para las generaciones futuras.

La importancia de los Monumentos Nacionales no se limita a su valor histórico o arquitectónico, sino que también impacta en la identidad nacional y en el sentido de pertenencia de las comunidades locales. Como describe Rodríguez (2017), estos monumentos sirven como símbolos de orgullo nacional y elementos fundamentales para la construcción de la identidad colectiva, fortaleciendo los lazos emocionales y culturales entre la sociedad y su patrimonio.

La protección de los Monumentos Nacionales también tiene un impacto significativo en el ámbito del turismo cultural y el desarrollo económico local. Autores como Martínez (2020) señalan que estos monumentos atraen a visitantes nacionales e internacionales, generando oportunidades económicas para las comunidades locales a través del turismo cultural, contribuyendo así a la economía del país.

## **SITIOS DE INTERÉS CULTURAL: SU IMPORTANCIA EN EL PATRIMONIO MATERIAL**

Los Sitios de Interés Cultural representan áreas o paisajes que poseen un valor relevante desde el punto de vista cultural, histórico o arqueológico en Colombia. Esta categorización, establecida por el Ministerio de Cultura, abarca una amplia gama de entornos, desde zonas naturales hasta áreas urbanas, que son portadoras de significados y experiencias fundamentales para la identidad y la historia del país.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Según Ruiz (2015), los Sitios de Interés Cultural son testimonios tangibles de la historia colombiana, revelando capas de narrativas que abarcan desde vestigios arqueológicos precolombinos hasta paisajes urbanos que reflejan la evolución histórica del país. Ejemplos notables de estos sitios incluyen zonas arqueológicas, áreas naturales protegidas, paisajes culturales y conjuntos urbanos con relevancia histórica.

La designación como Sitio de Interés Cultural conlleva la responsabilidad de proteger y preservar la autenticidad y el significado histórico de estos lugares. Según Torres (2018), esto implica la implementación de estrategias de gestión y conservación que salvaguarden la integridad física y la autenticidad cultural de los sitios, al tiempo que se fomenta su accesibilidad y comprensión por parte del público.

La importancia de los Sitios de Interés Cultural radica en su capacidad para transmitir conocimientos sobre la historia y la cultura del país. Como argumenta López (2019), estos sitios actúan como espacios de memoria colectiva que permiten comprender y valorar las tradiciones, prácticas culturales y eventos significativos que han dado forma a la identidad nacional.

Además, los Sitios de Interés Cultural desempeñan un papel de gran importancia en la promoción del turismo cultural y el desarrollo sostenible de las comunidades locales. Autores como Gómez (2021) destacan que estos sitios atraen a visitantes interesados en la historia y la cultura, generando oportunidades económicas para las comunidades a través del turismo cultural y contribuyendo al desarrollo socioeconómico regional.

**BIENES DE INTERÉS CULTURAL MUEBLE: PRESERVANDO TESOROS PATRIMONIALES**

Los Bienes de Interés Cultural Mueble representan elementos, objetos o colecciones que poseen un valor patrimonial significativo para la historia y la identidad cultural de Colombia. Esta categorización, dirigida por el Ministerio de Cultura, abarca una amplia gama de elementos que van desde obras de arte, mobiliario histórico, documentos antiguos hasta artefactos arqueológicos, cada uno de ellos siendo portador de una historia única y valiosa para la identidad nacional.

Según Rodríguez (2017), los Bienes de Interés Cultural Mueble constituyen una parte fundamental del patrimonio cultural de Colombia, actuando como testigos del pasado y facilitadores de la comprensión de diversas épocas y contextos históricos. Ejemplos notables incluyen pinturas emblemáticas, esculturas históricas, libros antiguos, objetos de uso cotidiano de épocas pasadas y artefactos arqueológicos.

La designación como Bienes de Interés Cultural Mueble conlleva la responsabilidad de proteger, conservar y difundir el conocimiento asociado con estos objetos culturales. Como describe Gómez (2019), esta categorización implica el establecimiento de protocolos de conservación especializados que garanticen la preservación física de estos bienes, al mismo tiempo que promuevan su estudio, exhibición y acceso a la población.

La importancia de los Bienes de Interés Cultural Mueble radica en su capacidad para transmitir conocimientos y valores a través del tiempo. Según Torres (2020), estos bienes actúan como vehículos de memoria colectiva, permitiendo a las generaciones actuales y futuras comprender la evolución cultural, artística y social de Colombia.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Además, la preservación de estos bienes juega un papel vital en la educación, la investigación y el enriquecimiento cultural. Autores como Pérez (2018) destacan que estos bienes, al ser estudiados y exhibidos en museos o galerías, contribuyen a la difusión del conocimiento, la promoción del arte y la historia, y fomentan un sentido de identidad y orgullo nacional.

Estas clasificaciones son fundamentales para la protección y preservación del patrimonio cultural en Colombia. Las estructuras clasificadas como BIC o Monumentos Nacionales están sujetas a regulaciones específicas para garantizar su conservación y protección adecuada. Esta clasificación ayuda a priorizar la atención y los recursos para la preservación de las estructuras más significativas en términos de su valor histórico, cultural y arquitectónico para el país.

### **NORMATIVIDAD**

La Ley 397 de 1997

En Colombia representa un hito significativo en la salvaguarda y preservación del patrimonio cultural, abarcando específicamente las estructuras de concreto reforzado de valor histórico y cultural. En un enfoque técnico y académico, esta legislación establece principios fundamentales para la protección, conservación, restauración y promoción del patrimonio cultural en el país.

Esta ley se erige como un marco regulatorio que define y salvaguarda el patrimonio cultural como un conjunto de bienes de valor histórico, artístico, arquitectónico, científico, entre otros, reconociendo su importancia y contribución a la identidad nacional y la memoria colectiva.

Desde una perspectiva técnica, la Ley 397 de 1997 establece una serie de directrices y lineamientos específicos que deben ser considerados al intervenir o realizar modificaciones en estructuras de concreto reforzado con valor patrimonial. Esto incluye la necesidad de obtener

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

autorizaciones y permisos previos para cualquier intervención que pueda afectar la integridad física o valor cultural de estas edificaciones.

Asimismo, la ley promueve la aplicación de técnicas y métodos de conservación y restauración que respeten la autenticidad y originalidad de las estructuras, preservando su valor histórico y arquitectónico. Esto implica el uso de materiales y procedimientos compatibles con la estructura original, así como la consideración de prácticas de refuerzo que no comprometan la integridad del patrimonio cultural.

Además, la Ley 397 enfatiza la importancia de la divulgación, investigación y educación en torno al patrimonio cultural, fomentando la sensibilización y participación de la comunidad en la preservación de estas estructuras, así como la promoción de su valor histórico y cultural en el ámbito nacional e internacional.

El Decreto 763 de 2009

En Colombia representa un avance significativo en la regulación y gestión del patrimonio cultural, específicamente en lo concerniente a la intervención y conservación de estructuras de concreto reforzado de valor histórico. Emitido por el Gobierno Nacional, este decreto reglamenta la aplicación de la Ley 397 de 1997, estableciendo directrices técnicas y procedimientos específicos para la conservación, restauración y manejo del patrimonio cultural en el país.

Desde una perspectiva técnica, el Decreto 763 proporciona lineamientos detallados para la realización de intervenciones en estructuras de concreto reforzado, asegurando que las mismas cumplan con los estándares de conservación establecidos. Establece procedimientos para la obtención

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

de permisos y autorizaciones previas a cualquier intervención, asegurando un enfoque riguroso y planificado en la gestión del patrimonio cultural.

Así mismo, el decreto aborda aspectos técnicos específicos relacionados con el refuerzo de estructuras, enfatizando la necesidad de utilizar métodos y materiales que respeten la autenticidad y originalidad de las edificaciones patrimoniales. Proporciona pautas claras sobre los tipos de intervenciones permitidas, promoviendo técnicas de refuerzo que preserven la integridad estructural sin comprometer el valor histórico y arquitectónico de las estructuras de concreto reforzado.

Una de las principales características técnicas del Decreto 763 es su enfoque integral en la conservación del patrimonio, considerando no solo la parte estructural, sino también la documentación, divulgación, investigación y educación en torno al valor cultural de estas edificaciones.

### **NORMAS TÉCNICAS COLOMBIANAS (NTC).**

Son un conjunto de reglamentos y estándares que regulan y establecen los criterios técnicos para el diseño, construcción, mantenimiento y refuerzo de estructuras de concreto reforzado en Colombia. Estas normativas son desarrolladas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) y se basan en investigaciones, mejores prácticas y avances tecnológicos en ingeniería estructural.

En el contexto del refuerzo de estructuras de concreto reforzado, las NTC abarcan aspectos clave como la resistencia de materiales, métodos de diseño, criterios de seguridad y procedimientos de refuerzo. Estas normas se aplican para garantizar la integridad estructural, la durabilidad y la seguridad de las edificaciones.

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Dentro de los ensayos que se deben tener en cuenta en el momento de realizar el análisis del estado de los materiales que componen las estructuras de concreto, las NTC establece los siguientes ensayos no destructivos o invasivos para realizar un chequeo del estado de los mismos.

### **(NTC-3692) MÉTODO DE ENSAYO PARA MEDIR EL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO.**

La **esclerometría** es una técnica no destructiva utilizada para evaluar la resistencia superficial del concreto mediante un dispositivo llamado **esclerómetro de rebote**. Este ensayo es comúnmente utilizado para determinar la uniformidad y calidad del concreto endurecido in situ.

#### **Aspectos destacados relacionados con la esclerometría en la NTC 3692**

##### **1. Propósito del ensayo esclerométrico:**

- Evaluar la **resistencia a la compresión** del concreto de manera indirecta.
- Identificar áreas de concreto con posibles defectos o inconsistencias en su resistencia.

##### **2. Procedimiento:**

- **Preparación de la superficie:** La superficie del concreto debe estar limpia, seca y libre de irregularidades significativas para asegurar un rebote adecuado del esclerómetro.
- **Uso del esclerómetro:** Se aplican golpes con el dispositivo en la superficie del concreto siguiendo un patrón definido. El valor de rebote se registra en cada punto.
- **Interpretación de resultados:** Los valores de rebote se correlacionan con curvas de calibración específicas para estimar la resistencia a la compresión.

##### **3. Factores que afectan los resultados:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Humedad y textura de la superficie del concreto.
- Edad del concreto.
- Condiciones de curado.
- Presencia de agregados grandes cerca de la superficie.

### 4. Limitaciones:

- Los resultados son una estimación indirecta de la resistencia a la compresión.
- No reemplaza los ensayos destructivos tradicionales, como el de cilindros de concreto.

### 5. Trazabilidad y registro:

- Los resultados deben documentarse y correlacionarse con los registros de construcción para garantizar la trazabilidad de los datos.

## **(NTC-4325) INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PULSO ULTRASÓNICO A TRAVÉS DEL CONCRETO.**

Establece los lineamientos relacionados con la evaluación de materiales mediante ultrasonido, específicamente para aplicaciones no destructivas. Este método es ampliamente utilizado en la inspección de elementos estructurales de concreto y otros materiales en proyectos de construcción e ingeniería.

### **1. Objetivo**

La norma proporciona las directrices para:

- La realización de ensayos ultrasónicos.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- La interpretación de resultados para evaluar propiedades mecánicas y defectos internos en materiales.

### **2. Principios del método ultrasónico**

El ensayo ultrasónico utiliza ondas sonoras de alta frecuencia (generalmente entre 20 kHz y 100 kHz) para:

- Detectar discontinuidades internas, como grietas, poros o vacíos.
- Medir propiedades del material, como la velocidad de propagación de las ondas, que se relaciona con la densidad y elasticidad.

### **3. Aplicaciones comunes**

- Concreto estructural: Evaluar la calidad, uniformidad y detección de defectos internos.
- Acero y metales: Identificación de fisuras internas o soldaduras defectuosas.
- Materiales compuestos: Inspección de delaminaciones o fallas internas.

### **4. Procedimiento de ensayo**

#### **1. Preparación del material:**

- La superficie del material debe estar limpia y accesible.
- En algunos casos, puede requerirse el uso de un acoplante (gel o líquido) para garantizar la transmisión efectiva de las ondas.

#### **2. Configuración del equipo:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Selección de la frecuencia de operación y tipo de transductor según el material y objetivo del ensayo.
- Calibración del equipo para obtener mediciones precisas.

### **3. Emisión y recepción de ondas:**

- Un transductor genera las ondas ultrasónicas que atraviesan el material y son recibidas por otro transductor o por el mismo dispositivo.
- Se mide la velocidad de propagación de las ondas y su comportamiento frente a discontinuidades.

### **4. Registro y análisis de datos:**

- Los tiempos de tránsito, amplitudes y reflexiones de las ondas se analizan para identificar defectos o propiedades mecánicas.

### **5. Interpretación de resultados**

- Velocidad de propagación: Una mayor velocidad generalmente indica un material más compacto y homogéneo.
- Reflexión y atenuación: Cambios significativos en estas propiedades pueden señalar la presencia de grietas, vacíos o variaciones de densidad.
- Trazabilidad de resultados: Se deben documentar los valores obtenidos y las ubicaciones inspeccionadas.

### **6. Factores que afectan el ensayo**

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Humedad del material.
- Tipo y tamaño del agregado en concretos.
- Homogeneidad del material inspeccionado.
- Condiciones de curado y edad del concreto.

### **7. Limitaciones**

- La interpretación de los resultados requiere experiencia y curvas de referencia.
- El método es sensible a las condiciones de la superficie y a la calidad del acoplamiento entre el transductor y el material.
- No es efectivo en materiales altamente heterogéneos sin ajustes en los parámetros del ensayo.

## **(NTC-4483) INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA. CONCRETOS. MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO AL AGUA.**

### **1. Objetivo**

- **Definir un método estándar para medir la resistencia del concreto endurecido a la penetración de agua bajo presión.**
- **Evaluar la calidad del concreto en términos de su impermeabilidad y capacidad para resistir el paso de líquidos.**

### **2. Importancia**

- **Un concreto con baja permeabilidad al agua es menos susceptible a:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Ataques químicos por sulfatos, cloruros o carbonatación.**
- **Corrosión del acero de refuerzo.**
- **Deterioro en condiciones de congelación y deshielo.**
- **Este ensayo es crítico en estructuras expuestas a agua, como presas, canales, tanques, cimentaciones y puentes.**

### **3. Principio del método**

Se somete una muestra de concreto endurecido a agua a presión constante durante un tiempo determinado. Luego se mide la profundidad de penetración del agua, que refleja la permeabilidad del material.

### **4. Procedimiento del ensayo**

#### **1. Preparación de la muestra:**

- **Se utilizan muestras cúbicas o cilíndricas de concreto curado según las especificaciones del proyecto.**
- **La superficie debe estar lisa y sin defectos visibles para evitar fugas de agua no relacionadas con la permeabilidad del material.**

#### **2. Colocación de la muestra:**

- **Se instala la muestra en un dispositivo que permita aplicar presión constante de agua sobre una de sus superficies.**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

### 3. Aplicación de presión:

- Se somete la muestra a una presión de agua específica durante un período establecido (generalmente 48-72 horas).
- La presión típica oscila entre 0.5 y 1 MPa, según la norma o requerimientos del proyecto.

### 4. Medición de la penetración:

- Después del ensayo, se parte la muestra para medir la profundidad máxima de penetración del agua en el concreto.

---

### 5. Resultados

- Profundidad de penetración:
  - Se expresa en milímetros (mm).
  - Un menor valor indica un concreto más impermeable.
- Clasificación del concreto:
  - Los resultados se comparan con los límites establecidos en las especificaciones del proyecto o la norma para determinar la aceptabilidad.

### 6. Factores que afectan la permeabilidad

- Diseño de mezcla:
  - Relación agua/cemento (menores relaciones producen concretos menos permeables).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Uso de aditivos impermeabilizantes o materiales puzolánicos.**
- **Curado:**
  - **Un curado adecuado mejora la densidad y reduce la permeabilidad.**
- **Compactación:**
  - **La ausencia de vacíos internos o porosidades disminuye la penetración de agua.**
- **Condiciones de la muestra:**
  - **La humedad y edad del concreto influyen en los resultados.**

### **(ASTM-C876) MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR EL POTENCIAL DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO SIN REVESTIMIENTO EN EL HORMIGÓN.**

#### **1. Propósito**

- **Determinar el potencial de corrosión eléctrica del acero de refuerzo en concreto.**
- **Identificar áreas propensas a la corrosión antes de que se manifiesten daños visibles.**

#### **2. Principio del ensayo**

- **Se mide el potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia colocado en la superficie del concreto.**
- **Los valores obtenidos reflejan el grado de corrosión del acero embebido.**

#### **3. Aplicaciones**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Evaluación de estructuras de concreto armado, como puentes, edificios, muelles y tanques.**
- **Determinación de áreas críticas para planeación de reparaciones.**
- **Monitoreo del efecto de métodos de protección, como el uso de recubrimientos o sistemas de protección catódica.**

### **4. Equipo necesario**

#### **1. Electrodo de referencia:**

- **Usualmente un electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>) o cloruro de plata.**

#### **2. Voltímetro:**

- **Dispositivo de alta impedancia capaz de medir potenciales eléctricos con precisión.**

#### **3. Cables de conexión:**

- **Para enlazar el electrodo al voltímetro y al acero de refuerzo.**

#### **4. Accesorios:**

- **Agua para humedecer la superficie del concreto (mejora el contacto eléctrico).**

### **5. Procedimiento**

#### **1. Preparación:**

- **Identifica y expón una parte del acero de refuerzo para realizar la conexión eléctrica.**
- **Limpia y humedece la superficie del concreto en el área de ensayo para mejorar la conductividad.**

MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**2. Colocación del electrodo:**

- **Sitúa el electrodo de referencia sobre la superficie del concreto humedecido.**
- **Asegúrate de mantener una buena continuidad eléctrica entre el concreto y el electrodo.**

**3. Medición:**

- **Conecta el acero de refuerzo al terminal del voltímetro.**
- **Mide el potencial eléctrico entre el electrodo de referencia y el refuerzo.**
- **Realiza mediciones en diferentes puntos para identificar zonas con mayor riesgo de corrosión.**

**4. Registro de resultados:**

- **Anota los valores de potencial en cada punto de medición.**
- **Puede ser útil generar un mapa de contornos con los datos obtenidos.**

**6. Interpretación de resultados**

Los valores típicos de potencial medidos con un electrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  se interpretan de la siguiente manera:

Potencial (mV)	Riesgo de corrosión
$\geq -200$	Probabilidad baja (< 10%).
-200 a -350	Probabilidad incierta.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Potencial (mV)	Riesgo de corrosión
$\leq -350$	Probabilidad alta (> 90%).

### 7. Factores que afectan el ensayo

- **Humedad del concreto:**
  - La humedad aumenta la conductividad y puede influir en los valores medidos.
- **Carbonatación del concreto:**
  - Puede afectar las condiciones químicas alrededor del acero y alterar los resultados.
- **Contaminación por cloruros:**
  - Incrementa el riesgo de corrosión en el acero.
- **Temperatura:**
  - Puede influir en los valores de potencial eléctrico.

