

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA | DEPARTAMENTO DE
ARQUITECTURA**

MAGISTER EN REHABILITACIÓN ARQUITECTÓNICA SOSTENIBLE



ESTRUCTURAS FERRATA

Ortesis Arquitectónicas

**“Soluciones biomecánicas no invasivas con estructuras metálicas para la
conservación del patrimonio en riesgo de colapso”**

TESIS DE MAGISTER

ALUMNO: RODRIGO ALEJANDRO FERRADA SERRANO

PROFESORA GUÍA: PhD. NINA A. HORMAZÁBAL POBLETE

VALPARAÍSO, 21 DE NOVIEMBRE DE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☒ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **Estructuras Ferrata. Ortesis Arquitectónicas. Soluciones biomecánicas no invasivas con estructuras metálicas para la conservación del patrimonio en riesgo de colapso**

Nombre del candidato(a): Rodrigo Alejandro Ferrada Serrano

Carrera / Grado: Magister en Rehabilitación Arquitectónica Sostenible

Campus: Casa Central Valparaíso Departamento: Arquitectura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **Nina A. Hormazábal Poblete**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 24-09-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 24-09-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ESTRUCTURAS FERRATA

Ortesis Arquitectónicas

“Soluciones biomecánicas no invasivas con estructuras metálicas para la conservación del patrimonio en riesgo de colapso”



AGRADECIMIENTOS

La culminación de esta **tesis de Magíster**, enfocada en tender un puente entre la robustez de la **Ingeniería** y la sensibilidad de la **Arquitectura** a través del concepto de las Órtesis Arquitectónicas, ha sido posible gracias a pilares fundamentales que merecen ser nombrados.

A **Karen Antinopai**, mi compañera de vida y mi más grande apoyo. Gracias por ser el refugio, la calma y el aliento constante. Tu amor, paciencia y comprensión fueron la estructura no invasiva que sostuvo mi ánimo durante los momentos más exigentes de esta investigación.

A **Nina Hormazábal**, mi querida profesora guía. Tu rigor académico, tu visión interdisciplinaria y tu generosidad al compartir tu vasto conocimiento fueron esenciales para el nacimiento y desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en la idea, por guiar cada paso con sabiduría y por enseñarme la importancia de la precisión en la conservación.

A mi compañero y amigo de tesis, **Roger Torres**, por las horas de colaboración, el intercambio de ideas y el apoyo mutuo que enriqueció significativamente este proceso.

A mis queridos **Kurrie y Lilo**. Su presencia silenciosa, sus ronroneos y sus breves interrupciones fueron la dosis perfecta de ternura y distracción en aquellas noches de trabajo que se extendieron hasta la madrugada durante el primer año del magíster. Fueron mis primeros e invaluable compañeros de desvelo.

Y por último, pero no menos importante, agradezco a **mi yo del pasado** por haber aceptado aquel inmenso desafío. Por atreverse a salir de la zona de confort y a abrazar la locura de estudiar un magíster en plena pandemia, en un contexto de incertidumbre. Esa valentía inicial fue la "estructura de partida" que hizo posible este logro.

Contenido

Biomecánica para la Conservación del Patrimonio: Una Aproximación Interdisciplinaria	1
Abstract	2
Biomechanics for Heritage Conservation: An Interdisciplinary Approach	2
Capítulo I: Introducción	3
1.1 Planteamiento del problema	4
Deterioro del patrimonio arquitectónico en Chile	4
1.1.1 Consecuencias del Deterioro:	5
Ejemplos de deterioro en el patrimonio arquitectónico en Chile	6
1.1.2 Necesidad de Acción:	11
1.1.3 Limitaciones de las técnicas actuales de intervención	11
1.1.4 Necesidad de soluciones innovadoras, sostenibles y reversibles	20
1.1.5 El Potencial de la Biomecánica	21
1.1.6 Hacia un Nuevo Paradigma de Intervención	22
1.2 Hipótesis	23
1.2.1 Definición de Órtesis y Prótesis	24
1.2.2 Justificación de la Adaptación de Órtesis	24
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivo General	25
1.3.2 Objetivos Específicos	25
1.4 Alcances y limitaciones	26
1.4.1 Alcances:	26
1.4.2 Limitaciones:	26
Conclusión del capítulo	27
1.5 Metodología de la Investigación	28
1.5.1 Enfoque y Tipo de Investigación	28
1.5.2 Fases del Proceso Metodológico	28
1.5.3 Matriz Metodológica de la Investigación	31
Capítulo II: Marco Teórico	32
2.1 Patrimonio Arquitectónico	33
2.1.1 Problemática de la Conservación del Patrimonio en Chile	33
2.1.2 Ley N°17.288 sobre Monumentos Nacionales	34

2.2 El Hombre de Vitrubio como Referente.....	35
2.2.1 Descripción de la Obra y su Contexto Histórico.....	36
2.2.2 Analogía entre el Cuerpo Humano y la Arquitectura.....	36
2.2.3 Relación con la Propuesta de Ortesis Arquitectónicas.....	37
2.3 Biomecánica y Ergonomía en la Arquitectura.....	37
2.3.1 Ortesis y Prótesis en la Arquitectura.....	38
2.3.2 Principios de Diseño de Ortesis Médicas.....	42
2.3.3 Transferencia de Conocimientos de la Medicina Ortésica a la Arquitectura.....	45
2.3.4 Fundamentación de los Conceptos de Inmovilización, Estabilización y Alineación en la Arquitectura.....	48
2.3.5 Dispositivos Médicos como Inspiración para Ortesis Arquitectónicas. -.....	53
2.4 Sostenibilidad en la Arquitectura.....	55
2.4.1 Conceptos Clave de Sostenibilidad en la Arquitectura.....	55
2.4.2 Criterios de Sostenibilidad en la Intervención del Patrimonio.....	56
2.4.3 Materiales y Tecnologías Sostenibles para la Construcción.....	57
2.5 Estado del Arte: Precedentes Doctrinales Internacionales y Casos de Aplicación Nacional.....	58
2.5.0 Criterios Metodológicos para la Selección de Casos.....	59
2.5.1 Precedentes Internacionales: Sistemas de Soporte Diferenciado, Exoesqueletos y Prótesis Contemporáneas.....	61
Casos Internacionales.....	61
Casos Nacionales.....	69
2.5.2 Técnicas y Materiales Innovadores en la Conservación de Estructuras.....	74
Conclusiones Capítulo.....	76
Capítulo III: Propuesta: Ortesis Arquitectónicas.....	76
3.1 Diseño Conceptual.....	77
3.1.1 Justificación de la elección de ortesis como solución para la conservación del patrimonio.....	77
3.1.2 Definición de los principios de diseño de las ortesis arquitectónicas (funcionalidad, estética, etc.).....	78
3.1.3 Establecimiento de criterios de selección de materiales (sostenibilidad, compatibilidad, durabilidad, etc.).....	82
3.1.4 Investigación de sistemas de fijación sin anclajes para minimizar la intervención en la estructura original.....	85
3.1.5 Propuestas de tipologías de ortesis para diferentes elementos estructurales (muros, columnas,	

arcos, etc.)	87
Tabla 6.- Diagramas de las tipologías de ortesis mencionadas en la tabla N°4.....	89
3.1.6 Justificación del diseño de cada tipología de ortesis	92
3.2 Desarrollo Técnico	96
3.2.1 Diseño y modelado en 3D de prototipos de ortesis.....	96
3.2.2 Selección de materiales y especificaciones técnicas.....	97
3.2.3 Descripción de las técnicas de fabricación de las ortesis	98
3.2.4 Elaboración de planos de fabricación y un manual de instalación.....	99
Limitaciones del uso de ortesis	100
Conclusiones.....	101
Capítulo IV: Resultados	102
4.1 Evaluación experimental.....	102
4.2 Validación en casos de estudio	108
Selección de casos de estudio	108
CASO DE ESTUDIO 1.....	110
Monumento Histórico Iglesia De San Francisco Y Patio, Comuna De San Fernando, Región Del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins.....	110
CASO DE ESTUDIO 2:.....	117
Chimeneas de Labrar	117
Levantamiento Crítico.....	117
Diagnóstico de Deformaciones Geométricas: La Evidencia del Modelo 3D.....	120
Daños Estructurales y Patologías Materiales	121
Síntesis y Diagnóstico de Vulnerabilidad Global	122
Simulación Numérica y Validación de la Ingeniería.....	122
El Rol del Análisis por Elementos Finitos (FEA)	122
Diseño y Optimización de la Solución de Refuerzo	123
Concepto del "ortesis Stent para la arquitectura dañada Arquitectónico"	123
Evolución y Optimización del Diseño	123
Conclusiones.....	126
Capítulo V: Análisis de la viabilidad.....	127
5.1 Viabilidad técnica.....	127
5.2 Viabilidad económica.....	130