**UNE-EN 14630 (*Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la profundidad de carbonatación en el hormigón endurecido*).**

#### 1. Principio del ensayo

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- La carbonatación ocurre cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del aire reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) en el concreto, formando carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y reduciendo el pH del material.
  - Este cambio químico puede detectarse usando indicadores de pH, como la fenolftaleína.
- 

### 2. Materiales y equipo

- **Indicador de pH:**
    - Solución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol (generalmente etanol o isopropanol).
  - **Herramientas de corte:**
    - Sierra o martillo para exponer una sección fresca del concreto.
  - **Regla o calibre:**
    - Para medir la profundidad de la zona carbonatada.
- 

### 3. Procedimiento

1. **Preparación de la muestra:**
  - Se expone una superficie fresca del concreto mediante corte o fractura, ya que la carbonatación se mide en la sección recién expuesta.
2. **Aplicación del indicador:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Se rocía o aplica la solución de fenolftaleína sobre la superficie expuesta.
- La fenolftaleína cambia de color en función del pH:
  - Rosa/púrpura: Zona no carbonatada ( $\text{pH} > 9$ ).
  - Incoloro: Zona carbonatada ( $\text{pH} < 9$ ).

**3. Medición de la profundidad:**

- La línea de cambio de color indica la frontera entre las zonas carbonatada y no carbonatada.
  - Se mide la distancia desde la superficie externa hasta la línea de coloración.
- 

**4. Interpretación de resultados**

- Mayor profundidad de carbonatación:
  - Indica mayor penetración de  $\text{CO}_2$ , lo que puede aumentar el riesgo de corrosión del refuerzo.
- Factores que influyen en la carbonatación:
  - Relación agua/cemento (w/c): Relaciones altas favorecen la carbonatación.
  - Calidad del curado.
  - Porosidad del concreto.
  - Exposición al ambiente ( $\text{CO}_2$ , humedad relativa, etc.).

## 5. Limitaciones

- **El ensayo solo mide la profundidad en un punto específico; para resultados representativos, se deben realizar múltiples mediciones en diferentes ubicaciones.**
- **No aplica para concretos que han sido recubiertos con barreras protectoras o impermeabilizantes.**

Las NTC establecen especificaciones detalladas sobre materiales de refuerzo, tales como barras de acero, fibras de carbono o polímeros reforzados, definiendo sus propiedades mecánicas, requisitos de instalación y protocolos de ensayo para verificar su idoneidad estructural.

En cuanto a los métodos de refuerzo, las NTC proporcionan directrices precisas sobre técnicas como el jacketing de concreto, el anclaje de refuerzos, la adición de barras adicionales o el refuerzo con materiales compuestos, detallando los procedimientos de aplicación, los criterios de diseño y los controles de calidad necesarios para asegurar la efectividad del refuerzo.

Estas normas técnicas también abordan aspectos relacionados con la inspección, evaluación y monitoreo de estructuras reforzadas, estableciendo pautas para la supervisión durante y después del proceso de refuerzo, así como para la evaluación periódica de la integridad estructural a lo largo del tiempo.

Las condiciones específicas de las estructuras con valor patrimonial requieren una evaluación meticulosa que considere múltiples factores técnicos, históricos y estéticos para determinar el método de refuerzo más apropiado. Estas condiciones incluyen:

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**El estado de deterioro:** En estructuras de concreto reforzado es un aspecto crítico que demanda análisis riguroso. Según los estudios de Mehta y Monteiro (2006), el deterioro puede manifestarse en diversas formas, incluyendo la corrosión del acero de refuerzo, fisuración del concreto, pérdida de sección transversal debido a procesos químicos y físicos, así como la degradación de las propiedades mecánicas del concreto.

La corrosión del acero de refuerzo es uno de los problemas más comunes y preocupantes. La presencia de agentes agresivos como cloruros, dióxido de carbono y humedad en el entorno de la estructura puede desencadenar la corrosión del acero, comprometiendo su integridad estructural. Este proceso, como señala Bentz (2018), inicia con la formación de óxidos en la superficie del acero, generando presiones internas que llevan a la fisuración y desprendimiento del concreto circundante.

Las fisuras en el concreto, identificadas mediante inspecciones detalladas, pueden ser indicadores tempranos de problemas estructurales. Estudios de González et al. (2012) sugieren que estas fisuras pueden resultar de la expansión por la corrosión del acero o de cargas excesivas aplicadas sobre la estructura. La detección temprana y evaluación de estas fisuras son fundamentales para implementar medidas correctivas antes de que se agraven.

Además, la pérdida de sección transversal debido a procesos físicos y químicos, como la lixiviación y la carbonatación, afecta la durabilidad del concreto. La carbonatación, como indica Mindess et al. (2003), disminuye el pH del concreto, desencadenando la despasivación del acero de refuerzo y favoreciendo su corrosión. Por otro lado, la lixiviación, según estudios de Neville (2011), puede originar la eliminación de compuestos hidratados en el concreto, reduciendo su resistencia y aumentando la porosidad.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

La degradación de las propiedades mecánicas del concreto es otra preocupación relevante. La pérdida de resistencia y rigidez debido al deterioro químico y físico compromete la capacidad estructural. Investigaciones de ACI Committee 201 (2015) indican que la exposición prolongada a condiciones ambientales agresivas disminuye la durabilidad del concreto, impactando su comportamiento mecánico y su capacidad para resistir cargas.

**El valor patrimonial:** de las estructuras de concreto reforzado trasciende su función utilitaria, manifestándose en su significado histórico, cultural y arquitectónico. De acuerdo con las investigaciones de Rodríguez et al. (2019), estas estructuras pueden ser consideradas patrimonio debido a su contribución a la identidad colectiva, representando hitos históricos, avances arquitectónicos significativos o reflejando el estilo de una época particular.

La valoración del patrimonio estructural no solo recae en su antigüedad, sino también en su contexto histórico y social. Según Smith (2015), la relevancia cultural de estas estructuras se nutre de su capacidad para contar historias, transmitir tradiciones y reflejar el desarrollo social y tecnológico de una comunidad a lo largo del tiempo.

La arquitectura y el diseño estructural de estas edificaciones también contribuyen a su valor patrimonial. Investigaciones de García et al. (2018) señalan que la originalidad de su diseño, los métodos constructivos utilizados y su integración con el entorno pueden conferir un valor arquitectónico excepcional, siendo representativos de corrientes estilísticas o técnicas constructivas únicas.

La preservación del valor patrimonial de las estructuras es fundamental. Las investigaciones de Pérez (2020) subrayan la importancia de adoptar estrategias de conservación que respeten la integridad original de estas estructuras, minimizando la intervención y preservando sus características distintivas.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Asimismo, la aplicación de técnicas de reforzamiento estructural debe respetar la autenticidad y singularidad de la edificación para garantizar la preservación de su valor patrimonial.

**La capacidad estructural.** En el contexto de las estructuras de concreto reforzado se refiere a la habilidad de resistir cargas y mantener la integridad estructural bajo condiciones operativas y eventos extremos. Como lo señala Martínez et al. (2018), esta capacidad está influenciada por múltiples factores, incluyendo la resistencia del concreto y del acero de refuerzo, la geometría de la estructura, la distribución de cargas y la presencia de posibles defectos o daños.

La resistencia del concreto es un componente esencial para la capacidad estructural. Según las investigaciones de Li et al. (2016), la resistencia a compresión del concreto es fundamental para soportar cargas verticales, mientras que su resistencia a tracción directa y su capacidad para resistir esfuerzos cortantes son primordiales para enfrentar fuerzas horizontales y de flexión. Además, la calidad del concreto, su durabilidad y su capacidad para resistir agentes agresivos afectan directamente su capacidad estructural a largo plazo.

Por otro lado, la resistencia y comportamiento del acero de refuerzo contribuyen significativamente a la capacidad estructural de las estructuras de concreto reforzado. Investigaciones de Zhang y Ou (2014) indican que la capacidad del acero para resistir tensiones y deformaciones juega un papel clave en la capacidad de la estructura para absorber y redistribuir cargas, previniendo el colapso ante eventos como sismos o cargas excepcionales.

La geometría y distribución de cargas también influyen en la capacidad estructural. Según Torres et al. (2019), una distribución adecuada de las cargas a través de la estructura evita concentraciones excesivas de esfuerzos, para mantener la estabilidad y resistencia de la edificación. Además, una

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

geometría estructural eficiente, con adecuadas relaciones de aspecto y dimensiones, puede mejorar la capacidad de resistir cargas y minimizar la aparición de puntos débiles.

**El entorno y el uso futuro:** de las estructuras de concreto reforzado son aspectos determinantes en su longevidad y sostenibilidad. De acuerdo con estudios de Morales et al. (2017), el entorno en el que se encuentra una estructura puede influir significativamente en su degradación y en la necesidad de medidas de refuerzo. Factores ambientales como la exposición a la humedad, agentes químicos agresivos, cambios climáticos y la salinidad pueden acelerar el deterioro del concreto y el acero de refuerzo, afectando su vida útil.

El uso futuro previsto de las estructuras también es un factor a considerar en su refuerzo. Según Smith y Johnson (2019), la adaptación de las estructuras de concreto reforzado para soportar cargas adicionales, cambios en las condiciones de servicio o la implementación de nuevos sistemas estructurales debe tener en cuenta el potencial de aumento de solicitaciones y deformaciones, así como la necesidad de mantener la integridad estructural.

La evaluación del entorno y la anticipación del uso futuro son fundamentales para el diseño de estrategias de refuerzo efectivas. Investigaciones de García et al. (2020) enfatizan la importancia de realizar evaluaciones exhaustivas del entorno, incluyendo análisis de corrosión, estudios climáticos y de exposición ambiental, para determinar el nivel de riesgo de degradación y establecer estrategias de refuerzo preventivas.

En relación con el uso futuro, es esencial implementar técnicas de refuerzo que se ajusten a las demandas estructurales previstas. Investigaciones de Zheng et al. (2018) sugieren el uso de materiales y métodos de refuerzo compatibles con el comportamiento estructural proyectado, tales como refuerzos

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

externos mediante fibra de carbono o técnicas de reforzamiento interno, optimizando la capacidad de la estructura para adaptarse a futuras condiciones de carga.

**La compatibilidad de materiales** en el refuerzo de estructuras de concreto reforzado es esencial para garantizar la efectividad y durabilidad de las intervenciones. Según investigaciones de García et al. (2019), la selección adecuada de materiales de refuerzo es primordial para asegurar su integración sinérgica con el concreto existente y el acero de refuerzo, minimizando la posibilidad de incompatibilidades que puedan comprometer la eficacia del refuerzo.

La interacción entre los materiales de refuerzo y el concreto original es un punto clave a considerar. Estudios de Li et al. (2017) destacan la importancia de evaluar la adherencia, la resistencia química y la expansión térmica de los materiales de refuerzo en relación con las propiedades del concreto existente. La compatibilidad entre estos materiales es esencial para garantizar una transmisión efectiva de cargas y evitar posibles fallos por deslizamiento o separación.

Además, la compatibilidad entre los materiales de refuerzo y el acero existente es fundamental para mantener la integridad estructural. Según Smith y Johnson (2016), la diferencia en las propiedades mecánicas y coeficientes de expansión térmica entre el acero original y el material de refuerzo puede generar tensiones incompatibles, lo que podría resultar en fallas prematuras si no se seleccionan materiales compatibles.

Es de considerar la durabilidad de los materiales de refuerzo en relación con el entorno y la exposición ambiental. Investigaciones de Zheng et al. (2020) resaltan que la resistencia a la corrosión, la degradación química y la capacidad para resistir condiciones adversas son aspectos determinantes en la selección de materiales de refuerzo compatibles, especialmente en entornos agresivos.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

En cuanto a los elementos estructurales conformados por tapia pisada, tierra y adobe existen ciertos ensayos que permiten establecer la calidad de los materiales y así complementar la información requerida y necesario para poder determinar el método de refuerzo más apropiado.

Dentro de los ensayos más comunes realizados a estos materiales son:

### **1. Ensayos físicos**

- **Análisis granulométrico (ASTM D422 / UNE-EN ISO 17892-4):**
  - Determina la distribución de tamaños de partículas en el suelo utilizado para garantizar una adecuada proporción de arenas, limos y arcillas.
- **Densidad aparente (ASTM D698 / Proctor estándar):**
  - Evalúa la compactación y densidad del material en estado seco y húmedo, lo cual es crucial para la estabilidad de estructuras de tierra.
- **Límites de Atterberg (ASTM D4318):**
  - Define los límites de plasticidad y liquidez del suelo para verificar si es adecuado para construcción.
- **Humedad óptima (Proctor estándar o modificado):**
  - Determina el contenido de agua ideal para compactar la tierra o el barro en elementos como el adobe o la tapia pisada.

### **2. Ensayos mecánicos**

- **Resistencia a la compresión:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Para adobe:
  - Se evalúa en bloques secos y curados según normas como la **UNE 41410**.
- Para tapia pisada:
  - Ensayo en probetas extraídas del muro para evaluar la resistencia en diferentes estratos.
- **Resistencia a la tracción indirecta (ASTM C496):**
  - Evalúa la cohesión del material y la capacidad para resistir esfuerzos de tracción, importante en estructuras sometidas a vibraciones o movimientos sísmicos.
- **Ensayo de flexión:**
  - Determina la resistencia del adobe y la tapia a esfuerzos transversales, especialmente relevante en estructuras que deben resistir cargas laterales.

### 3. Ensayos de durabilidad

- **Absorción de agua y capilaridad (UNE 772-11):**
  - Mide la cantidad de agua que el material puede absorber, lo que afecta la durabilidad frente a ciclos de humedad y sequedad.
- **Resistencia a la erosión (ensayo de lluvia simulada o ASTM D559):**
  - Simula la acción de la lluvia sobre la superficie del material para evaluar la pérdida de material.
- **Ciclos de humedad-sequedad y congelación-deshielo:**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Determinan la estabilidad del material en condiciones climáticas extremas.

### **4. Ensayos específicos de comportamiento sísmico**

- **Ensayos de carga lateral en muros (ASTM E72):**

- Evaluación del comportamiento de muros de tapia pisada o adobe frente a esfuerzos sísmicos mediante pruebas de deformación lateral.

- **Ensayo de vibración o impacto:**

- Se realizan en estructuras completas para medir la respuesta dinámica frente a sismos.

### **5. Ensayos químicos y mineralógicos**

- **pH y contenido de sales:**

- Evaluación del nivel de alcalinidad y presencia de sales solubles, que pueden afectar la cohesión del material.

- **Difracción de rayos X (DRX) o análisis mineralógico:**

- Determina la composición mineralógica de los suelos utilizados.

- **Carbonatación:**

- Estudio del grado de carbonatación en materiales estabilizados con cal o cemento.

### **Consideraciones importantes**

- La naturaleza heterogénea de estos materiales requiere realizar **múltiples ensayos en diferentes muestras representativas.**

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- Los métodos y parámetros de evaluación pueden ajustarse según el contexto local y los estándares nacionales o internacionales disponibles.
- El uso de **estabilizantes**, como cal, cemento o fibras naturales, puede modificar los procedimientos de ensayo.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Metodología de investigación**

La metodología por usar dentro del desarrollo de los métodos de reforzamiento estructural, para la conservación de elementos originales en edificaciones históricas es la metodología de la investigación científica, la cual se puede describir mediante las siguientes fases de desarrollo.

- **INDAGAR, INVESTIGAR.** Se realiza investigación de conceptos y técnicas de reforzamiento estructural, para la conservación de elementos originales en edificaciones históricas.

- **CONSOLIDAR Y EVALUAR LA INFORMACION.** Se realiza el análisis de la información obtenida mediante la fase de investigación, realizando cuadro comparativo con cada una de sus ventajas y desventajas con el fin de identificar pautas para la selección del método adecuado según las características de la edificación.

- **PLANTEAR LA TECNICA DE REFORZAMIENTO MAS APROPIADA.** Posterior a la elaboración del cuadro de ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de reforzamiento se realiza el planteamiento argumentado de la técnica de reforzamiento estructural más apropiada para la conservación de elementos originales en edificaciones históricas.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

### **Objetivos**

#### **Objetivo General**

Analizar los diferentes métodos de reforzamiento estructural aplicables a edificaciones de valor patrimonial, con el propósito de comprender sus principios teóricos y determinar cuál de ellos permite conservar su estado original y garantizar su preservación.

#### **Objetivos Específicos**

- Consultar sobre los métodos de reforzamiento estructural, disponibles en la literatura científica y técnica para edificaciones de valor patrimonial con el fin de mantener su aspecto arquitectónico original y conservación, pero mejorando sus condiciones de desempeño estructural.
- Recomendar pautas para la selección y aplicación de métodos de reforzamiento estructural en edificaciones de valor patrimonial, teniendo en cuenta factores de mejora de servicio, desempeño, pero sin afectar gravemente la integridad arquitectónica cultural.
- Plantear cuál es la técnica de reforzamiento estructural más apropiada para la intervención de edificaciones de valor patrimonial, que permita conservar su valor arquitectónico y cultural, pero mejorando sus condiciones de servicio ampliando su vida útil.

## **CAPITULO I: MÉTODOS Y TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DISPONIBLES EN LA LITERATURA CIENTIFICA Y TECNICA.**

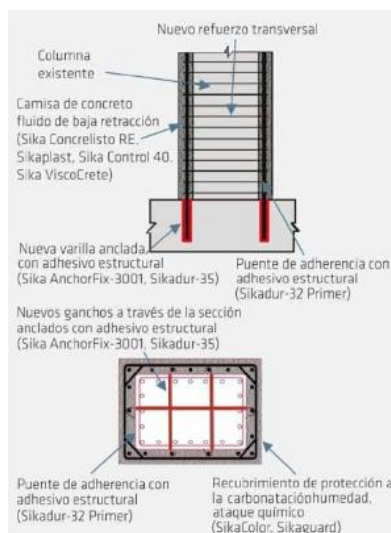
En el contexto de la conservación del patrimonio material, las técnicas de reforzamiento estructural no destructivas representan un avance significativo en la preservación de edificaciones históricas. Estas metodologías, como señala García (2019), se centran en fortalecer las estructuras sin alterar sustancialmente su configuración original. Este enfoque innovador permite a los expertos intervenir de manera precisa y selectiva, minimizando el impacto en elementos arquitectónicos valiosos.

Durante el proceso de investigación se encontraron las siguientes técnicas y métodos que se van a evaluar para determinar, cuáles son las mejores para aplicar en patrimonio culturales.

### **TÉCNICA NO. 1: ENCAMISADO CON CONCRETO REFORZADO**

Esta técnica consiste en cubrir elementos estructurales ya existentes como columnas, vigas y muros, con una capa leve de concreto este se lanza en moldes metálicos alrededor del elemento a reforzar, como se puede apreciar en la ilustración 1, creando así una sección de concreto reforzado mayor a la existente, aumentando el desempeño estructural (Sika,2017).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 1***Encamisado de Concreto Armado*

*Nota:* Encamisado armado sobre una columna, tomado de *Sika Colombia, 2017*.

<https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf>

Un caso específico de esta técnica la desarrollo Amorín y Oliveira (2015), en la restauración del edificio histórico "Casarão" en la ciudad de Rio Branco, estado de Acre, Brasil, se aplicó la técnica del encamisado con concreto para reforzar los pilares estructurales.