5.3 Viabilidad social y ambiental.....	132
Desafíos en el uso de ortesis visibles:	133
Impacto ambiental.....	133
Instalación:.....	134
Uso y mantenimiento:	134
Medidas para minimizar el impacto ambiental:.....	134
5.4 Marco regulatorio en Chile.....	135
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
6.1 Conclusiones Generales y Nuevo Paradigma Biomecánico.....	136
1. La Biomecánica como Paradigma de Intervención frente al Reduccionismo Estático	136
2. La Cinética y Cinemática del Daño como Criterio Diagnóstico.....	137
3. Correspondencia Terminológica: Órtesis Arquitectónica y Exoesqueleto Estructural	138
6.2 Validación de la Hipótesis	138
Eficiencia Estructural y Control Tensional:.....	139
6.3 Aportes de la Investigación y Validación en Casos de Aplicación.....	140
1. Aportes Metodológicos y Operativos frente al Estado del Arte.....	140
2. Evidencia Empírica en los Casos de Aplicación en Chile.....	141
.....	142
3. Impacto Legal y Procedimental ante el Consejo de Monumentos Nacionales (CMN)	142
6.4 Limitaciones de la Investigación	143
6.5 Recomendaciones Estratégicas para la Conservación Patrimonial	144
6.6 Lineamientos para Futuras Investigaciones	144
Síntesis Final	145
Referencias Bibliográficas Consolidadas (APA 7.ª Edición)	146
CUADRO DE FOTOGRAFIAS.....	150
CUADRO DE TABLAS.....	153

Biomecánica para la Conservación del Patrimonio: Una Aproximación Interdisciplinaria

La conservación del patrimonio cultural tangible enfrenta el desafío de preservar objetos de valor histórico y artístico que sufren deterioro debido al paso del tiempo, agentes ambientales y factores intrínsecos. En este contexto, la biomecánica emerge como una disciplina clave para comprender el comportamiento mecánico de los objetos patrimoniales y desarrollar estrategias de conservación más eficientes y menos invasivas.

Esta tesis explora la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio, analizando cómo los principios de la mecánica, la ingeniería y la biología se combinan para diagnosticar, analizar y tratar las patologías que afectan a los bienes culturales. Se aborda la importancia de comprender las propiedades de los materiales, las fuerzas que actúan sobre los objetos y los mecanismos de degradación, con el fin de diseñar intervenciones que garanticen su estabilidad y preservación a largo plazo.

La biomecánica permite el desarrollo de herramientas y técnicas innovadoras para la conservación, como el análisis de elementos finitos (FEA), la fotogrametría, la topografía láser y la creación de ortesis personalizadas. Estas herramientas facilitan la evaluación del estado de conservación, la identificación de áreas de riesgo y la simulación de diferentes escenarios de intervención.

El diseño de ortesis, basado en principios biomecánicos, se presenta como una solución eficaz para la estabilización y corrección de deformaciones en objetos patrimoniales. Las ortesis, dispositivos externos que interactúan con el objeto, se adaptan a sus características específicas y necesidades de conservación, proporcionando soporte, inmovilización, corrección o protección.

La aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio requiere un enfoque interdisciplinar que integre conocimientos de diferentes campos, como la historia del arte, la arqueología, la ciencia de los materiales y la ingeniería. Esta colaboración permite abordar la complejidad de los objetos patrimoniales y desarrollar soluciones integrales que respeten su valor histórico, artístico y cultural.

En conclusión, la biomecánica se posiciona como una herramienta fundamental para la conservación del patrimonio, ofreciendo un enfoque científico y tecnológico para la preservación de bienes culturales de valor incalculable. Su aplicación, en conjunto con otras disciplinas, contribuye a la protección del legado cultural para las generaciones futuras.