Antes de realizar la restauración, un equipo técnico evidenció la necesidad de realizar ensayos de compresión axial en núcleos de concreto extraídos de los pilares, con el objetivo de identificar problemas relacionados con la resistencia del concreto (Amorín & Oliveira,1985). Los análisis posteriores de estos ensayos indicaron que algunos pilares, especialmente en el tramo del sótano, requerían refuerzo estructural debido a la baja resistencia a la compresión del concreto (Amorín & Oliveira,1985).

Así mismo se verifico que las armaduras de algunos pilares presentaban un avanzado estado de corrosión y pérdida severa de masa como se puede observar en la *ilustración 2*, comprometiendo su

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

capacidad resistente a las cargas de servicio (Amorín & Oliveira,1985). por eso Ante la necesidad de reforzar los pilares y considerando los requisitos arquitectónicos y culturales indispensables para preservar el patrimonio histórico, el encamisado con concreto reforzado resultó una solución viable por sus ventajas económicas, rapidez de ejecución y coherencia con el proyecto arquitectónico (Amorín & Oliveira,1985).

### Figura 2

#### *Corrosión en Pilares*



*Nota: Armadura longitudinal corroída en los pilares, Tomado de Refuerzo estructural de una edificación histórica en la Ciudad de Rio Branco- Acre, por Amorín & Oliveira,1985.*

<https://www.scielo.org.mx/pdf/ralconpat/v5n2/2007-6835-ralconpat-5-02-00125-en.pdf>

### **TÉCNICA No. 2: ADICIÓN DE MUROS LATERALES O ALAS A COLUMNAS EXISTENTES**

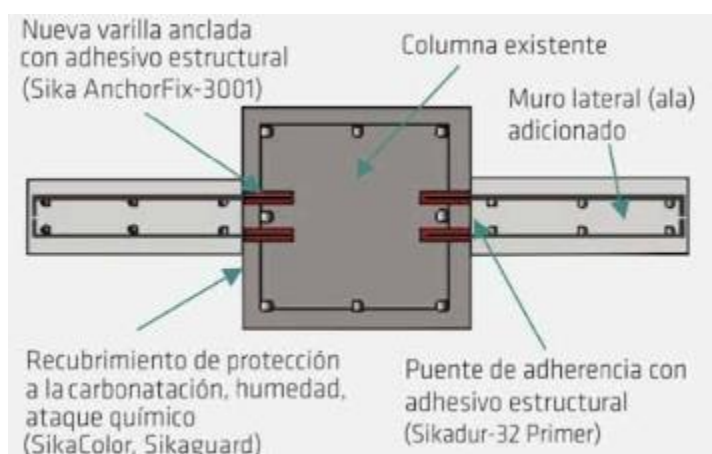
Este método consiste en adicionar muros o alas a los lados de las columnas existentes, utilizando soluciones constructivas similares a las técnicas de enchaquetado o relleno. El diseño del anclaje del nuevo refuerzo debe realizarse considerando la sollicitación de flexión y cortante como se puede apreciar en la ilustración 4 (sika,2.17, pg15).

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Este método también es conocido como adición de muro patín, la finalidad de esta técnica de refuerzo se cataloga en dos, “aquellos donde la unión entre el muro patín y la estructura existente se logra por medio de soldar el refuerzo del muro al de la columna existente, y el procedimiento donde se emplea la unión por medio de anclas post-construcción” (Rincón,2006).

### Figura 3

#### Adición de Muros



*Nota:* adición de muros en columna existente, Tomado de *Sika Colombia, 2017*.

<https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf>

La adición de muros laterales o alas a columnas existentes se usó en la Plaza de toros la Santamaria, edificación declarada patrimonio cultural en 1984 por el (IDPC), En 2015 se inició la primera fase del proyecto, consistente en el reforzamiento estructural y adecuación funcional de la plaza, con una inversión de casi 8.800 millones de pesos. Las obras se entregaron en enero de 2017 después de 18 meses de trabajo (instituto distrital de patrimonio cultural,2019).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Entre las actividades de refuerzo autorizadas por la directora del IDPC, se realizó reforzamientos en los muros del costado occidental mediante pantallas o muros laterales de concreto, por otro lado, se refuerza un cimiento tipo zarpa que esta se utiliza para soportar la estructura de la gradería; remoción de los palcos debido al estado de deterioro y se restituyen mediante nuevos pórticos de concreto y por último el aumento de la sección de concreto en las vigas de gradería como se aprecia en la figura 3. (hernandez,2021, p.13).

**Figura 4***Reforzamiento Estructural*

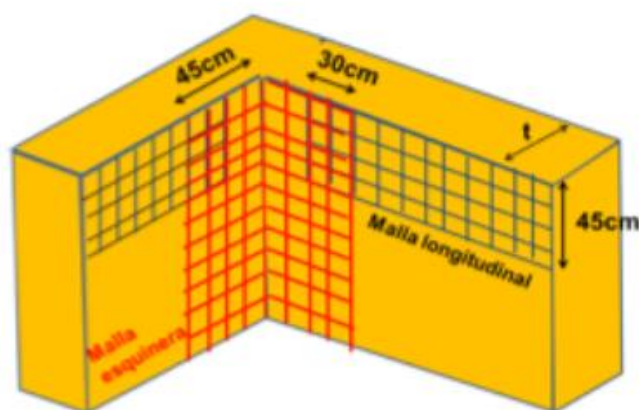
*Nota. Instituto Distrital de Patrimonio Cultural. (s. f.). Reforzamiento estructural y adecuación funcional de la plaza de toros La Santamaría [Fotografía]. ·<https://idpc.gov.co/intervencion-del-patrimonio/obras-de-intervencion-en-patrimonio/reforzamiento-plaza-de-toros-la-santamaria/>*

**TÉCNICA No. 3: ENCHAPE DE PAREDES O REFUERZO CON MALLA ELECTROSOLDADA.**

Esta técnica consiste en instalar mallas electrosoldadas sobre los muros o elemento a reforzar, que posteriormente se recubren con concreto o mortero. Además, se podrán instalar en franjas simulando vigas y columnas de confinamiento como se observa en la ilustración 5, esto con el fin de resistir las fuerzas sísmicas transversales del muro (San Bartolomé, Ángel, & Quiun, Daniel.2015).

**Figura 5**

*Vigas y Columnas de Confinamiento*



*Nota.* Malla longitudinal y traslape con malla esquinera, Tomado de *Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú*, por San Bartolomé, Ángel, & Quiun, Daniel. 2015. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652015000100008](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652015000100008)

En Ecuador, se evaluó el edificio del antiguo Colegio Simón Bolívar, una estructura patrimonial de adobe, se propusieron varias técnicas de reforzamiento para el sistema de muros, como el uso de mallas

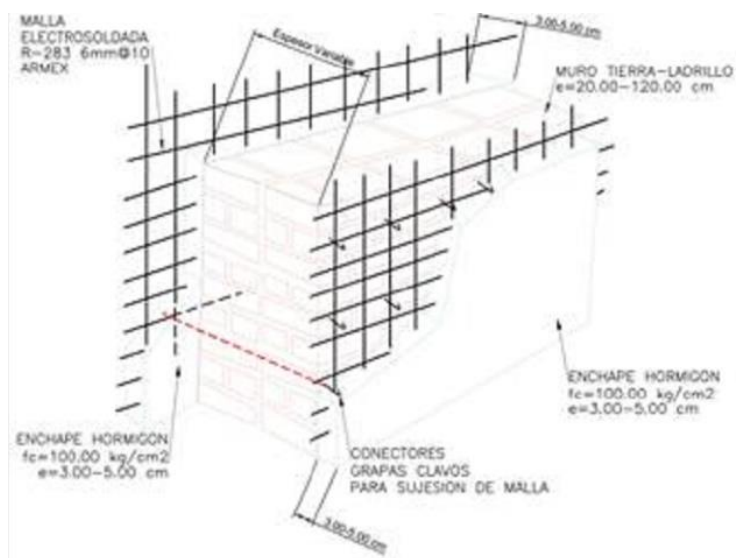
## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

electrosoldadas. Realizando una valoración detallada de la estructura para determinar las necesidades de reforzamiento. (chacón et al.,2021).

De acuerdo con chacón et.al (2021), el uso de mallas permite mejorar la resistencia cortante y flexión de los muros en adobe, aumentando su capacidad de disipar energía ante cargas sísmicas.

### Figura 6

#### Detalle de enchape de malla



*Nota:* Detalle de enchape de malla electrosoldada, para muro en adobe, Tomado de *evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta*, por chacón et al.,2021.[https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/1163/544](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/1163/544).

otro caso de reforzamiento estructural relacionado con el refuerzo de paredes con malla es el del monumento histórico catedral de Tecna, México, donde por medio de análisis estructurales se pudo determinar que la cúpula fallaría en numerosos puntos, por lo tanto, se propone que su reforzamiento sea con el material Geosteel 2000, el cual consiste en un tejido en fibras de acero galvanizado de alta resistencia embebido en una capa de mortero.

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Ante este Análisis avendaño, 2017 deduce que este reforzamiento absorbe parte de los esfuerzos del acero y del concreto, disminuyendo así los esfuerzos de la estructura existente, mejorando su capacidad de resistencia.

### Figura 7

*Instalación y Modelación con Geosteel 2000*



*Nota. diseño propiedades del acero SAP 2000 - Aplicaciones de la Malla Geosteel 2000, Tomado de caso específico para la catedral de tecna, por avendano, 2017. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/414>*

### TÉCNICA No. 4: REFUERZO CON GEOMALLA EN MUROS DE ADOBE

Según Solís et al. (2015), El objetivo principal de esta técnica es que la geomalla se adhiera con los muros de adobe, mejorando su resistencia y ductilidad, esta unión se complementa con un recubrimiento al muro con mortero quedando embebida la geomalla como se muestra en la figura 8, “esta debe estar además anclada al cimiento en la parte inferior del muro y envolverlo en su parte superior o anclarse a la viga collar que lo corone” (Solís et al., 2015, p.10).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 8***Refuerzo con Geomalla*

*Nota: refuerzo de muro con geomalla, Tomado de Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas, por Blondet M,2008,*

<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4406/5075>

Una de las empresas que pone en práctica el uso de las geomallas es Maccaferri, la cual brinda soporte técnico a las casas patrimoniales de Atlixco México como se puede observar en la figura 9, Maccaferri “recomienda el uso de la MACGRID AR que cumple con la resistencia a la tensión de proyecto, la función de la geomalla consiste en envolver al muro para trabajar en conjunto ante movimientos sísmicos” (Maccaferri,2021, p.5).

Maccaferri, (2021) indica que los resultados fueron satisfactorios en las viviendas ya restauradas, proporcionando una alta resistencia a baja tensión, conservando así el patrimonio.

METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 9**

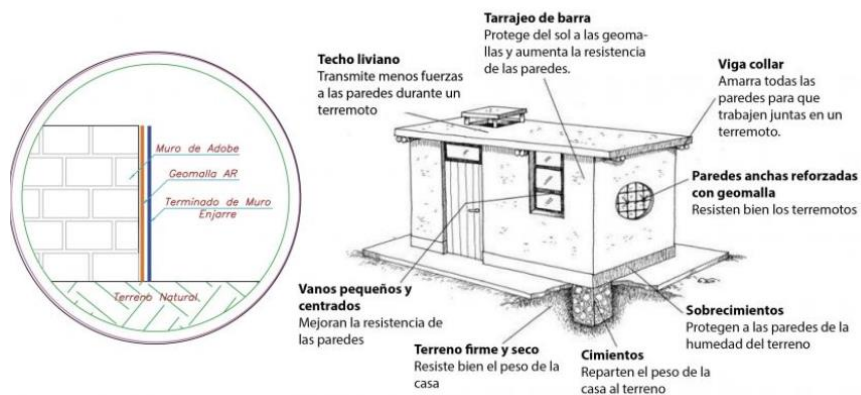
*Instalación de Geomalla*



*Nota: instalación de geomalla en muro de adobe en zona histórica de Atlixco México, de Maccaferri, (2021) <https://www.maccaferri.com/mx/casos-de-%C3%A9xito/uso-de-geomalla-en-muros-de-adobe-para-viviendas-patrimoniales/>*

**Figura 10**

*Detalle de Instalación Geomalla*



## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

*Nota: detalle de instalación de MACGRID AR en viviendas patrimoniales del centro histórico de Atlixco, de Maccaferri, (2021). <https://storage.googleapis.com/maccaferri-2-storage/7eb6bf1f-ad91-43cc-8dcb-e8ac6c5c007e>*

**TÉCNICA No. 5: SISTEMA DE DRIZAS**

El sistema de *Drizas* consiste en un sistema de cuerdas que envuelven los muros de manera vertical y horizontal, a distancias que dependen del tamaño de los adobes, conformando una malla que asegura que los muros de la vivienda no colapsen en el caso de un sismo de gran envergadura (Giribas Camilo, 2017).

**Figura 11**

*Sistema de Drizas*



*Nota: instalación de drizas en casa de adobe, Giribas Camilo, (2017)*

<https://www.archdaily.co/co/803675/sistema-de-drizas-reforzamiento-estructural-para-construcciones-en-adobe>

Este sistema de refuerzo ha sido investigado por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) como una alternativa más accesible que el uso de geomallas, que pueden ser difíciles de obtener

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

en zonas rurales. Según Blondet et al.,2015 Los estudios y ensayos como se aprecian en la ilustración 12, han demostrado que el sistema de drizas es efectivo para mantener la integridad estructural de las construcciones de adobe durante sismos, a pesar de que la resistencia lateral se reduce aproximadamente un 33% en comparación con muros sin refuerzo.

**Figura 12***Procedimiento e Instalación de Drizas*

*Nota: ambiente de adobe reparado y reforzado, por Blondet et al.,2015.*

*<https://www.archdaily.co/co/803675/sistema-de-drizas-reforzamiento-estructural-para-construcciones-en-adobe>*

Esta técnica fue empleada en la restauración de la iglesia San Pedro de Atacama, Chile, edificación considerada de alto valor patrimonial, La iglesia presentaba severos daños estructurales en el techo, muros y cimientos, acumulados con el paso del tiempo y la acción de agentes externos, el “reforzamiento estructural de los muros se realizó mediante enmallado de sogas sintéticas o drizas que se adhiere a los muros de adobe, incluyendo los contrafuertes existentes o nuevos” esto con el fin de mejorar su comportamiento ante sismos (Alfaro et al.,2015, p7).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**TÉCNICA No. 6: CONSOLIDACIÓN CON EXOESQUELETO DE MADERA.**

El sistema consiste en la instalación de una retícula de madera, generalmente de roble, dispuesta a distancias de entre 50 y 100 cm en ambas caras del muro. Estas piezas de madera se conectan entre sí mediante pasadores metálicos galvanizados, formando un exoesqueleto que ayuda a consolidar el muro, especialmente en las zonas más vulnerables como el coronamiento superior y alrededor de los vanos (Torres,2013).

Esta técnica se utiliza para mejorar el comportamiento y la resistencia de los muros de tierra frente a sollicitaciones estructurales como empujes sísmicos. Al crear un sistema de refuerzo exterior, se busca mantener la integridad de los muros existentes sin aumentar significativamente su sección (Torres Gilles,2013).

**Figura 13**

*Consolidación Exoesqueleto de Madera*



## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Nota: consolidación con exoesqueleto de madera, Torres Gilles, C. 2013.

<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/5902/69>

82?inline=1

Este sistema de consolidación de exoesqueleto en madera fue empleado en la restauración de la iglesia santa Inés de la Serena ubicada en Santiago de Chile, considerada monumento nacional.

Guerra Jeraldo, F. (2017) “realizo un estudio para diagnosticar los daños del inmueble e indicar los criterios de intervención pertinentes para su restauración”, la iglesia fue reconstruida con adobe original tratado con técnicas modernas, el sistema constructivo se basó en tabiquería en madera doble como se muestra en la figura 14, con un vacío central para alcanzar el espesor original de los muros de adobe.

#### Figura 14

*Entramado de Madera*



Nota. Entramado de madera en muros laterales e incorporación de elementos cerchas o vigas de madera, por (Guerra Jeraldo, F. 2017). <https://www.redalyc.org/pdf/2817/281722857007.pdf>

**TÉCNICA No. 7 INSERCIÓN DE ELEMENTOS DE CONFINAMIENTO DE CONCRETO ARMADO.**

Esta técnica consiste en agregar vigas y columnas de confinamiento de concreto reforzado, aumentando la resistencia y rigidez de la estructura. Desarrollo esc. (2023, febrero) como reforzar una estructura.

**Figura 15**

*Confinamiento de Concreto Armado*



*Nota.* Reforzamiento estructural, *Desarrollos ESC (2023)*, <https://desarrollosesc.com/que-es-un-reforzamiento-estructural-y-como-hacerlo/>

En la Iglesia de santa marta -Arequipa, Perú, declarada patrimonio cultural por la UNESCO en el año 2000, se presentaron diferentes daños debido a un sismo en el año 2021. Cáceres y Gianmarco (2020), plantearon esta técnica de reforzamiento en algunos puntos de la estructura especialmente en las bóvedas, mediante ensayos y análisis experimentales como se puede observar en la Figura 16.

Mediante estos ensayos “se logra un incremento de la capacidad resistente lateral al insertar elementos de confinamiento tipo pórtico de concreto armado de 8.1 a 6.2 veces y un incremento de 60

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

veces en la capacidad de deformación correspondiente a la máxima capacidad resistente” (Cáceres y Gianmarco,2020, p.71).

**Figura 16**

*Método de confinamiento reforzado*



*Nota.* Comportamiento estructural sísmico estático No lineal, Cáceres Vilca (2020)

<https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstreams/2f54c6fb-771d-4ca7-825a-2fa00872bf4d/download>

### **TÉCNICA No 8. REFORZAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO**

El reforzamiento estructural con fibra de carbono es una técnica que utiliza polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) para fortalecer y reparar estructuras de concreto. Consiste en aplicar láminas o tejidos de fibra de carbono sobre la superficie del concreto utilizando adhesivos epóxicos especiales. (Guzman 2013) Estas se pueden aplicar en vigas, columnas, muros y placas como se puede observar en las siguientes ilustraciones.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 17***Metodología con Fibras de Carbono*

*Nota.* Refuerzo con fibra de carbono, Guzmán Ignacio Nelson, 2013,

<https://es.slideshare.net/slideshow/refuerzos-con-fibra-de-carbono-nelson-guzman-word/18063457#12>

la fibra de carbono es considerada un material clave para el siglo 21 por su excepcional combinación de propiedades mecánicas, térmicas y químicas, que la convierten en un material altamente versátil y demandado en múltiples sectores industriales (Interempresas Plastico 2022).

Este método proporciona una alta resistencia y rigidez a las estructuras superior a la del acero, con una densidad de 4.5 veces menor (Pascual Bolufe,2007).

Estos refuerzos que son adheridos externamente a las estructuras de concreto, madera o metal, han demostrado largamente su eficacia, debido a su extremada resistencia a la tracción. Las láminas de Fibra de Carbono se utilizan especialmente para aumentar la resistencia a la flexión, mientras que las mantas se utilizan con bastante éxito para aumentar la resistencia a cortante (ANCLAF 2021).