Palabras:

Biomecánica, Conservación del patrimonio, Ortesis Arquitectónica, Patrimonio cultural tangible, Análisis elementos finitos (FEA), Fotogrametría, Topografía láser, Mínima intervención, Reversibilidad, Materiales, Estabilidad:

Abstract

Biomechanics for Heritage Conservation: An Interdisciplinary Approach

The conservation of tangible cultural heritage faces the challenge of preserving objects of historical and artistic value that suffer deterioration due to the passage of time, environmental agents, and intrinsic factors. In this context, biomechanics emerges as a key discipline to understand the mechanical behavior of heritage objects and develop more efficient and less invasive conservation strategies.

This thesis explores the application of biomechanics in heritage conservation, analyzing how the principles of mechanics, engineering, and biology are combined to diagnose, analyze, and treat the pathologies that affect cultural assets. It addresses the importance of understanding the properties of materials, the forces acting on objects, and the mechanisms of degradation, in order to design interventions that guarantee their stability and long-term preservation.

Biomechanics enables the development of innovative tools and techniques for conservation, such as finite element analysis (FEA), photogrammetry, laser topography, and the creation of custom orthoses. These tools facilitate the assessment of the state of conservation, the identification of risk areas, and the simulation of different intervention scenarios.

The design of orthoses, based on biomechanical principles, is presented as an effective solution for the stabilization and correction of deformations in heritage objects. Orthoses, external devices that interact with the object, are adapted to their specific characteristics and conservation needs, providing support, immobilization, correction, or protection.

The application of biomechanics in heritage conservation requires an interdisciplinary approach that integrates knowledge from different fields, such as art history, archeology, materials science, and engineering. This collaboration allows addressing the complexity of heritage objects and developing comprehensive solutions that respect their historical, artistic, and cultural value.

In conclusion, biomechanics is positioned as a fundamental tool for heritage conservation, offering a scientific and technological approach to the preservation of cultural assets of incalculable value. Its application, in conjunction with other disciplines, contributes to the protection of cultural legacy for future generations.

Capítulo I: Introducción

Introducción

Chile, tierra de contrastes geográficos y rica historia, atesora un valioso patrimonio arquitectónico que dialoga con el tiempo, desde vestigios precolombinos hasta audaces construcciones modernas. Este legado cultural, tangible en iglesias centenarias, palacios señoriales, viviendas vernáculas, emblemáticas fábricas y monumentos conmemorativos, constituye un pilar fundamental de la identidad chilena y un motor para el desarrollo social, económico y turístico. Sin embargo, este tesoro edificado se enfrenta a una creciente amenaza de deterioro, producto de una compleja interacción de factores ambientales, sociales y económicos que ponen en riesgo su integridad y perdurabilidad.

Ante esta preocupante realidad, las intervenciones de emergencia habitualmente implementadas en monumentos históricos a menudo resultan paradójicamente dañinas. Técnicas invasivas, materiales incompatibles y ejecuciones deficientes, lejos de solucionar el problema, pueden acelerar el proceso de deterioro, generando lesiones adicionales a la estructura original. Ejemplos emblemáticos a nivel nacional evidencian cómo estas prácticas, en lugar de preservar, comprometen aún más el futuro de nuestro patrimonio.

En este contexto surge una propuesta innovadora inspirada en la medicina: las ortesis arquitectónicas. Esta propuesta se fundamenta en un estudio empírico basado en la experiencia profesional del autor. La problemática surge de una observación recurrente: en el campo de la conservación de monumentos, es frecuente encontrar intervenciones que se basan en la experimentación directa, careciendo de un sustento teórico sólido. Esta aproximación, a menudo, conduce a la aplicación de soluciones inadecuadas para los diversos estados de deterioro del patrimonio. Por lo tanto, una parte sustancial de esta tesis se nutre del análisis de casos y situaciones reales, extraídas directamente de dicho contexto profesional.