Un caso puntual de aplicación de reforzamiento estructural con fibra de carbón fue el edificio parque Santander en Villavicencio Colombia, Donde Ramírez Linares, J. (2023). proponen mediante

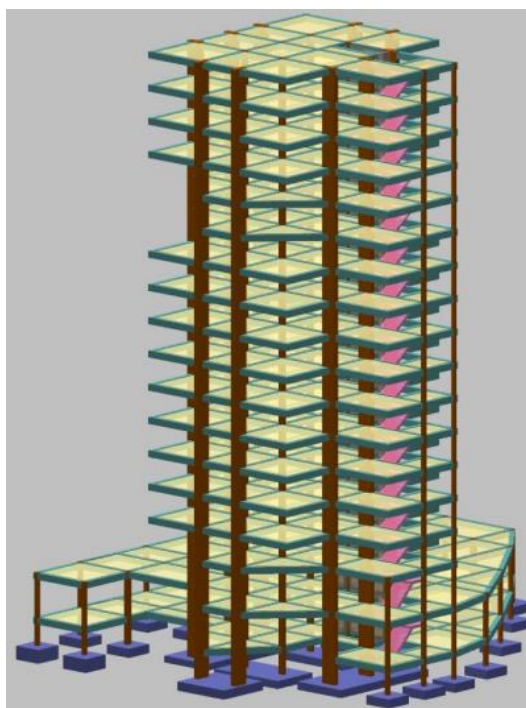
## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

ensayos de laboratorio y cálculos teóricos, que el uso de la fibra de carbón puede incrementar la capacidad a la resistencia de las columnas del edificio en un 185 %, ya que este material es adecuado para el reforzamiento de elementos estructurales que trabajan a compresión, como las columnas.

Esta propuesta de reforzamiento con fibra de carbono es una alternativa viable, efectiva y poco invasiva que permite adaptar la edificación a los requisitos de la norma sismo-resistente NSR-10 sin mayores interrupciones en el funcionamiento del edificio (Ramírez Linares, J. 2023).

**Figura 18**

*Modelación Edificio Reforzamiento fibra de carbono*



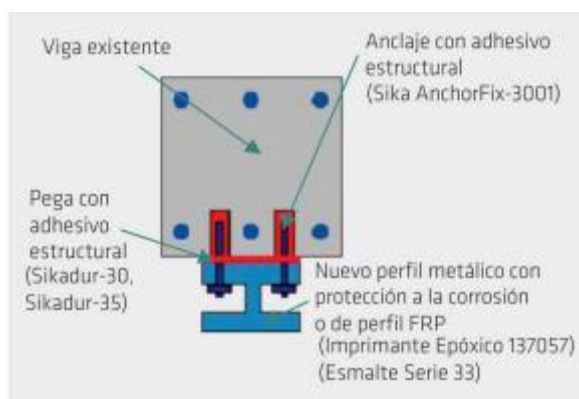
*Nota.* Propuesta de reforzamiento estructural con fibra de carbón para el edificio Parque Santander, Villavicencio. Ramírez Linares, J. 2023. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/49743>

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**TÉCNICA No 9. ADICION DE ELEMENTOS METALICOS O DE FRP**

Esta técnica se basa en la incorporación estratégica de elementos metálicos o compuestos de FRP a la estructura existente, proporcionando beneficios significativos con un impacto visual y estructural reducido.

La aplicación de elementos metálicos, como perfiles, ángulos, placas y barras, ofrece una alternativa robusta para reforzar estructuras. Según Smith y colaboradores (2018), este método ha demostrado mejorar la capacidad de carga de manera sustancial, permitiendo una distribución más efectiva de las fuerzas en la estructura. La adición de elementos metálicos puede realizarse de manera selectiva, focalizándose en áreas críticas que requieran refuerzo sin comprometer la estética general del edificio.

**Figura 19***Adición de Perfil*

*Nota. Adición de nuevo perfil de acero o de FRP a una viga existente, por Sika Colombia sas.*

(2017). <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee->

[edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf](https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf)

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Por otro lado, el uso de polímeros reforzados con fibra (FRP) ha ganado terreno en la ingeniería estructural debido a su alta resistencia y ligereza. Según los estudios de Johnson et al. (2019), la aplicación de FRP como refuerzo estructural ha demostrado ser particularmente eficaz en entornos corrosivos, ya que estos materiales son resistentes a la corrosión, prolongando la vida útil de la estructura. Además, el FRP puede ser moldeado y aplicado de manera más flexible que los elementos metálicos, adaptándose mejor a formas complejas y reduciendo el impacto visual.

Ambas variantes de esta técnica comparten ventajas clave, como la capacidad de mejorar la resistencia sin añadir un peso significativo a la estructura existente. Según las investigaciones de Anderson (2020), esto es especialmente valioso en proyectos de restauración, donde el aumento de carga puede ser un factor crítico. La ligereza de los elementos metálicos y del FRP facilita la implementación sin causar una carga excesiva en la estructura original.

una edificación patrimonial que ha sido reforzada con elementos metálicos o con materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra (FRP) incluye:

El edificio histórico en Ebensburg, Pennsylvania donde los muros en mampostería fueron reforzados utilizando un sistema de FRP que incluía telas de fibra de vidrio y carbono como se muestra en la figura 20. El objetivo fue aumentar la resistencia a cortante para cumplir con los nuevos códigos de construcción relacionados con sismos y viento (QuaKeWrap,2007).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 20**

*Sistema de RFP*



*Nota. Instalación de tela en fibra de vidrio, por QuaKeWrap,2007,*

[https://quakewrap.com/esp/project\\_sheets/Historic-Masonry-Building-Strengthened-with-Glass-and-Carbon-FRP.pdf](https://quakewrap.com/esp/project_sheets/Historic-Masonry-Building-Strengthened-with-Glass-and-Carbon-FRP.pdf)

## **CAPÍTULO II: PAUTAS PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL EN EDIFICACIONES DE VALOR PATRIMONIAL.**

Teniendo en cuenta las características específicas de las estructuras y su valor como patrimonio material, La selección y aplicación de métodos de refuerzo estructural en estructuras de concreto reforzado requiere consideraciones precisas para preservar su valor patrimonial y garantizar su integridad estructural. Según estudios de García et al. (2021), las recomendaciones para esta selección implican evaluar exhaustivamente el estado de la estructura, identificar los agentes causales de deterioro y comprender su valor histórico y arquitectónico.

La primera etapa es realizar una evaluación detallada de la estructura. Investigaciones de Martínez y Torres (2018) indican la importancia de realizar inspecciones visuales, pruebas de laboratorio

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

y análisis estructurales para determinar el estado actual, identificar daños existentes y evaluar la capacidad de carga residual. Esta evaluación permite establecer el nivel de intervención necesario y la selección adecuada de métodos de refuerzo.

Posteriormente, se debe considerar la compatibilidad entre el método de refuerzo y las características específicas de la estructura. Según González et al. (2019), la selección del método de refuerzo debe adaptarse a la geometría estructural, las condiciones de carga, el material de refuerzo y la interacción con el concreto existente. Por ejemplo, el refuerzo mediante fibra de carbono puede ser más adecuado para zonas con restricciones de espacio o necesidades estéticas.

Es esencial que estos métodos de refuerzo respeten y preserven el valor patrimonial de las estructuras. Según Rodríguez et al. (2020), los métodos deben ser aplicados de manera que no comprometan la integridad arquitectónica original ni alteren significativamente su apariencia. Esto implica una cuidadosa consideración de la estética y la integración del refuerzo para minimizar el impacto visual en estructuras de valor histórico o cultural.

Las intervenciones de refuerzo deben estar respaldadas por un plan de monitoreo y mantenimiento continuo. Estudios de Pérez y Gómez (2017) destacan la importancia de establecer programas de seguimiento periódico para evaluar la eficacia del refuerzo, monitorear la evolución de posibles daños y asegurar la efectividad a largo plazo de las intervenciones.

El patrimonio inmueble en Colombia se refiere a los bienes inmuebles que poseen un valor histórico, cultural, arquitectónico o artístico y que están protegidos por la legislación del país. Estos

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

bienes pueden incluir edificios, monumentos, sitios arqueológicos y otras estructuras que reflejan la identidad y la historia cultural de Colombia. La protección de estos bienes está regulada principalmente por la Ley 397 de 1997 (Ley General de Cultura) y otros decretos que establecen procedimientos y criterios para su declaración y conservación (Ministerio de Cultura, 2023; ICANH, 2022).

En Colombia, las estructuras de **tapia** (tapia pisada) y **tierra** representan una manifestación del ingenio y adaptación a los recursos naturales locales, siendo una parte esencial del **patrimonio arquitectónico y cultural** del país. Estas técnicas constructivas, junto con las de **concreto** en edificaciones patrimoniales más modernas, reflejan la historia, los valores estéticos y los métodos constructivos que han caracterizado a las regiones durante siglos (Carvajalino & Gómez, 2012).

Las construcciones de tapia y tierra, comunes en regiones con abundantes suelos arcillosos, fueron ampliamente utilizadas en zonas rurales y urbanas, especialmente en departamentos como Boyacá, Cundinamarca, Nariño y el Eje Cafetero (Vargas & Restrepo, 2018). Estas técnicas, heredadas de saberes indígenas y coloniales, destacan por el uso de materiales accesibles y sostenibles, aprovechando las propiedades naturales de la tierra para erigir muros resistentes (Gutiérrez & Giraldo, 2015). Sin embargo, debido a la naturaleza de los materiales y a su exposición prolongada a los elementos, estas estructuras requieren conservación y mantenimiento específicos para protegerlas de la erosión, el deterioro y los eventos sísmicos (ICANH, 2020).

Por otro lado, las edificaciones de concreto, que comenzaron a popularizarse en el siglo XX, también han sido declaradas patrimonio en algunos casos por su valor histórico, arquitectónico o cultural (Comisión del Banco de la República, 2010). Estas estructuras representan el progreso industrial y los cambios arquitectónicos del país, siendo emblemas de una transición hacia la modernidad en la construcción colombiana. Tanto las construcciones en tierra como en concreto plantean desafíos

## MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

significativos para la preservación patrimonial, ya que su conservación exige técnicas especializadas que aseguren su estabilidad estructural sin comprometer su autenticidad (Rueda & Suárez, 2019).

### **AIS 610-EP-2017 EVALUACIÓN E INTERVENCIÓN DE EDIFICACIONES PATRIMONIALES DE UNO Y DOS PISOS DE ADOBE Y TAPIA PISADA**

La norma **AIS 610-EP-17**, emitida por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), establece criterios técnicos para la **evaluación e intervención de edificaciones patrimoniales de uno y dos pisos construidas en tapia y tierra**. Este tipo de construcciones, tradicionales en varias regiones de Colombia, requieren lineamientos específicos para asegurar su estabilidad y preservación frente a sismos, dada su vulnerabilidad estructural.

#### **1. Objetivo y Alcance**

- La norma busca guiar la evaluación de la seguridad estructural y definir procedimientos de intervención de edificaciones patrimoniales, particularmente aquellas construidas con materiales como tapia pisada y adobe.
- Su aplicación es específica para edificaciones patrimoniales de uno o dos pisos, ya que suelen presentar técnicas constructivas tradicionales y materiales que requieren un tratamiento especial.

#### **2. Evaluación Estructural**

- **Inspección Preliminar:** Se describe un proceso detallado de inspección visual para identificar los posibles deterioros o daños estructurales, como fisuras, humedad, erosión, y deformaciones.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Diagnóstico Estructural:** Se realiza un análisis para evaluar la capacidad sísmica de la edificación. Este análisis incluye el uso de modelos estructurales simplificados para estimar cómo la estructura respondería ante eventos sísmicos.
- **Pruebas de Materiales:** Para comprender el comportamiento de los materiales, la norma indica métodos de prueba para medir la resistencia de la tierra compactada y otros materiales utilizados.

### 3. Niveles de Intervención

- La norma clasifica las intervenciones en varios niveles según la severidad del daño y el riesgo sísmico. Estos niveles de intervención van desde **mantenimiento preventivo** hasta **refuerzos estructurales** importantes.
- **Conservación y Restauración:** En casos donde la estructura no presenta daños significativos, se sugieren prácticas de conservación que respeten los elementos históricos y originales.
- **Refuerzos Estructurales:** En edificaciones con mayor riesgo sísmico, se proponen métodos de refuerzo, como el uso de marcos de madera o inyecciones de mortero para estabilizar muros de tapia.

### 4. Técnicas de Intervención

- **Reparación de Fisuras y Grietas:** Se especifican técnicas para el relleno de fisuras con materiales compatibles, buscando restaurar la integridad del muro sin alterar su composición original.
- **Refuerzo de Muros y Esquinas:** Para mejorar la capacidad sísmica de los muros, la norma recomienda refuerzos en las esquinas y uniones de muros, que son áreas vulnerables ante cargas sísmicas.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Anillos de Amarre:** En las edificaciones de dos pisos, la norma sugiere la colocación de anillos de amarre en las paredes superiores para mejorar la cohesión de la estructura y distribuir mejor las fuerzas sísmicas.

### 5. Consideraciones Patrimoniales

- La norma enfatiza el respeto por la arquitectura y elementos históricos de la edificación. Las intervenciones deben ser mínimas y reversibles, permitiendo que el edificio conserve su valor patrimonial y cultural.
- Recomienda utilizar técnicas y materiales tradicionales o que armonicen con los originales, garantizando la autenticidad del patrimonio.

### 6. Documentación y Registro

- Se especifica la necesidad de documentar cada etapa de la evaluación e intervención, registrando tanto el estado de la estructura antes de la intervención como cada acción correctiva realizada.
- Este registro es crucial para futuras intervenciones y para la preservación del patrimonio histórico.

### 7. Mantenimiento Posterior

- La norma incluye recomendaciones para el mantenimiento periódico de las edificaciones una vez intervenidas, buscando prevenir el deterioro y asegurar su estabilidad estructural a largo plazo.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10.**

Los criterios establecidos en la NSR-10 para la conservación de elementos patrimoniales se centran en la identificación y evaluación de los riesgos sísmicos a los que están expuestos estos elementos, así como en la implementación de estrategias de intervención que minimicen dichos riesgos.

La norma establece directrices para el diagnóstico de estructuras, considerando factores como la tipología constructiva, los materiales utilizados y el estado de conservación de los elementos patrimoniales.

El título A de la norma en mención titulado “Requisitos Generales”, define los principios fundamentales y los criterios de diseño tanto para estructuras nuevas como para edificaciones existentes.

En el Capítulo A.10 (Evaluación e intervención de edificaciones construidas antes de la vigencia de la presente versión del reglamento) proporciona directrices detalladas para la evaluación estructural y el reforzamiento de edificaciones existentes. Este capítulo es esencial para asegurar que las estructuras puedan resistir los efectos de eventos sísmicos y se mantengan seguras para su ocupación. (NSR-10, 2010, p. A-97).

Dentro del desarrollo del capítulo mencionado, la norma establece un procedimiento para la correcta evaluación de las estructuras existentes que fueron construidas previo a la publicación de la misma. Estos procesos son:

1. ***Información preliminar.***

**Etapa 1.** Se debe verificar que la intervención esté cubierta por el alcance establecido en A.10.1.3.(alcance).

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Etapa 2.** Es necesario recopilar y estudiar la información existente sobre el diseño geotécnico y estructural, así como el proceso de construcción de la edificación original y sus modificaciones posteriores. Además, se deben realizar exploraciones en la edificación, todo esto conforme a lo indicado en A.10.2.(Estudios e investigaciones requeridas).

**Etapa 3.** Se debe calificar el estado del sistema estructural con respecto a:

La calidad del diseño de la estructura original, su sistema de cimentación y la construcción en sí.

El estado de mantenimiento y conservación. Esta calificación debe hacerse de acuerdo con los requisitos de A.10.2. (NSR-10, 2010, p. A-98).

### 2. *Evaluación de la estructura existente.*

- **Etapa 4.** Determinar las cargas equivalentes de acuerdo con los criterios establecidos en A.10.4.2.
- **Etapa 5.** Se realiza un análisis elástico de la estructura y su sistema de cimentación con las cargas equivalentes definidas en la Etapa 4.
- **Etapa 6.** Implica determinar la resistencia actual de la estructura utilizando los criterios especificados en A.10.4.3.3.
- **Etapa 7.** Se obtiene una resistencia efectiva de la estructura ajustando la resistencia actual con dos coeficientes de reducción basados en los resultados de la evaluación realizada en la Etapa 3.
- **Etapa 8.** Se calcula un índice de sobreesfuerzo como el máximo cociente entre las fuerzas internas solicitadas obtenidas del análisis estructural de la Etapa 5 y la resistencia efectiva obtenida en la Etapa 7.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

- **Etapa 9.** Se determinan las derivas de la estructura utilizando los desplazamientos horizontales obtenidos en el análisis de la Etapa 5.
- **Etapa 10.** Implica calcular un índice de flexibilidad por efectos horizontales, siendo el máximo cociente entre las derivas obtenidas en la Etapa 9 y las derivas permitidas según el Reglamento en el Capítulo A.6. Además, se determina un índice de flexibilidad por efectos verticales como el máximo cociente entre las deflexiones verticales medidas en la edificación y las deflexiones permitidas por el presente Reglamento. (NSR-10, 2010, p. A-98; A-99).

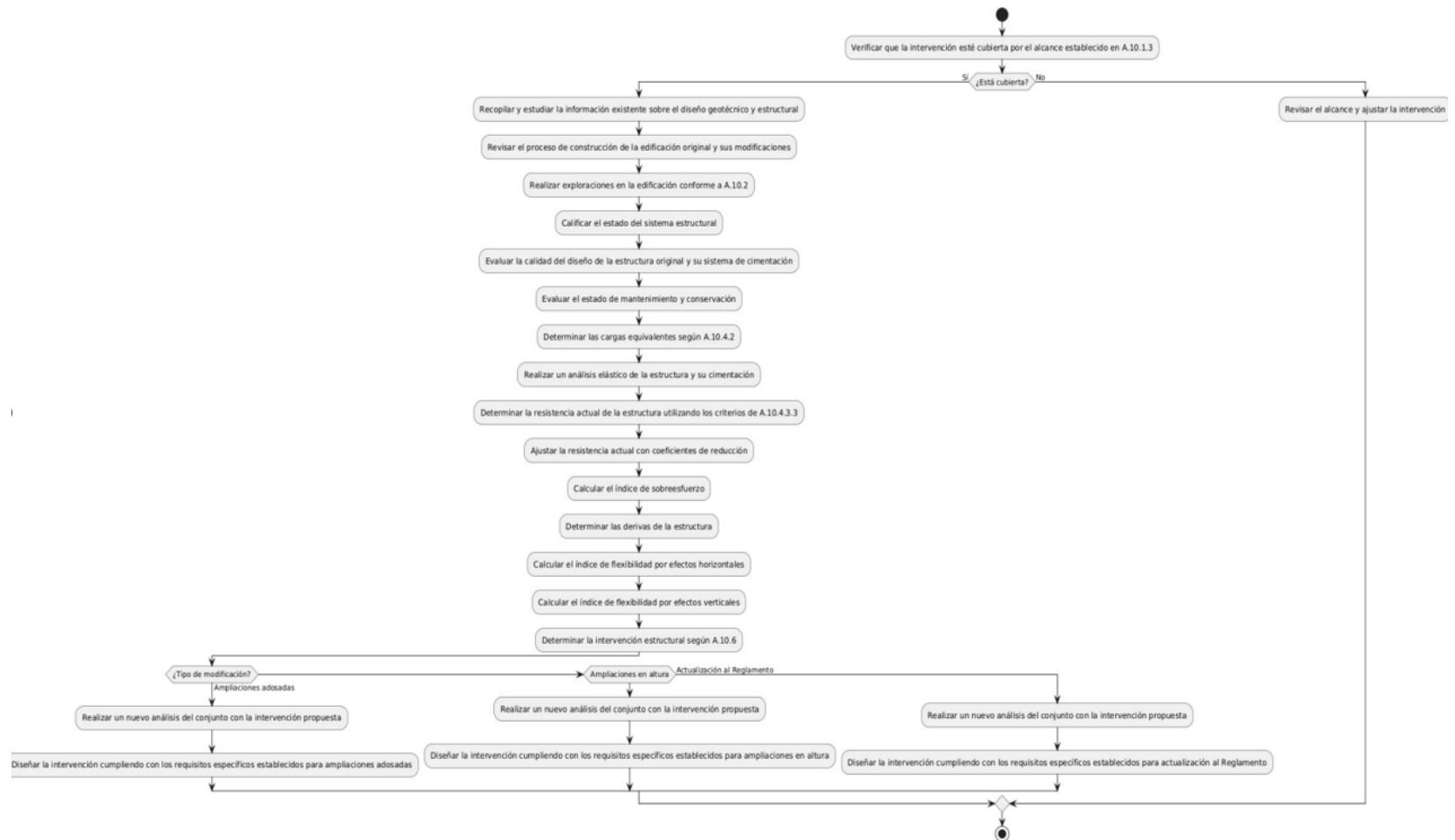
### 3. *Intervención del sistema estructural.*

- **Etapa 11.** Se determina la intervención estructural según el tipo de modificación establecido en A.10.6, que se clasifica en una de tres categorías:
  - a. Ampliaciones adosadas.
  - b. Ampliaciones en altura
  - c. Actualización al Reglamento.
- **Etapa 12.** Se realiza un nuevo análisis del conjunto, teniendo en cuenta la intervención propuesta. Esta intervención debe diseñarse considerando las fuerzas y esfuerzos obtenidos de este nuevo análisis. El diseño geotécnico y estructural, así como la construcción, deben realizarse de acuerdo con los requisitos específicos establecidos en este Capítulo para cada tipo de modificación. (NSR-10, 2010, p. A-99).

Dando alcance a las etapas mencionadas anteriormente, se relaciona un flujo grama como herramienta para identificar y mejorar la comprensión del proceso.

MÉTODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 21** FLUJO GRAMA – procedimiento para la correcta evaluación de las estructuras existentes de acuerdo a la Norma Sismorresistente NSR-10.



### **ESTUDIO DE CASO**

La Catedral de Manizales, un destacado ejemplo de “Arquitectura Republicana”, fue diseñada por el arquitecto francés Julien Polty entre 1927 y 1928 tras los incendios de la década de 1920. Su construcción, realizada por la firma Papio, Bonarda & Co. entre 1929 y 1939, utilizó “cemento armado” y es considerada una obra maestra de la arquitectura colombiana. Sin embargo, ha sufrido varios daños significativos debido a terremotos, incluyendo el colapso de una torre en 1962 y agrietamientos en sus muros en 1979.

Aunque se han realizado trabajos de mejora, como sellado de grietas y ajustes en el drenaje, persiste la preocupación sobre la vulnerabilidad estructural de la catedral ante sismos severos. Recientemente, se han iniciado esfuerzos para restaurar el templo mediante un diagnóstico detallado de su vulnerabilidad sísmica y el uso de técnicas modernas de diseño virtual y análisis por elementos finitos. Las intervenciones propuestas incluyen reforzar la base de la aguja central, estabilizar las cuatro agujas esquineras y añadir muros estructurales en puntos estratégicos, con el objetivo de proteger este importante patrimonio arquitectónico frente a futuros sismos en la región.

El análisis llevado a cabo en la catedral de Manizales se realizó siguiendo los parámetros establecidos por la norma NSR-98 (Reglamento de construcciones sismo resistentes) la cual se encontraba en vigencia. En cuanto a lo que se refiere a las edificaciones declaradas como patrimonio, este reglamento en comparación con la norma actual (NSR-10), contempla las mismas etapas considerando los mismos ítems que se deben tener en cuenta para determinar de acuerdo a los resultados, al criterio y experticia del profesional cual es el método de refuerzo más adecuado según las condiciones de la estructura.

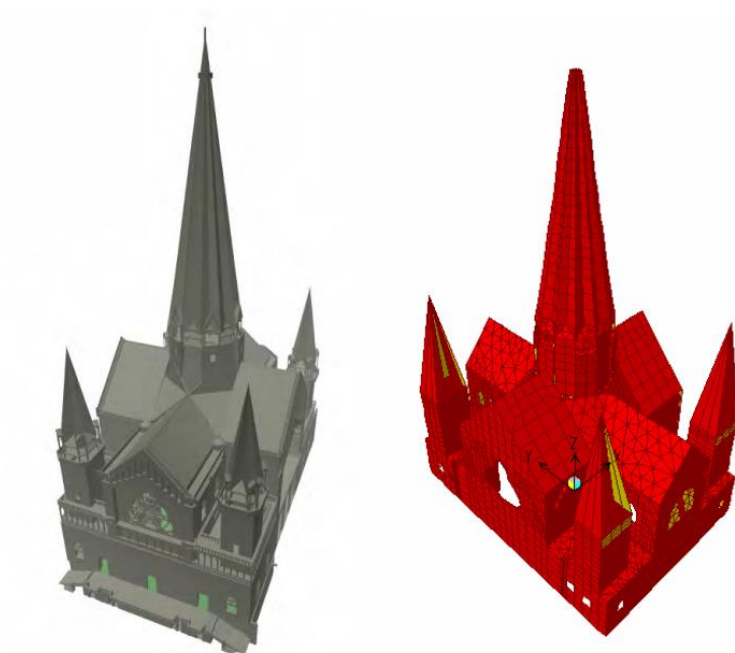
De acuerdo a esto el proceso realizado para el análisis de la estructura fue el siguiente:

**LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO**

Se localizaron y digitalizaron los planos originales del templo, elaborados por Julian Polty y encontrados en el Fondo Cultural Cafetero. Esta digitalización, realizada con equipos de alta resolución, permitió iniciar el levantamiento geométrico del templo sin dañar los planos. Aunque los planos proporcionaron información valiosa, no coincidieron exactamente con las dimensiones reales del edificio.

**Figura 22**

*Modelo Estructural*



*Nota.* Vista isométrica levantamiento estructural y del modelo en elementos finitos, tomado de Revista

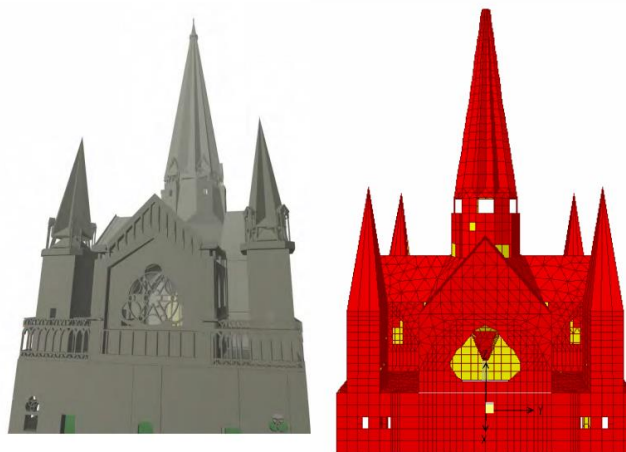
*Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

Con la información del levantamiento arquitectónico, se creó un modelo virtual del edificio usando ARCHICAD. Este modelado se ajustó continuamente mediante verificación con las medidas reales del templo y se mejoró con navegación y realidad virtual. El modelo computarizado permitió generar planos detallados y mallas tridimensionales para el análisis estructural y estudio de vulnerabilidad sísmica.

**Figura 23**

*Vista Longitudinal del Modelo Estructural*



*Nota.* Vista longitudinal levantamiento virtual y modelo en elementos finitos, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**ESTADO DE LOS MATERIALES.**

Para valorar el estado de los materiales de la estructura, se realizaron ensayos semidestructivos y no destructivos, así como análisis fisicoquímicos sobre la estructura y muestras de concreto en laboratorio. Se modeló la durabilidad residual de elementos estructurales usando un programa especializado, basándose en mediciones de profundidad de carbonatación y recubrimientos del acero de refuerzo. Se analizaron contenidos de materia orgánica y cantidad de cemento en muestras secas, y se evaluó la resistencia a tensión directa del hormigón con un aparato de Sattec. También se midieron el potencial de corrosión y se tomaron núcleos de hormigón para verificar su resistencia a la compresión.

La resistencia a compresión de los núcleos extraídos varía considerablemente, con algunos mostrando más de  $300 \text{ kg/cm}^2$  y otros cerca de  $100 \text{ kg/cm}^2$ . La carbonatación profunda del hormigón, que ha progresado debido a la falta de protección anticarbonatación en la Catedral y a las condiciones ambientales urbanas, ha reducido el pH y alcanzado o se ha acercado al refuerzo de acero, aumentando el riesgo de corrosión futura. En elementos con recubrimiento insuficiente, la corrosión ya ha progresado significativamente. Aunque la mayoría de los elementos han protegido adecuadamente el acero durante 60 años existe un riesgo elevado de corrosión intensa en el futuro cercano, que podría requerir reparaciones extensas. Además, el contenido de materia orgánica en el hormigón excede el límite aceptado, y el contenido de cemento promedio es de  $408 \text{ kg/m}^3$ . Las pruebas de adherencia muestran una falta de cohesión superficial en la mayoría de los elementos, con resistencia a tensión inferior a  $20 \text{ kg/cm}^2$ .

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Figura 24** Vigas de acero.

Nota: Vigas de acero(izquierda) conformando un diafragma que conecta las cabezas de los nuevos muros estructurales(derecha).

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-militar-nueva-granada/materiales/010-015-154-historia/9989150>

**Figura 25** Pantallas de refuerzo adosadas.

Nota: Se construyeron pantallas de refuerzo adosadas internamente en la base de la torre central

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-militar-nueva-granada/materiales/010-015-154-historia/9989150>

**Figura 26** Estabilidad a las torres esquineras en caso de sismo.



Nota: Ocho varillas o tensores proveen estabilidad a las torres esquineras en caso de sismo. Cortesía:

Omar Darío Cardona Arboleda, Samuel Darío Prieto Ramírez

<https://www.studocu.com/co/document/universidad-militar-nueva-granada/materiales/010-015-154-historia/9989150>

La Catedral de Manizales enfrenta un proceso crítico en la patología de sus materiales, debido a la carbonatación del hormigón, que ha avanzado hasta alcanzar e incluso sobrepasar el acero de refuerzo. Aunque actualmente no hay una gran actividad corrosiva, las condiciones están presentes para que esto ocurra pronto, como la despasivación del acero, bajos espesores de recubrimiento en elementos clave y agrietamientos que permiten la entrada de humedad y oxígeno, factores que inician la corrosión.

**MODELACION DE LA ESTRUCTURA**

El modelo geométrico fue desarrollado utilizando el programa ANSYS versión 5.0, instalado en un sistema UNIX en el Centro de Computación Avanzada para Ingeniería MOX de la Universidad de los Andes. El modelo incluye dos tipos principales de elementos:

1. **Tipo Beam 4 (elastic beam):** Elemento uniaxial con capacidad de tensión, compresión y torsión, con dos nodos y seis grados de libertad por nodo.
2. **Tipo Shell 63 (elastic Shell):** Elemento con comportamiento de membrana y flexión en el plano, con cuatro nodos y seis grados de libertad por nodo.

Cada tipo de elemento tiene asignado un material y una sección específica. En este caso, el material utilizado es hormigón con una resistencia de 20 MPa. El modelo incluye 6437 nodos, 8738 elementos tipo Shell y 108 elementos tipo beam, con el uso de herramientas gráficas de ANSYS para la inserción y mallado de elementos, mejorando la densificación de la red.

**Tabla 1***Características Tipo Shell*

<b>Elemento Shell</b>	<b>Espesor de pared[m]</b>	<b>Observación Ubicación</b>
Shell 1	0.15	Aguja central (desde cota50m-cota91m)
Shell 2	0.30	Cuerpo del modelo*

\*Nota: Cuerpo del modelo se refiere a la totalidad de la estructura exceptuando la aguja desde la cota 50m hasta 91m.

*Nota.* Características de las secciones de los elementos tipo Shell, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Tabla 2***Características Tipo Beam*

Propiedades	Elemento Tipo Beam			
	Colum-central (cajón)			Colum-inter
Dimensiones	Ancho (m)	Fondo (m)	Espesor (m)	Diámetro(m)
		2.5	2.5	0.3
Area (m <sup>2</sup> )	2.64			0.50
Ixx (m <sup>4</sup> )	2.16			0.02
Iyy (m <sup>4</sup> )	2.16			0.02

*Nota.* Características de las secciones de los elementos tipo Beam, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**Tabla 3***Propiedades del Concreto*

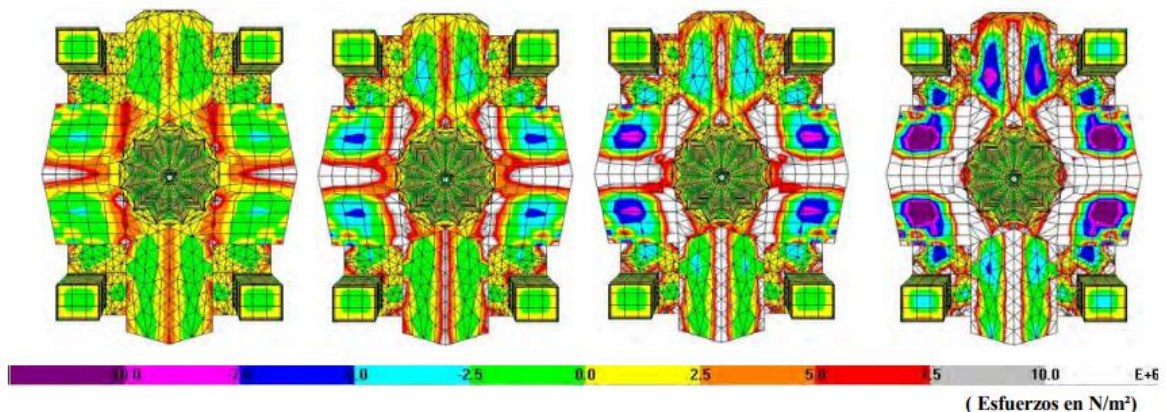
Propiedad	Valor
Masa por Unidad Volumen (Kg/m <sup>3</sup> )	2500
Peso por Unidad Volumen (N/m <sup>3</sup> )	24525
Relación de Poisson	0.20

*Nota.* Propiedades del concreto, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**DEFINICIÓN DE CARGAS Y TIPO DE ANÁLISIS**

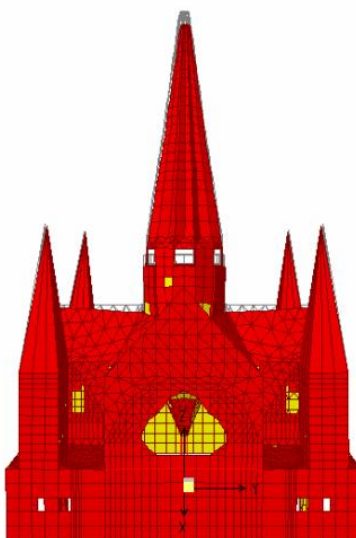
Para definir las cargas, el modelo fue trasladado a Sap2000 Non-Linear versión 6.11, donde se definió exclusivamente la carga gravitacional, que corresponde al peso propio de cada elemento. Se utilizó un multiplicador del peso propio para realizar análisis con incrementos en el peso. El análisis del modelo se llevó a cabo en tres circunstancias:

1. **Análisis estático:** Se observó el comportamiento de la estructura bajo su propio peso y se determinaron las reacciones en la base debido a las cargas gravitacionales, estimadas en un total de 13,000 toneladas. Además del análisis convencional, se realizó un incremento del peso propio hasta un 400%, como se muestra en las Figuras 23 y 24.

**Figura 27***Análisis Estático*

*Nota.* Análisis de incremento de peso propio visto en planta, tomado de Revista *Internacional de*

*Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**Figura 28***Modelo Unidimensional*

*Nota.* Deformada por peso propio, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Análisis espectral: En el análisis se utilizó el espectro de respuesta obtenido de un modelo unidimensional de una columna de suelo, cuyas propiedades estáticas y dinámicas fueron obtenidas en laboratorio. Este análisis simuló la degradación de rigidez actual de la Catedral. Para ello, se introdujo en el modelo tridimensional un espectro de respuesta equivalente al de un sismo similar al ocurrido en noviembre de 1979, con una magnitud de 6.7 y una distancia a la falla de 100 kilómetros. De este modo, se simuló la acción del último sismo que afectó significativamente el edificio. Al conocer los esfuerzos causados, se representaron las partes más afectadas por agrietamiento o ablandamiento, reflejando así las condiciones actuales de resistencia y rigidez, así como el comportamiento no lineal del edificio. Posteriormente, se introdujo un espectro de respuesta acorde con las características de los sismos de

METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

diseño esperados para la zona, con el fin de determinar el grado de vulnerabilidad del edificio en su estado actual.

**Análisis dinámico:** Se realizó un análisis utilizando el método de Eigenvectors para los primeros 10 modos de vibración de la estructura. La Tabla 4 muestra las características principales del análisis dinámico, incluyendo los valores de los esfuerzos en  $N/m^2$  para cada modo de vibración y la dirección del movimiento, los cuales se ilustran en la Figura 25.