Las ortesis arquitectónicas al igual que sus homólogas médicas, diseñadas para brindar soporte externo al cuerpo humano, estas estructuras auxiliares buscan ofrecer un apoyo no invasivo y respetuoso a edificaciones dañadas. Entendiendo la órtesis como un apoyo externo que ayuda a prevenir o tratar lesiones, a diferencia de la prótesis que reemplaza una parte dañada, se plantea un sistema de refuerzo que no requiere intervenciones destructivas, sino que actúa como un exoesqueleto arquitectónico que estabiliza y protege la estructura existente, permitiendo su "sanación" y evitando el colapso.

La implementación de ortesis arquitectónicas presenta múltiples ventajas: mínimas complicaciones al elemento patrimonial, compatibilidad con materiales históricos, rapidez de instalación en situaciones de emergencia y potencial reducción de costos. La presente investigación explora en profundidad este concepto innovador, buscando definir metodologías de diseño y aplicación de ortesis arquitectónicas que contribuyan a la conservación efectiva y respetuosa del invaluable patrimonio construido de Chile, proponiendo una solución que podría trascender fronteras y enriquecer las prácticas de conservación a nivel global.

1.1 Planteamiento del problema

Deterioro del patrimonio arquitectónico en Chile

El deterioro del patrimonio arquitectónico en Chile se manifiesta en una amplia gama de lesiones y daños que afectan la integridad y la estabilidad de las estructuras. Estos factores de deterioro a menudo están interconectados, creando un ciclo de daño y abandono. Por ejemplo, eventos climáticos extremos exacerbados por el cambio climático pueden dañar edificios históricos, haciéndolos menos atractivos para el turismo y reduciendo los incentivos económicos para su preservación. A continuación, se presenta una tabla que resume los principales tipos de daño, sus causas y consecuencias, dicha tabla se conforma a partir de información consolidada en base a conceptos y clasificaciones estándar en el campo de la restauración arquitectónica, presentes en publicaciones como: la Enciclopedia Broto de patologías de la construcción (Vols. 1-5). Broto Ediciones, Broto, C. (Ed.). (2012), el libro Conservation of Historic Buildings de Feilden, B. M. (2003) y la guía: Guide to Recording Historic Buildings. Butterworth Architecture, Architectural Press. ICOMOS. (1990).

Tabla 1.- Matriz de Patologías Comunes en el Patrimonio Arquitectónico.

Origen de patología	Descripción	Causas	Consecuencias
Humedad	Penetración de agua en los materiales, provocando degradación, aparición de hongos y corrosión.	Lluvias, condensación, infiltraciones, capilaridad.	Daños estructurales, pérdida de resistencia, deterioro estético.
Contaminación	Depósito de sustancias contaminantes en las superficies, causando erosión, decoloración y alteración de los materiales.	Gases contaminantes (dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno), partículas en suspensión.	Deterioro estético, pérdida de resistencia, aceleración del envejecimiento de los materiales.
Sismos	Movimientos telúricos que	Actividad sísmica, vulnerabilidad	Daños estructurales, colapsos, pérdida de

Origen de patología	Descripción	Causas	Consecuencias
	generan fisuras, grietas y colapsos en las estructuras.	estructural de las construcciones antiguas.	estabilidad.
Vandalismo	Daños intencionales causados por personas, como grafitis, pintadas y destrucción.	Falta de educación y conciencia sobre el valor del patrimonio, falta de vigilancia.	Deterioro estético, pérdida de valor histórico, sensación de inseguridad.
Abandono	Falta de mantenimiento y cuidado de los inmuebles, acelerando su deterioro.	Falta de recursos económicos, incertidumbre sobre la propiedad, trámites administrativos complejos.	Deterioro generalizado, riesgo de colapso, pérdida de valor patrimonial.

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de la síntesis de manuales de patología de la edificación y cartas de conservación basados en Broto, C. (Ed.). (2012); Feilden, B. M. (2003); ICOMOS. (1990).