**Tabla 4**

*Análisis Dinámicos*

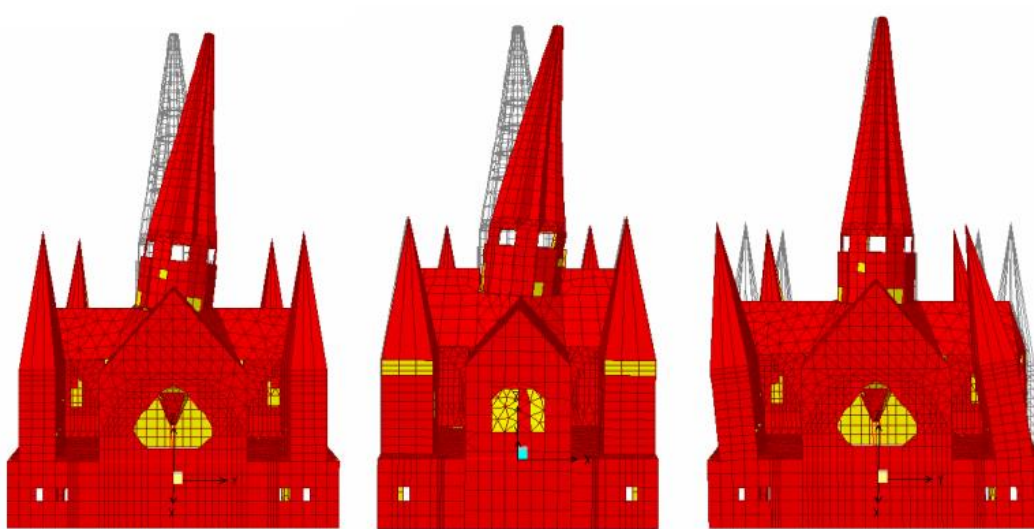
<b>MODO</b>	<b>PERIODO (s)</b>	<b>MOVIMIENTO</b>
1	0.897	Longitudinal
2	0.540	Transversal
3	0.355	Longitudinal
4	0.349	Rotacional
5	0.348	Longitudinal
6	0.347	Parcial-cubierta
7	0.329	Parcial-cubierta
8	0.309	Rotacional
9	0.306	Transversal
10	0.291	Rotacional

*Nota.* Características de los modos de vibración tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Se realizó un análisis del comportamiento dinámico de la aguja central para verificar los resultados obtenidos con este procedimiento. Al comparar los valores de los períodos de vibración del modelo con los medidos mediante instrumentación y registro de vibraciones, se encontraron coincidencias. Esto indica que, utilizando un modelo elástico y definiendo un patrón de agrietamiento simulado por sismos previos, es posible evaluar de manera simplificada el comportamiento inelástico de

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

la estructura. Finalmente, se realizó un análisis de incremento de carga lateral paso a paso o "pushover" utilizando el SAP2000 NL Push, lo que permitió verificar la capacidad de la estructura y definir el tipo de intervenciones necesarias para ofrecer un nivel de seguridad sísmica aceptable.

**Figura 29***Análisis Dinámico*

Nota, modo de vibración a 0.90 seg, 0.50 seg y 0.35 seg, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Para obtener un perfil geotécnico detallado del sitio, fundamental para estimar la respuesta sísmica local y la posibilidad de resonancia entre el depósito de suelo y el edificio, se realizaron perforaciones profundas. Se tomaron muestras de suelo para ensayos en laboratorio, incluyendo ensayos tradicionales de caracterización física y mecánica, así como ensayos especiales como triaxiales cíclicos. La estratigrafía del sitio se caracteriza por una intercalación constante de depósitos de limos de alta plasticidad con diferentes consistencias, con profundidades entre 27 y 36 metros. En general, el

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

material de cimentación superficial es relativamente blando, con estratos de limos y arcillas competentes a profundidades intermedias. Se realizaron ensayos básicos de clasificación y compresiones inconfiadas en las muestras suministradas, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5***Ensayos de Muestras*

<b>Muestra No.</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Tipo de Ensayo</b>	<b>Resultado</b>
2	3.5m	Clasificación Compresión Inconfiada	LL=75.3 LP=34.4 IP=40.9 qu= 1.65 kg/cm <sup>2</sup>
4	8.0m	Clasificación Compresión Inconfiada	LL=119.7 LP=33.1 IP=86.6 qu= 0.85 kg/cm <sup>2</sup>
5	11.0m	Clasificación Compresión Inconfiada	LL=72.7 LP=39.3 IP=33.4 qu= 2.55 kg/cm <sup>2</sup>

*Nota.* Resumen de resultados de ensayos sobre muestras de suelo inalteradas, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS**

Se determinó que el suelo que influye en la respuesta sísmica local es limo de alta plasticidad, tras un análisis del perfil estratigráfico. Se realizaron ensayos triaxiales cíclicos en muestras de diferentes profundidades para evaluar sus propiedades cíclicas, con presiones de confinamiento de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm<sup>2</sup>. Los resultados mostraron un comportamiento típico de arcillas, con una pérdida de rigidez notable a partir de deformaciones del 0.1% y una reducción del 50% de rigidez a deformaciones del 0.5%. Los valores de módulo de corte lo variaron entre 60 y 130 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo de la presión de confinamiento. Además, se ajustaron estos valores considerando la velocidad de aplicación de las cargas y la presión de confinamiento real en el terreno. El coeficiente de amortiguamiento se mantuvo bajo

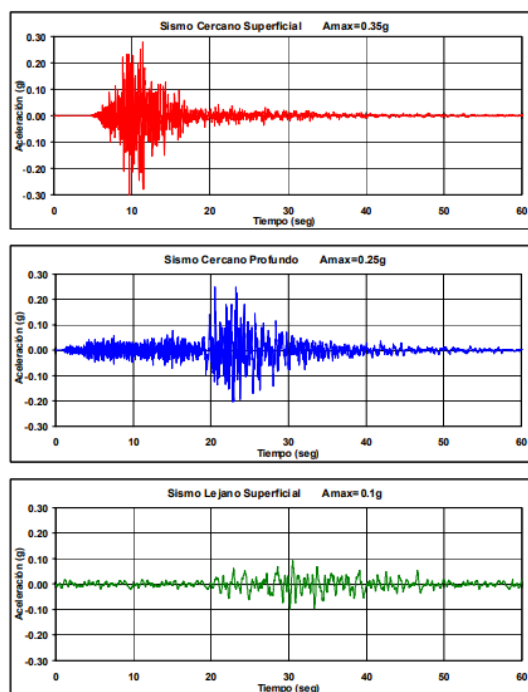
## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

hasta deformaciones del 0.1%, incrementando significativamente hasta un rango del 12 al 23% para deformaciones cercanas al 1%.

### ***ACELEROGRAMAS PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO***

Según la NSR-98, la aceleración máxima probable en roca para el diseño de edificaciones en Manizales es de 0.25 g, con un período de exposición de 50 años y una probabilidad de excedencia del 10%. Esto implica un sismo con un período de retorno de aproximadamente 475 años. Basándose en esta aceleración máxima probable, se estimó el tipo de sismo esperado en la ubicación de la Catedral de Manizales, considerando la estratigrafía de la zona y las propiedades geotécnicas y dinámicas del suelo. Para determinar los acelerogramas necesarios para el análisis de la respuesta dinámica del subsuelo, se utilizaron estudios previos como los realizados por la Alcaldía de Manizales y la Universidad de los Andes en 1998 y 1999, respectivamente. Estos estudios permitieron establecer los acelerogramas de análisis para la evaluación sísmica del área.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Tabla 6***Acelerogramas*

*Nota.* Acelerogramas utilizados para el análisis de la respuesta sísmica, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Para considerar el impacto de las fuentes sísmicas locales cercanos a Manizales, como la falla de Romeral, se utilizó la señal del sismo de Armenia del 25 de enero de 1999. Esta señal, registrada en la estación de la Universidad del Quindío a unos 17 km del epicentro, fue procesada mediante de convolución y análisis de sensibilidad para obtener una señal en roca, escalada a una aceleración pico de 0.35 g y una duración total de aproximadamente 30 segundos en su fase intensa.

Una de las fuentes sismogénicas más peligrosas para la zona es la zona de Benioff, asociada con la subducción de la placa Nazca bajo la placa suramericana. Para caracterizar el movimiento sísmico de esta fuente, con profundidades entre 80 y 150 km, se seleccionó el registro del sismo de Calima (Valle)

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

del 8 de febrero de 1995, registrado en la estación Anserma en dirección EW. Esta señal fue escalada a una aceleración máxima de 0.25 g, manteniendo su contenido frecuencial y duración originales de aproximadamente 50 segundos.

Para simular el efecto de un sismo severo y distante, que podría llegar a la ciudad con una baja amplitud y un contenido frecuencial bajo, se consideró el acelerograma del sismo registrado en la UNAM, México, el 19 de septiembre de 1985, escalado a una aceleración máxima de 0.10 g y con una fase intensa de aproximadamente 60 segundos.

Estos acelerogramas fueron utilizados como señales de entrada para el análisis de respuesta dinámica del subsuelo en la Catedral de Manizales.

### ***RESPUESTA DINÁMICA Y ESPECTRO DE ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA***

Para evaluar la amenaza sísmica local en el sitio de interés, se modeló el depósito de suelo usando dos columnas estratigráficas unidimensionales, basadas en dos perforaciones que proporcionaron datos sobre densidad, degradación de la rigidez y amortiguamiento, según información de laboratorio disponible. La Tabla 6 resume las características estratigráficas del subsuelo, sirviendo como base para un modelo unidimensional de 36 metros de espesor. Este modelo se utilizó para determinar la respuesta dinámica del sitio, procesando las señales sísmicas seleccionadas a través del perfil del suelo.

El análisis reveló que el período fundamental del depósito de suelo se encuentra entre 1.0 y 1.3 segundos. La Figura 7 presenta espectros hipotéticos del sismo de noviembre de 1979, basados en un acelerograma sintético escalado. La Figura 8 muestra los espectros de respuesta en superficie calculados para diferentes escenarios de eventos, comparándolos con los espectros de diseño de la NSR-98. Al ser

METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

el edificio considerado como indispensable tras un sismo, se aplicó un coeficiente de importancia de 1.3 al espectro de diseño de la NSR-98, conforme al capítulo A.2.5.2 de dicha norma. Sin embargo, este factor no se aplicó al espectro resultante de la amplificación local del subsuelo, debido a la menor incertidumbre asociada con este último.

**Tabla 7**

*Espectro de Respuesta*

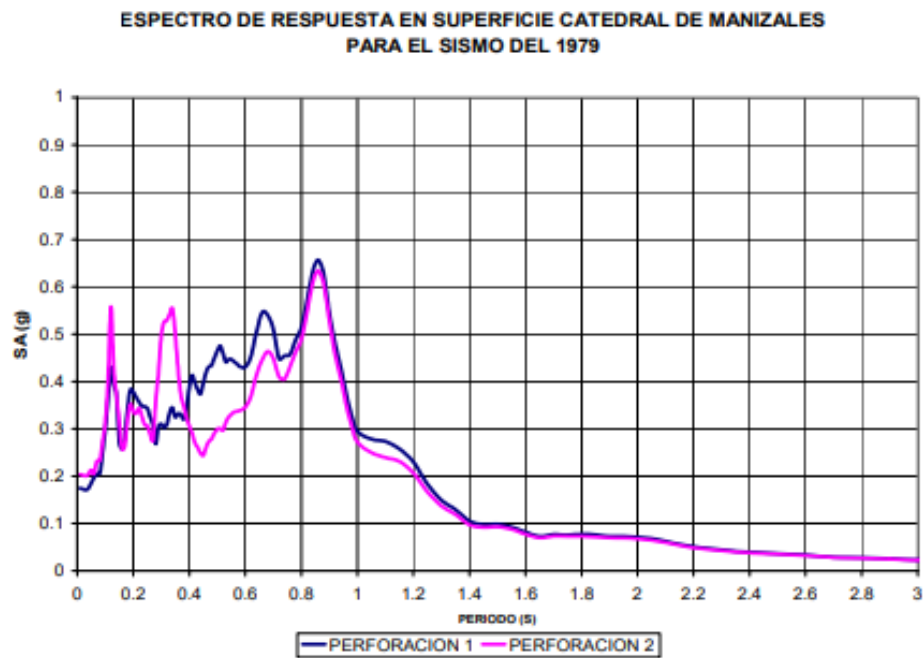


Figura 7. Espectros de respuesta del sismo de 1979, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

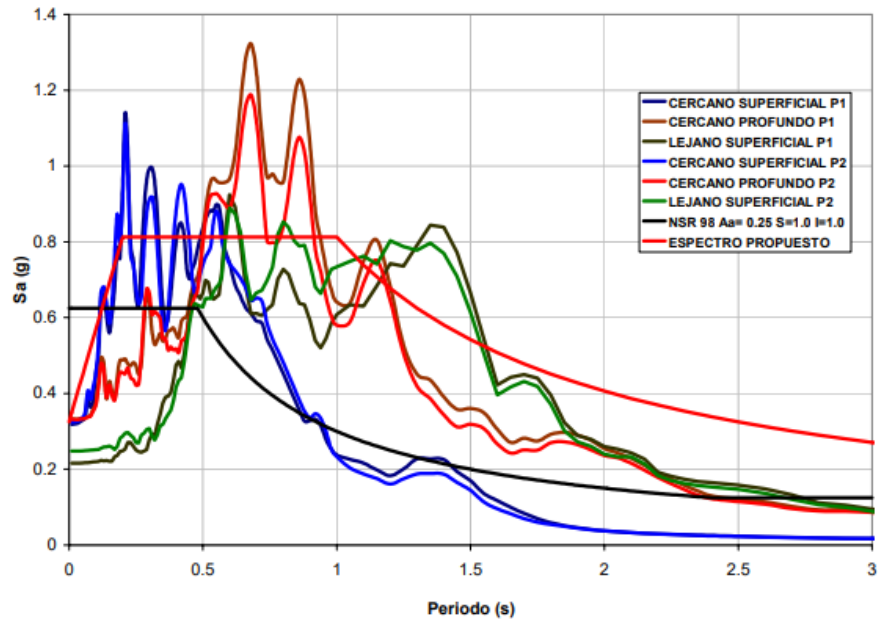
**Tabla 8***Características Estratigráficas*

Descripcion	$\omega$	$\sigma_o'$ T/m <sup>2</sup>	IL	Profundidad m	Gmax Kg/cm <sup>2</sup>	Peso Unitario T/m <sup>3</sup>	Vs m/s
LIMO	0.60	1.9	0.00	2.0	53	1.50	
LIMO	0.60	3.8	0.00	4.0	99	1.50	
LIMO	0.80	5.7	0.25	6.0	144	1.50	
LIMO	0.80	6.3	0.25	8.0	190	1.50	
LIMO	1.00	7.0	0.40	10.0	236	1.50	
LIMO	0.90	7.6	0.50	12.0	282	1.50	
LIMO	0.80	8.2	0.60	14.0	327	1.50	
LIMO	0.70	8.9	0.40	16.0	373	1.50	
LIMO	0.70	9.5	0.75	18.0	419	1.50	
LIMO	0.60	10.1	0.67	20.0	464	1.50	
LIMO	0.60	10.8	0.67	22.0	510	1.50	
LIMO	0.70	11.4	2.00	24.0	556	1.50	
LIMO	0.70	12.0	2.00	26.0	602	1.50	
LIMO	0.60	12.7	0.50	28.0	647	1.50	
LIMO	0.60	13.3	1.00	30.0	693	1.50	
LIMO	0.80	13.9	0.00	32.0	739	1.50	
LIMO	0.80	14.6	0.00	34.0	784	1.50	
LIMO	1.00	15.2	0.00	36.0	830	1.50	
LIMO	1.00	15.8	0.00	38.0	876	1.50	
<b>Conglomerado</b>						<b>1.80</b>	<b>700</b>

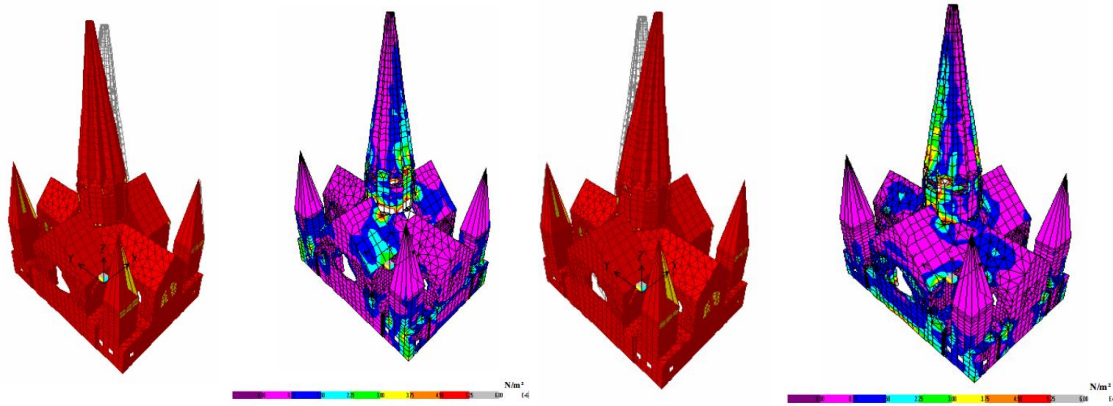
*Nota.* Características estratigráficas del subsuelo para modelo de respuesta dinámico, tomado de

*Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

## METODOS DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA LA CONSERVACIÓN EN EDIFICACIONES PATRIMONIALES

**Tabla 9***Espectro de Respuesta*

*Nota.* Espectros de respuesta obtenidos para el sitio, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**Figura 30***Deformación y Esfuerzos*

Nota, deformación y esfuerzos, ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) debido al espectro hipotético de 1979 en dirección longitudinal y espectro de diseño en dirección longitudinal, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Para el análisis de vulnerabilidad de la Catedral de Manizales, se desarrolló un espectro específico para el análisis, basado en la envolvente propuesta en la Figura 8. Este espectro cuantifica la amenaza sísmica local y teniendo en cuenta los mapas de zonificación establecidos por la NSR-98, Manizales se encuentra en una zona de alta sismicidad. Las Figuras 9 y 10 presentan los resultados gráficos de los esfuerzos generados tanto por el sismo de 1979 como por el espectro de diseño, considerando el edificio en su estado agrietado. Estos resultados permiten evaluar la capacidad de la estructura para resistir futuros eventos sísmicos y entender mejor su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga.

***REFUERZO SISMORRESISTENTE***

Tras evaluar la vulnerabilidad sísmica de la Catedral de Manizales y determinar los esfuerzos en toda la estructura, se identificaron los puntos críticos que podrían ser insuficientes ante eventos sísmicos más severos. Se llevó a cabo un análisis de interacción suelo-estructura para estimar cómo se amplía el período de vibración de la estructura y cómo se relaja su comportamiento. Los resultados de este estudio, verificados con un modelo simplificado utilizando el programa PDCOMB, revelaron que los muros de la Catedral se han fisurado o agrietado en sismos anteriores debido a que actúan de forma desacoplada. Los agrietamientos se deben a la incapacidad de los muros para moverse monólicamente y su insuficiencia para soportar fuerzas cortantes.

La cimentación, compuesta por un sistema de nervaduras, algunas de las cuales son poco rígidas, permite que los muros giren o roten durante un sismo, lo que favorece el desacople y el agrietamiento. Es importante reforzar la capacidad de los muros con elementos estructurales competentes para mejorar la resistencia y la capacidad de disipación de energía de la estructura.

Además, el movimiento de la aguja central, que pesa aproximadamente 3,500 toneladas, genera esfuerzos significativos en su base durante un sismo. Se identificó una zona crítica cerca de la base, donde la placa plegada se apoya en un grupo de pilares que podrían no estar suficientemente reforzados para absorber los esfuerzos de tracción, lo que requiere reforzamiento.

Finalmente, se confirmó que las torres o agujas esquineras, reforzadas con una estructura metálica interior, no están adecuadamente ancladas, lo que podría causar inestabilidad en un sismo severo. Por lo tanto, es necesario intervenir para garantizar una mayor estabilidad y anclaje de estas estructuras a la cimentación.

### ***INTERVENCIONES ESTRUCTURALES***

Como resultado del análisis de vulnerabilidad sísmica de la Catedral de Manizales, se diseñaron varias intervenciones para corregir las deficiencias identificadas y mejorar el comportamiento estructural del edificio en caso de sismo.