1.1.1 Consecuencias del Deterioro:

Las consecuencias del deterioro del patrimonio arquitectónico son múltiples y afectan diversos ámbitos:

- **Pérdida de valor histórico y cultural:** El deterioro irreversible de un inmueble patrimonial implica la pérdida de un testimonio único del pasado, con toda la información histórica y cultural que contiene.
- **Pérdida de valor económico:** El patrimonio arquitectónico constituye un recurso económico importante, ya que atrae turismo, genera empleo y promueve el desarrollo local. Su deterioro implica una disminución de su valor económico y una pérdida de oportunidades, como la pérdida de ingresos por turismo o la disminución del valor de las propiedades en zonas con patrimonio deteriorado.
- **Impacto social negativo:** La pérdida de edificios emblemáticos puede generar un sentimiento de desarraigo y pérdida de identidad en la comunidad. Además, el deterioro del entorno construido puede afectar la calidad de vida de los habitantes, generando problemas de seguridad, insalubridad y deterioro del espacio público. En algunos casos, el deterioro de viviendas patrimoniales puede llevar al desplazamiento de comunidades.

Para ilustrar la problemática del deterioro del patrimonio arquitectónico en Chile, se pueden mencionar

algunos ejemplos concretos:

Ejemplos de deterioro en el patrimonio arquitectónico en Chile

A continuación, se describen casos identificados por el autor donde se puede visualizar ejemplos de deterioros de distintos tipos.

Cementerio N°1 de Valparaíso:

Declarado Monumento Nacional en 1998, este cementerio es un museo al aire libre que alberga mausoleos y esculturas de gran valor artístico e histórico. Su ubicación en el Cerro Panteón, con vistas a la bahía de Valparaíso, lo convierte en un hito paisajístico y cultural de la ciudad. Sin embargo, la exposición a la humedad y la salinidad del ambiente costero, sumado al vandalismo, a la falta de mantenimiento y a la acción de los varios eventos sísmicos como el terremoto de 1906 y otros varios que le han sucedido constantemente el último siglo, han provocado un progresivo deterioro de sus estructuras.



Figura 1. Dos fotografías del acceso al Cementerio N° 1 de Valparaíso, Cerro Cárcel, año 2021. Izquierda: cielo con daño por humedad. Derecha Columnas con daño severo. Fuente: Elaboración propia.

Consecuencias del deterioro:

- **Erosión y desprendimiento de materiales:** La piedra y el mármol de los mausoleos, expuestos a la acción del viento, la lluvia y la brisa marina, sufren erosión y desprendimiento. Esto se traduce en la pérdida



Figura 2. Fotografía de mausoleos del Cementerio N.º 1 de Valparaíso, año 2021. Ejemplo del deterioro. Fuente: Elaboración propia, fotografía utilizada para informe del Consejo de Monumentos Nacionales, 2021.

de detalles ornamentales, inscripciones y relieves, afectando el valor artístico de las esculturas y la legibilidad de los epitafios. Además, el desprendimiento de material pone en riesgo la estabilidad de las estructuras, pudiendo provocar desplomes y accidentes. En Figura 2 a continuación, a modo de ejemplo se muestra el muro oriente del mausoleo año 2020, colapsado por las lluvias del año 2020, además de los daños estructurales que presentaba producto del terremoto del año 2010.

- **Corrosión de metales:** Las rejas, placas conmemorativas y esculturas de metal, presentes en tumbas y mausoleos, sufren corrosión debido a la humedad y la salinidad del ambiente. La corrosión debilita el metal, provocando la pérdida de resistencia y la deformación de las piezas. Esto afecta tanto la integridad estructural como el valor estético de los elementos metálicos.
- **Crecimiento vegetación:** la presencia de vegetación en las hendiduras, grietas y fisuras de los muros de los mausoleos, han generado que se acelere el deterioro de los materiales. Las raíces, al crecer, ejercen presión sobre las estructuras, provocando desplazamientos y agrietamientos. Además, la vegetación retiene humedad, favoreciendo la aparición de hongos y musgos que degradan los materiales.
- **Vandalismo y robos:** El Cementerio N°1 ha sido víctima de actos vandálicos y robos, que han afectado tanto las estructuras como los elementos decorativos. Se han registrado pintadas, grafitis, rotura de lápidas y sustracción de esculturas y piezas de mármol. Estos actos no solo dañan el patrimonio, sino que también generan inseguridad y afectan la imagen del lugar.
- **Pérdida de valor patrimonial:** El deterioro del Cementerio N°1 no solo afecta su valor estético e histórico, sino que también impacta en su valor social y cultural. El cementerio es un lugar de memoria colectiva, donde se preservan las historias de las familias y personajes que construyeron la ciudad. Su degradación implica una pérdida de identidad y una desconexión con el pasado.

- **2. Iglesia San Leonardo de Porto Mauricio de Collipulli**

La Iglesia San Leonardo de Porto Mauricio, ubicada en la comuna de Collipulli, Región de la Araucanía, es un testimonio tangible de la historia y la cultura de Chile. Construida a finales del siglo XIX, esta iglesia de estructura interior de madera, muros perimetrales de albañilería y adobe, representa la arquitectura religiosa de la época y la labor evangelizadora de la Orden Franciscana en la zona. Declarada Monumento Histórico en 2013, la iglesia enfrenta hoy un progresivo deterioro que amenaza su integridad y su valor patrimonial.



Figura 3. Fotografía de la Iglesia San Leonardo de Porto Mauricio, ubicada en la comuna de Collipulli, año 2021. Se observa daño estructural debido al abandono del inmueble. Fuente: Elaboración propia.

Consecuencias del deterioro:

- **Debilitamiento estructural:** La degradación de la madera por la humedad, los insectos y los eventos sísmicos afecta la resistencia de la estructura, aumentando el riesgo de colapso parcial o total de la iglesia. Esto pone en peligro la seguridad de las personas que la visitan y la integridad del monumento.

- **Pérdida de elementos ornamentales:** La iglesia posee detalles tallados en madera, como molduras, cornisas y capiteles, que le otorgan un valor artístico e histórico. El deterioro de la madera provoca la pérdida de estos elementos, afectando la estética del edificio y su valor patrimonial.



Figura 4. Fotografía interior de la Iglesia de San Leonardo de Porto Mauricio, año 2021. Se observan daños en: estructuras, pavimentos y ornamentación. Fuente: Elaboración propia, tomada y cedida al Consejo de Monumentos Nacionales.

• **Daños en la cubierta:** Las filtraciones de agua por la cubierta, deteriorada por el tiempo y la falta de mantenimiento, dañan la estructura de madera y generan problemas de humedad en el interior de la iglesia. Esto afecta la conservación de los elementos decorativos, como pinturas y retablos, y genera un ambiente insalubre.

• **Riesgo de incendio:** La madera seca y deteriorada es altamente

inflamable, lo que aumenta el riesgo de incendio en la iglesia. Un incendio podría provocar la pérdida total del monumento, con un impacto irreparable en el patrimonio cultural de la comunidad.

- **Disminución del uso y la valoración:** El deterioro de la iglesia afecta su funcionalidad y su valoración por parte de la comunidad. La falta de mantenimiento y la presencia de daños visibles disminuyen el interés por el edificio, lo que puede llevar a su abandono y a la pérdida de su significado cultural.

Impacto en la comunidad:

La Iglesia San Leonardo de Porto Mauricio es un hito importante para la comunidad de Collipulli. Su deterioro no solo afecta al edificio en sí, sino que también tiene un impacto social y cultural:

- **Pérdida de un espacio de encuentro:** La iglesia es un lugar de reunión para la comunidad católica, donde se celebran misas, bautizos, matrimonios y otras ceremonias religiosas. Su deterioro limita su uso y afecta la vida social de la comunidad.
- **Disminución del atractivo turístico:** La iglesia es un atractivo turístico para la comuna de Collipulli, que forma parte de la Ruta Patrimonial de Malleco. Su deterioro afecta la imagen de la comuna y disminuye su potencial turístico.
- **Pérdida de identidad:** La iglesia es un símbolo de la historia y la identidad de Collipulli, que recuerda la labor evangelizadora de la Orden Franciscana y la tradición constructiva de la zona. Su deterioro implica una pérdida de identidad y una desconexión con el pasado.

3. Ruinas de Chambeque Enacar Lota:



Figura 5. Fotografía del acceso al sector Chambeque, edificio ENACAR, año 2020. Fuente: Elaboración propia, tomada y cedida al Consejo de Monumentos Nacionales.

En este sector se encuentran los edificios de la ENACAR, en ellos se puede descubrir la historia olvidada de la que fuera una de las ciudades industriales más importantes a nivel industrial a mediados del siglo XX. Este sector en cierta forma refleja el grado de desarrollo industrial de la zona y la potencia industrial de la misma.