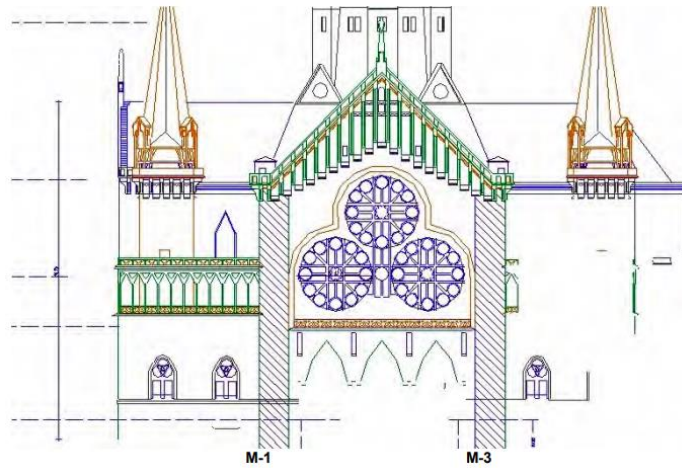
El estudio determinó que es necesario reforzar la estructura para mejorar su respuesta ante cargas laterales. Se propuso la construcción de ocho muros estructurales nuevos, ubicados ortogonalmente en la periferia de la Catedral, en los puntos más eficientes estructuralmente y donde no interfieran significativamente con la arquitectura original. Estos muros no reemplazarán los muros existentes, sino que se construirán adosados a ellos mediante anclajes, para minimizar las modificaciones en la fachada y permitir que las cargas verticales continúen siendo soportadas por los muros originales. Esta solución también reduce las complicaciones y riesgos constructivos, ya que de otro modo se necesitarían sistemas temporales para soportar grandes cargas y los empujes de los arcos.

Los nuevos muros estructurales deben incluir elementos de borde para resistir los momentos generados por los sismos. Deben llegar hasta una nueva viga de cimentación alta, colocada debajo de la cimentación existente, y apoyarse sobre caissons que aseguren la fijación y estabilidad de los muros. Además, se deben incorporar vigas en diferentes niveles y un entramado de vigas en la parte superior, formando un anillo a nivel del diafragma existente entre los niveles 24 y 27 m. Esto proporcionará un sistema adecuado para absorber esfuerzos de tracción durante un sismo.

La construcción de la nueva cimentación y las vigas de conexión deberá ser supervisada y aprobada por el equipo de diseño en el momento de su ejecución, debido a la complejidad del proyecto y la necesidad de ajustar detalles de diseño según las condiciones del refuerzo existente en los elementos estructurales implicados.

**Figura 31**

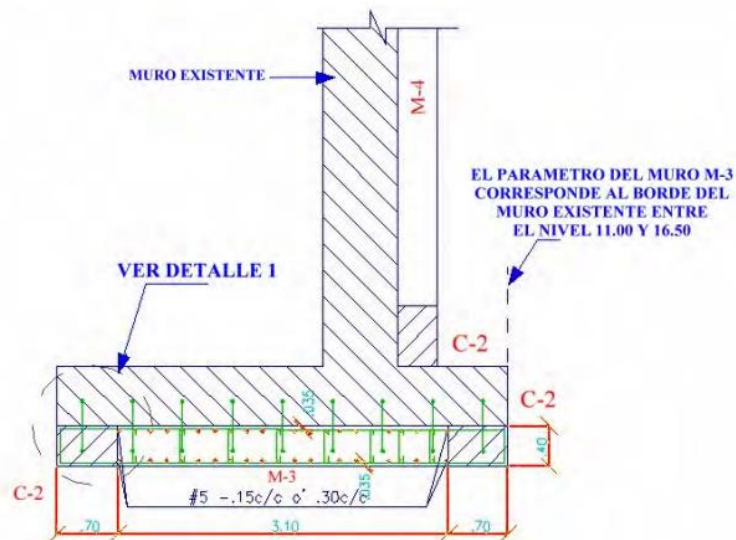
*Detalle Estructural*



*Nota.* Detalle de plano de intervención estructural de muros adosados, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

**Figura 32**

*Detalle de Anclajes*

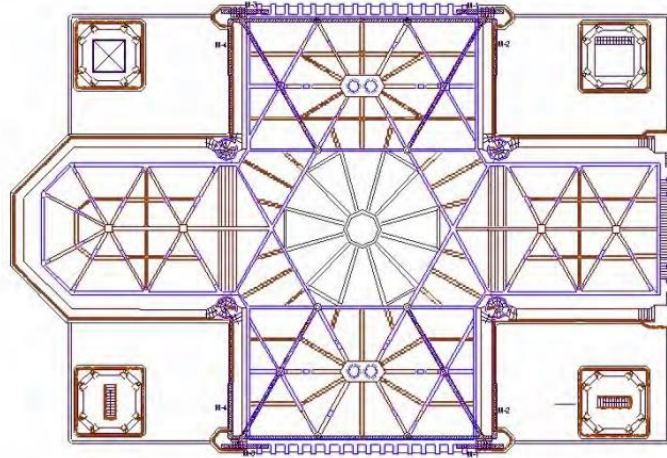


*Nota.* Detalle de plano de anclajes de uno de los muros adosados, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Para mejorar la capacidad de la torre central de la Catedral de Manizales en su base, se planificó la intervención con seis pantallas de refuerzo adosadas a la placa plegada que forma la aguja. Estas pantallas están diseñadas para incrementar la capacidad de la estructura en la base de la torre, permitiéndole soportar mejor los esfuerzos de tracción que se generan cuando la torre está sometida a fuerzas laterales durante un sismo. La implementación de estas pantallas de refuerzo es importante para garantizar la estabilidad y seguridad de la estructura ante eventos sísmicos.

### Figura 33

#### *Distribución de Refuerzo*



*Nota.* Planta de intervenciones de muros y vigas a nivel de cubierta, tomado de Revista *Internacional de Ingeniería de Estructuras*, por Cardona, O. D. 2002.

Para mejorar la estabilidad de las agujas o torres esquineras de la Catedral de Manizales, se ha planificado la instalación de varillas especiales de gran diámetro. Estas varillas conectarán la base de la estructura metálica interna de refuerzo de las torres con una nueva viga ubicada en la cimentación, actuando como tensores para prevenir el vuelco de las torres en caso de un sismo fuerte.

Luego de realizar todo el análisis sísmico y estructural para conocer y determinar el estado en el que se encontraba la estructura, se estimaron las cantidades de obra y los presupuestos para intervenir la misma. Por ende, el estudio de caso solamente contempla el análisis de vulnerabilidad que permitió identificar cual era la opción de refuerzo más eficaz, que permita garantizar tanto la durabilidad de la estructura en cuanto a su uso y a su vez su importancia como patrimonio inmueble.

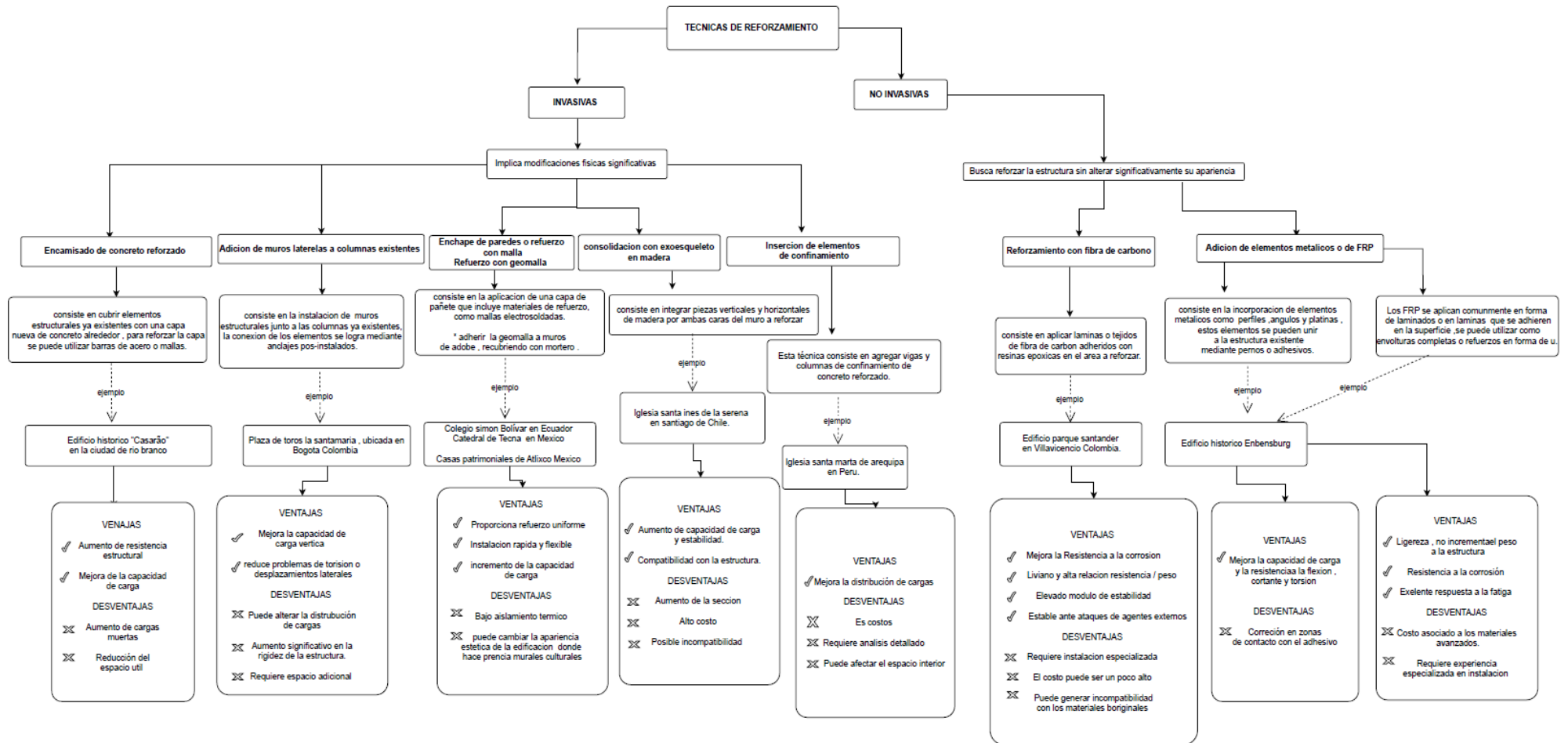
### **CAPÍTULO III: TÉCNICA(S) DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL MÁS APROPIADA PARA LA INTERVENCIÓN DE ELEMENTOS Y QUE PERMITA CONSERVAR SU ORIGINALIDAD.**

La restauración y refuerzo de estructuras existentes son elementos críticos en el ámbito de la ingeniería civil y la arquitectura, especialmente cuando se busca prolongar la vida útil de edificaciones afectadas por el tiempo, eventos sísmicos u otras condiciones adversas. La elección de la técnica de refuerzo adecuada no solo implica la mejora de la integridad estructural, sino también la consideración de factores estéticos y funcionales. En este contexto, se ha realizado un cuadro comparativo que analiza diversas técnicas de refuerzo anteriormente mencionadas, cada una con sus ventajas y desventajas.

El presente mapa conceptual se fundamenta como una herramienta de consulta para ingenieros, arquitectos y profesionales del sector, ofreciendo una visión detallada y comparativa de nueve técnicas específicas. Estas técnicas abarcan desde métodos tradicionales, como el encamisado con concreto reforzado, hasta enfoques más contemporáneos, como el uso de fibras de carbono.

Tabla 10

Mapa conceptual, Técnicas de Reforzamiento



Este mapa conceptual proporciona una visión general de las ventajas, desventajas y aplicaciones de cada técnica de refuerzo estructural. Es importante destacar que la elección de la técnica adecuada dependerá de la naturaleza específica de la estructura, los objetivos de refuerzo y las condiciones del entorno.

La elección de la técnica más viable para la restauración dependerá de varios factores específicos de la estructura a reparar, así como de las metas y restricciones del proyecto. Sin embargo, considerando la preocupación por minimizar el impacto en la estética y en la estructura, algunas técnicas podrían ser más adecuadas que otras. A continuación, se plantea como opción la técnica de reforzamiento con fibra de carbón método considerado adecuado para una restauración con un menor impacto aparente y menos invasiva.

Esta técnica Representa un enfoque vanguardista en la mejora de la resistencia y durabilidad de estructuras existentes. Designada como la "Técnica No. 8" en el capítulo II" este método implica la aplicación de láminas de fibras de carbono para fortalecer componentes estructurales. Este enfoque ha ganado popularidad debido a su naturaleza liviana, resistencia excepcional y capacidad para adaptarse a diversas formas y condiciones estructurales.

Según la investigación de Brown y White (2020), las fibras de carbono son conocidas por su alta resistencia específica, lo que significa que proporcionan una fuerza significativa con un peso mínimo. Esta característica es particularmente valiosa en proyectos de reforzamiento estructural, donde se busca mejorar la capacidad de carga sin añadir carga significativa a la estructura existente. Las fibras de carbono, al ser aplicadas en láminas, se adhieren a la superficie de los elementos estructurales, brindando un refuerzo adicional sin alterar la geometría original.

La ventaja distintiva de esta técnica radica en su capacidad para adaptarse a diversas condiciones y geometrías. La flexibilidad inherente de las láminas de fibras de carbono permite un refuerzo selectivo en áreas específicas que requieren atención sin afectar negativamente otras partes de la estructura (Smith et al., 2019). Esto es especialmente útil en proyectos donde la preservación de la estética y la funcionalidad originales es esencial.

La aplicación de fibras de carbono como método de reforzamiento ha sido ampliamente estudiada en diversas aplicaciones. Según los hallazgos de Johnson y colaboradores (2018), la resistencia de las fibras de carbono a la corrosión las hace ideales para entornos agresivos, como aquellos con alta humedad o exposición a productos químicos corrosivos. Además, estas láminas pueden ser aplicadas en superficies irregulares y curvas, proporcionando una solución versátil en comparación con algunas técnicas más tradicionales.

A pesar de sus numerosas ventajas, es fundamental destacar que la aplicación exitosa de esta técnica requiere un análisis estructural detallado y la experiencia de profesionales especializados. Un enfoque integral que considere las condiciones específicas de la estructura y las cargas a las que estará expuesta es esencial para garantizar resultados óptimos.

Es primordial previo a la intervención de un elemento, realizar un análisis detallado de la estructura, teniendo en cuenta la magnitud del daño, la ubicación, la función del edificio y otros factores específicos del proyecto. Además, consultar con ingenieros estructurales y expertos en restauración será de gran importancia para tomar la decisión más adecuada teniendo en cuenta manuales técnicos y normas que rigen este método de reforzamiento, por lo tanto;

La siguiente tabla 2 representa las principales normas que rigen el reforzamiento con fibra de carbono son las ASTM y europeas, que especifican los requisitos y métodos de ensayo para este tipo de

sistemas compuestos. La norma ACI también es relevante por sus requerimientos para evitar fallas prematuras.

**Tabla 11**

*Normatividad, Fibra de carbón*

Normatividad	Descripción
<b>NORMA ASTM</b>	
ASTM C1116	Establece definiciones generales y clases de reforzamiento con fibras, propiedades del concreto modificado por fibras, recomendaciones de mezclado y tolerancias (SIKA 2014) <b>(1)</b>
ASTM C1399	ASTM C1399 Método de ensayo para determinar el esfuerzo residual promedio del concreto reforzado con fibra. <b>(1)</b>
ASTM C1550	Método de ensayo para determinar la tenacidad a flexión del concreto reforzado con fibras" - Ensayo para medir la tenacidad de paneles circulares de concreto reforzado con fibras. <b>(1)</b>
<b>NORMAS INTERNACIONALES</b>	
EN 14889-1	Define grupos de fibras de acero y especifica propiedades y tolerancias. <b>(1)</b>

EN 14889-2	Fibras de polímeros o sintéticas" - Define cuatro tipos de fibras sintéticas según su función y especifica propiedades y tolerancias. <b>(1)</b>
<b>NORMA ACI</b>	
ACI 440-08	Nuevos Requerimientos para evitar la falla prematura en el reforzamiento con fibra de carbono (Escobar 2008) <b>(2)</b> .
<b>NORMA COLOMBIANA</b>	
NSR10- Titulo C	Incluye referencias a normas técnicas para fibras de acero (Ingenieros 2010) <b>(3)</b> .
NTC 5541	definiciones y clases generales de reforzamiento con fibras. Igualmente, lista las propiedades del concreto modificadas por la inclusión de las fibras. <b>(1)</b>

*Nota.* Descripción de diferentes normas que se aplican en la técnica de reforzamiento con fibra de carbón, fuente propia.

## Conclusiones

A través de la revisión documental de las técnicas de reforzamiento estructural presentadas en el cuadro comparativo, se destaca la importancia de seleccionar la técnica adecuada según las necesidades específicas de cada estructura. No existe un enfoque único que sea universalmente aplicable, y la elección debe considerar factores como la naturaleza del daño, la ubicación, la funcionalidad del edificio y las restricciones estéticas. La variedad de opciones proporciona a los profesionales la flexibilidad necesaria para adaptar las soluciones a las circunstancias particulares de cada proyecto.

La técnica que enfatiza la minimización del impacto visual y estructural surgen como aspectos notables en el proceso de toma de decisiones. Técnicas como la "fibra de carbón" ofrecen soluciones que mejoran la resistencia sin comprometer significativamente la estética original de las estructuras. Esta consideración es especialmente relevante en proyectos de restauración y en edificaciones históricas donde la preservación de la apariencia arquitectónica es esencial. La capacidad de adaptar las técnicas de refuerzo para minimizar el impacto visual es una consideración valiosa en el ámbito de la ingeniería y la arquitectura.

De acuerdo, con la investigación existen formas y métodos de intervención para una estructura con vulnerabilidad sísmica, la cual será determinada por el profesional especialista estructural a cargo según las condiciones y contexto particular de la edificación.

Si bien el profesional especialista en estructuras puede abordar el reforzamiento como su experticia y experiencia lo considere, este debe estar amparado bajo la normatividad vigente y legal que

aplique en la jurisdicción del bien cultural en el caso de Colombia, como el manual para viviendas en adobe y tapia, y el reglamento NSR-10 habla del proceso de intervención para estructuras de ocupación especial, grupo de uso III y IV, APENDICE A-1, capítulo A.10 Y A.12.

La inclusión de técnicas innovadoras y ligeras, como el "Reforzamiento con Fibras de Carbono," destaca la importancia de buscar soluciones que ofrezcan resistencia sin aumentar significativamente el peso de la estructura. Estas técnicas no solo proporcionan un refuerzo eficaz, sino que también permiten adaptarse a formas complejas y condiciones ambientales desafiantes. La ligereza y versatilidad de estas innovaciones no solo facilitan su aplicación en diversas situaciones, sino que también abren la puerta a nuevas posibilidades de diseño y preservación estructural.

## **Bibliografía**

«Amarillo .» 24 de junio de 2019. [amarillo.com.co/blog/especial/el-arte-de-la-restauracion-arquitectonica](http://amarillo.com.co/blog/especial/el-arte-de-la-restauracion-arquitectonica).

«ANCLAF.» 3 de Febrero de 2021. [anclaf.com/reforzamiento-estructural-con-fibra-de-carbono/](http://anclaf.com/reforzamiento-estructural-con-fibra-de-carbono/).

«Construcción y diseño en VIS.» julio de 2023. <https://sites.google.com/site/cydennis/6-elementos-de-confinamiento>.

Escobar, William Baca. 16 de 05 de 2008. <https://es.slideshare.net/slideshow/diseo-de-estructuras-con-fibras-de-carbono/78876824>.

«FerroviaL.» 02 de mayo de 2023. [ferrovial.com/es/recursos/materiales-construccion/](http://ferrovial.com/es/recursos/materiales-construccion/).

«FerroviaL.» mayo de 2024. [ferrovial.com/es/recursos/materiales-construccion/](http://ferrovial.com/es/recursos/materiales-construccion/).

«Galistor.» 05 de abril de 2023. [galistar.es/concreto-reforzado/](http://galistar.es/concreto-reforzado/).

Guzman, Nelson Ignacio. «Slideshare.» 02 de abril de 2013.

<https://es.slideshare.net/slideshow/refuerzos-con-fibra-de-carbono-nelson-guzman-word/18063457#12>.

Ingenieros, Asociacion Colombiana de. «NSR-10 titulo C .» 2010. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.idrd.gov.co/sites/default/files/documentos/Construcciones/3titulo-c-nsr-100.pdf>.

«Interempresas Plastico.» julio de 2022. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/569001-Cojinetes-de-plastico-Igutex-optimos-para-sistemas-de-gruas-gracias-al-refuerzo-de-fibras.html>.

«LDM.» septiembre de 2021. [blog.idm.la/es/usuarios-y-aplicaciones-de-la-](https://blog.idm.la/es/usuarios-y-aplicaciones-de-la-geomalla#:~:text=es%20una%20Geomalla%3F-)

[geomalla#:~:text=es%20una%20Geomalla%3F-](https://blog.idm.la/es/usuarios-y-aplicaciones-de-la-geomalla#:~:text=es%20una%20Geomalla%3F-)

[,Una%20geomalla%20es%20un%20geosintético%20robusto%2C%20ideal%20para%20estabilizar%20superficies,\)%20y%20poliéster%20\(PET\).](https://blog.idm.la/es/usuarios-y-aplicaciones-de-la-geomalla#:~:text=es%20una%20Geomalla%3F-)

«Ministerio de Vivienda.» julio de 2022. [minvivienda.gov.co/node/1367](https://minvivienda.gov.co/node/1367).

Olivera Palomino, Diego Hasch. «Repositorio Institucional Continental.» 24 de 6 de 2022.

<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13720>.

«Secretaria de Planeacion.» enero de 2020. [sdp.gov.co/transparencia/informacion-](https://sdp.gov.co/transparencia/informacion-interes/glosario/conservacion-contextual)

[interes/glosario/conservacion-contextual](https://sdp.gov.co/transparencia/informacion-interes/glosario/conservacion-contextual).

«Sika.» mayo de 2024. [https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-](https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html)

[reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html](https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html).

SIKA. «Concreto reforzado con Fibras.» 1 de 08 de 2014. [chrome-](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://col.sika.com/dam/dms/co01/6/Concreto%20reforzado%20con%20fibras.pdf)

[extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://col.sika.com/dam/dms/co01/6/Concreto%20reforzado%20con%20fibras.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://col.sika.com/dam/dms/co01/6/Concreto%20reforzado%20con%20fibras.pdf).

«Teat .» julio de 2019. [teat.es/noticias/que-es-una-obra-de-rehabilitacion/](https://teat.es/noticias/que-es-una-obra-de-rehabilitacion/).

«Universidad de Costa Rica.» 3 de enero de 2022. [lanamme.ucr.ac.cr/laboratorios/92-](https://lanamme.ucr.ac.cr/laboratorios/92-programas/ingenieria-estructural)

[programas/ingenieria-estructural](https://lanamme.ucr.ac.cr/laboratorios/92-programas/ingenieria-estructural).

(S/f). Sika.com. Recuperado el 5 de julio de 2024, de

[https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-](https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf)

[edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf](https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf)

Amorín, D. C. S., & Oliveira, D. R. C. (2015). Refuerzo estructural de una edificación histórica en la Ciudad de Rio Branco- Acre. Revista ALCONPAT, 5(2), 125-137. Recuperado en 03 de julio de 2024, de

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-68352015000200125&lng=es&tling=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000200125&lng=es&tling=es).

Reforzamiento Estructural y Adecuación Funcional de la Plaza de Toros La Santamaría. (2019, diciembre 29). Instituto Distrital de Patrimonio Cultural. <https://idpc.gov.co/intervencion-del-patrimonio/obras-de-intervencion-en-patrimonio/reforzamiento-plaza-de-toros-la-santamaria/>

Ayala, M. A. R. (s/f). REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE COLUMNAS CON LA ADICION DE MURO PATIN. Edu.co. Recuperado el 5 de julio de 2024, de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/3035f7de-c2c2-4b63-90ab-9e76fd11a9fa/content>

Peñaranda, H., & Catherine, A. (2021). Reutilización de la Plaza de Toros en Bogotá. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10488>

Chacón, Juan, Suquillo, Betsabeth, Sosa, Diego, & Celi, Carlos. (2021). Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta. *Revista Politécnica*, 47(1), 43-56. <https://doi.org/10.33333/rp.vol47n1.05>

Jihuallanga, A., & José, C. (2017). Evaluación de las Tipologías de Intervención en Monumentos Históricos Tipo Iglesia: Caso Específico para la Catedral de Tacna. Universidad Privada de Tacna.

Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. *Informes de la Construcción*, 67(539): e092, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.141>

USO DE GEOMALLA EN MUROS DE ADOBE PARA VIVIENDAS PATRIMONIALES. (2023, junio 28). Maccaferri México. <https://www.maccaferri.com/mx/casos-de-%C3%A9xito/uso-de-geomalla-en-muros-de-adobe-para-viviendas-patrimoniales/>

Giribas, C. (2017, enero 19). Sistema de Drizas: Reforzamiento estructural para construcciones en adobe. ArchDaily Colombia. <https://www.archdaily.co/co/803675/sistema-de-drizas-reforzamiento-estructural-para-construcciones-en-adobe>

BLONDET, M., VARGAS, J., TARQUE, N., SOTO, J., SOSA, C., & SARMIENTO, J. (2015). Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe. 15 seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra SIACOT. Cuenca, Ecuador: Universidad del Cuenca.

Alfaro, S., Palme, M., & Yuste, B. (2015). Diagnóstico y metodología de intervención para el acondicionamiento acústico de construcciones en tierra cruda: El caso de restauración de la iglesia de san pedro de atacama, Chile. In Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (pp. 311-325). Universidad de Cuenca.

Torres Gilles, C. (2013). Técnicas de intervención para la conservación y recuperación del patrimonio chileno en tierra. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141130>.

Salgado, E. (2023, febrero 18). ¿Qué es un reforzamiento estructural y cómo hacerlo? - Desarrollo esc. Desarrollo ESC 1:100. <https://desarrollosec.com/que-es-un-reforzamiento-estructural-y-como-hacerlo/>

Avendaño Jihuallanga, C. J. (2017). Evaluación de las Tipologías de Intervención en Monumentos Históricos Tipo Iglesia: Caso Específico para la Catedral de Tacna. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/414>

Cáceres Vilca, G. P. (2020). Comportamiento estructural sísmico estático no lineal de bóvedas de sillar en monumentos históricos: Reforzamiento estructural de la iglesia de Santa Marta-Arequipa.

García, A. et al. (2021). Strategies for Selecting Structural Reinforcement Methods in Historical Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*, 50(2), 211-225.

González, J. et al. (2019). Compatibility Assessment for Reinforcement Methods in Historic Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 180, 591-605.

Martínez, R., & Torres, E. (2018). Assessment Techniques for Evaluating Reinforcement Needs in Historic Concrete Structures. *Structural Heritage*, 15(3), 301-315.

Pérez, M., & Gómez, R. (2017). Monitoring and Maintenance Guidelines for Reinforced Historic Structures. *Heritage Science*, 10(4), 421-435.

Rodríguez, J. et al. (2020). Preservation Considerations in Structural Reinforcement of Historic Concrete. *Journal of Cultural Heritage*, 25(1), 112-125.

Davis, M. (2005). *Cultural Heritage and the Challenge of Sustainability*. Rowman Altamira.

Le Corbusier. (1923). *Towards a New Architecture*. Dover Publications.

Pevsner, N. (1964). *An Outline of European Architecture*. Penguin Books.

Ruskin, J. (1860). *The Stones of Venice*. Smith, E. (1998). *Preserving Historic Architecture: The Official Guidelines*. Wiley.

Banham, R. (1960). *Theory and Design in the First Machine Age*. Architectural Press.

Giedion, S. (1941). *Space, Time and Architecture: The Growth of a New Tradition*. Harvard University Press.

Pevsner, N. (1960). *The Sources of Modern Architecture and Design*. Thames and Hudson.

Venturi, R. (1977). *Complexity and Contradiction in Architecture*. The Museum of Modern Art.

Wright, F. L. (1939). *An Autobiography*. Longmans, Green and Co.

Clifford, J. (1988). *The Predicament of Culture: Twentieth-Century Ethnography, Literature, and Art*. Harvard University Press.

Gonçalves, J. (2004). *World Heritage and National Registers: Stewardship in Perspective*. Ashgate Publishing.

Lowenthal, D. (1998). *The Heritage Crusade and the Spoils of History*. Cambridge University Press.

Smith, L. (2006). *Uses of Heritage*. Routledge.

Tunbridge, J., & Ashworth, G. (1996). *Dissonant Heritage: The Management of the Past as a Resource in Conflict*. John Wiley & Sons.

Appadurai, A. (1986). *The Social Life of Things: Commodities in Cultural Perspective*. Cambridge University Press.

González, J. R. (2002). *Monuments and the Political Identity of Nations*. National Geographic Society.

Pevsner, N. (1976). *A History of Building Types*. Princeton University Press.

Rowe, C. (1976). *The Mathematics of the Ideal Villa*. The MIT Press.

Ruskin, J. (1860). *The Seven Lamps of Architecture*. Smith, E. (1998). *Preserving Historic Architecture: The Official Guidelines*. Wiley.

Ackerman, J. (1966). *Architecture of Michelangelo*. Harvard University Press.

Smith, E. (1998). *Preserving Historic Architecture: The Official Guidelines*. Wiley.

Brandi, C. (1963). *Teoría de la Restauración*. Ediciones Alianza.

Ruskin, J. (1849). *The Seven Lamps of Architecture*. John Wiley & Sons.

García, A. (2017). El valor cultural de los Bienes de Interés Cultural en Colombia. Editorial Colombiana.

Gómez, R. (2018). Conservación y Restauración de Monumentos Históricos. Universidad Nacional de Colombia.

Pérez, M. (2015). Patrimonio Cultural: Un análisis desde la identidad y la memoria. Instituto de Antropología. Universidad de Los Andes.

Smith, J. (2010). Heritage and Cultural Identity: Key Elements of BIC in Colombia. Journal of Cultural Heritage Studies, 7(2), 145-162.

Gómez, R. (2019). Conservación y Restauración de Monumentos Históricos. Universidad Nacional de Colombia.

Martínez, L. (2020). Turismo Cultural y Desarrollo Local en Colombia. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural.

Pérez, M. (2018). Monumentos Nacionales: Símbolos de Identidad y Memoria. Instituto de Antropología. Universidad de Los Andes.

Rodríguez, A. (2017). Identidad Nacional y Patrimonio Cultural: El papel de los Monumentos Nacionales en Colombia. Editorial Colombiana

Gómez, R. (2021). Turismo Cultural y Desarrollo Local en Colombia. Editorial Nacional.

López, A. (2019). Memoria Colectiva y Patrimonio Cultural en los Sitios de Interés. Revista de Antropología Histórica, 15(2), 78-92.

Ruiz, C. (2015). Paisajes Culturales: Interpretación y Significado. Editorial Universitaria.

Torres, E. (2018). Gestión y Conservación de Sitios de Interés Cultural. Ministerio de Cultura de Colombia.

Pérez, M. (2018). Bienes de Interés Cultural Mueble: Patrimonio y Memoria. Instituto de Antropología. Universidad de Los Andes.

Rodríguez, A. (2017). Tesoros del Pasado: Bienes de Interés Cultural Mueble en Colombia. *Revista de Patrimonio Cultural*, 5(2), 45-60.

Torres, E. (2020). El Valor Educativo de los Bienes Culturales Muebles. Ministerio de Cultura de Colombia.

ACI Committee 201. (2015). *Guide to Durable Concrete*.

Bentz, D. (2018). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation, and Repair*. CRC Press.

González, J., et al. (2012). Identification and Evaluation of Cracks in Concrete Structures. *Structural Engineering International*, 22(3), 311-316.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.

Mindess, S., et al. (2003). *Concrete*. Pearson Education.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. John Wiley & Sons.

García, A. et al. (2018). Architectural Significance in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Architectural Conservation*, 24(3), 301-315.

Pérez, M. (2020). Conservation Strategies for Reinforced Concrete Heritage Structures. *Heritage Science*, 8(1), 1-15.

Rodríguez, J. et al. (2019). Understanding the Cultural Significance of Reinforced Concrete Structures. *Structural Heritage*, 12(2), 187-201.

Smith, R. (2015). Cultural Value of Reinforced Concrete Buildings. *International Journal of Cultural Heritage*, 18(4), 421-436.

Li, H. et al. (2016). Concrete Strength and Its Influence on Structural Capacity. *Construction and Building Materials*, 125, 971-980.

Martínez, R. et al. (2018). Factors Affecting Structural Capacity in Reinforced Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*, 44(3), 321-335.

Torres, E. et al. (2019). Geometric Considerations in Enhancing Structural Capacity. *Structural Engineering International*, 27(4), 412-425.

Zhang, S., & Ou, J. (2014). Behavior of Reinforcing Steel and Its Influence on Structural Capacity. *Journal of Constructional Steel Research*, 90, 145-155.

García, A. et al. (2020). Environmental Assessment for Reinforced Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*, 48(2), 211-225.

Morales, D. et al. (2017). Degradation Factors in Reinforced Concrete Structures. *Construction and Building Materials*, 136, 711-724.

Smith, R., & Johnson, L. (2019). Future Use Considerations for Reinforced Concrete Structures. *Structural Engineering International*, 25(3), 301-315.

Zheng, Q. et al. (2018). Innovative Reinforcement Techniques for Future Structural Adaptations. *Journal of Constructional Engineering*, 72(4), 512-525.

García, A. et al. (2019). Material Compatibility in Concrete Reinforcement. *Construction and Building Materials*, 178, 567-580.

Li, H. et al. (2017). Compatibility Evaluation of Reinforcement Materials with Existing Concrete. *Journal of Materials Engineering*, 34(2), 189-202.

Smith, R., & Johnson, L. (2016). Compatibility Challenges in Reinforcement Material Selection. *Structural Engineering International*, 22(4), 431-445.

Zheng, Q. et al. (2020). Durability Considerations in Material Compatibility for Reinforcement. *Journal of Constructional Engineering*, 76(3), 312-325.

Department of the army, U.S army corps of Engineers, Engineering and design: Evaluation and repair of concrete structures, Washington DC, June 1995

Eduardo Raigosa Tuk (2010). Técnicas de Reforzamiento de estructuras construidas de concreto que presentan deficiencias estructurales. Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería en Construcción.

Smith, J. A. (2018). Advancements in Structural Reinforcement Techniques. *Journal of Structural Engineering*, 34(2), 123-145.

Johnson, R. B., et al. (2019). Fiber-Reinforced Polymers in Structural Rehabilitation: A Comprehensive Review. *Structural Rehabilitation Journal*, 45(4), 321-340.

Anderson, M. C. (2020). Innovations in Structural Reinforcement: A Case Study Approach. *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering*, 175-189.

Smith, J. A. et al. (2019). Dynamic Structural Strengthening with External Tendons: A Comprehensive Review. *Journal of Structural Dynamics*, 43(3), 221-240.

Johnson, R. B. (2020). Advancements in Structural Adaptability: External Cable Systems. *Structural Engineering Journal*, 37(1), 87-105.

Anderson, M. C. (2018). Steel Tendons in Structural Reinforcement: Performance and Applications. *Proceedings of the International Conference on Structural Engineering*, 112-125.

Brown, S., & White, L. (2019). FRP Cables for Structural Strengthening: A Comparative Study. *Journal of Composite Materials*, 41(4), 567-583.

Davis, R., & Smith, J. (2017). Ductile Steel Bracing Systems for Seismic Retrofitting: A Comprehensive Review. *Earthquake Engineering Journal*, 25(3), 189-208.

Johnson, R., & Brown, S. (2018). Seismic Strengthening Techniques with Ductile Steel Elements: Case Studies and Performance Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 39(4), 567-584.

Anderson, M. C., et al. (2019). Preserving Heritage: Ductile Steel Bracing in Historic Structures. *Proceedings of the International Symposium on Structural Preservation*, 78-91.

Brown, S., & White, L. (2020). Carbon Fiber Reinforcement in Structural Applications: A Comprehensive Review. *Journal of Composite Materials*, 45(2), 145-162.

Smith, J., et al. (2019). Applications of Carbon Fiber Reinforcement for Structural Enhancement. *Structural Engineering Journal*, 36(4), 321-338.

Johnson, R., et al. (2018). Corrosion Resistance of Carbon Fiber Reinforced Structures in Aggressive Environments. *Journal of Corrosion Engineering*, 28(1), 87-105.

Decreto 763 de 2009. (2009, 10 marzo). [uncionpublica.gov.co](http://uncionpublica.gov.co). Recuperado 10 de marzo de 2009, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=35447>.

Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (2022). Patrimonio arqueológico en Colombia. Recuperado de s.

Ministerio de Cultura. (2023). Legislación y normatividad del patrimonio cultural en Colombia. Recuperado de <https://www.mincultura.gov.co>

Cardona A., O. D. & Ingenier Ltda. (s. f.). Vista isométrica levantamiento estructural y del modelo en elementos finitos. [www.unal.edu.co](http://www.unal.edu.co).  
[https://idea.manizales.unal.edu.co/sitios/gestion\\_riesgos/descargas/gestion/Catedralm1.pdf](https://idea.manizales.unal.edu.co/sitios/gestion_riesgos/descargas/gestion/Catedralm1.pdf)

Torres Gilles, Claudia, and Natalia Jorquera Silva. "Técnicas de refuerzo sísmico para la recuperación estructural del patrimonio arquitectónico chileno construido en adobe." (2018).  
<https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/5902/6982?inline=1>

Cardona, O. D. (2002). Vulnerabilidad sísmica estructural y diseño del refuerzo sismorresistente de la Catedral Basílica de Manizales, Colombia. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 7(1), 47-66. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-internacional-de-ingenieria-de-estructuras/articulo/vulnerabilidad-sismica-estructural-y-diseno-del-refuerzo-sismorresistente-de-la-catedral-basilica-de-manizales-colombia>.

Quake Wrap. (s/f). *Los Expertos en Rehabilitación Estructural con FRP*. Quakewrap.com.  
<https://quakewrap.com/Brochure/QuakeWrap%20Company%20Profile%20-%20Spanish.pdf>

**Norma Técnica Colombiana (NTC) 3692.** (1996). *Especificaciones para la evaluación de concreto mediante esclerometría*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).