En el sector aún se pueden apreciar colosales estructuras y grandes edificios cuyo objetivo principal era la explotación minera del carbón, considerado materia prima esencial para los procesos industriales a mediados del siglo pasado

En el sector podemos encontrar variados componentes industriales, todos relacionados con la actividad minera de la época, siendo estos componentes en la mayoría de los casos únicos para la época marcando precedentes de innovación y tecnologías.

Algunos de los componentes se detallan a continuación:

- Termoeléctrica.
- Galpones del Parque Industrial.
- Planta de lavado.
- Silo de la planta de lavado.
- Silo de la Planta Transportadora.
- Tornamesa.
- Ruinas cinta transportadora.
- Edificio Búnker.
- Muelle.
- Tortas de escoria.

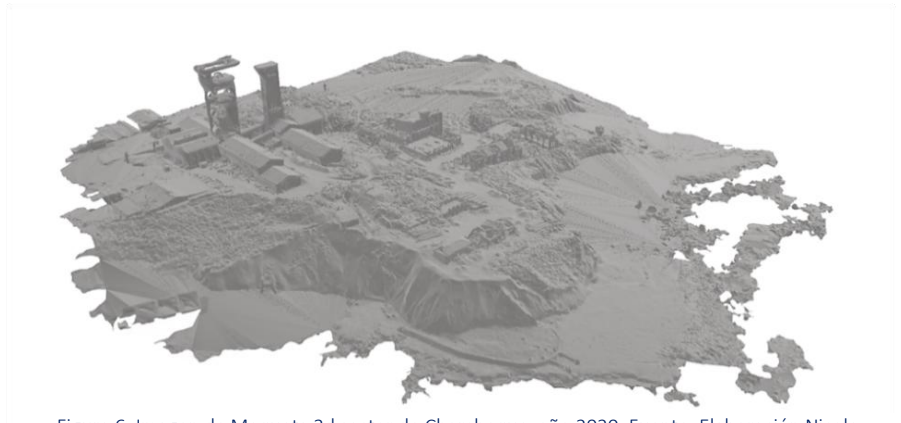


Figura 6. Imagen de Maqueta 3d sector de Chambeque, año 2020. Fuente: Elaboración Nicole Ávila Ingeniero Civil Universidad de Concepción.

- Polvorines.

Lamentablemente después de 150 años de historia y actividad productiva, el año 1997 se decreta el cierre del sector y el cese de la actividad minera durante el gobierno del presidente Eduardo Frei.

Consecuencias del deterioro:



Figura 7. Fotografía aérea del sector principal del complejo industrial carbonífero de Chambeque, Comuna de Lota, año 2020. Fuente: Elaboración propia

- **Colapso de estructuras:** Muros, techos y pisos de los edificios industriales se han derrumbado debido a la acción del tiempo, la corrosión de los materiales y la falta de mantenimiento. Esto pone en riesgo la seguridad de las personas que visitan el sitio y la integridad del conjunto patrimonial.

- **Pérdida de maquinaria y elementos históricos:** La maquinaria y otros elementos que formaban

parte del proceso industrial se han deteriorado o han sido robados, afectando el valor histórico del sitio y la comprensión del proceso productivo del carbón.

- **Degradación del entorno:** El entorno de las ruinas se ha degradado, con acumulación de basura, escombros y vegetación invasiva. Esto afecta la imagen del lugar, su potencial turístico y la conservación de las estructuras.

- **Riesgos ambientales:** El abandono de las instalaciones industriales puede generar riesgos ambientales, como la contaminación del suelo y del agua con residuos tóxicos o la presencia de estructuras inestables que representan un peligro para la seguridad de las personas. En la vista aérea de la figura 7, se observa el grado de deterioro producto del abandono y la falta planes de conservación por parte de las entidades a cargo de la preservación de dicho patrimonio industrial. La Fotografía fue tomada y cedida por el autor para la elaboración de



Figura 8. Fotografía sector industrial carbonífero de Chambeque, Comuna de Lota, año 2020. Fuente: Elaboración propia. -

un informe de diagnóstico en el área de Patrimonio en Riesgo del Consejo de Monumentos Nacionales, dicho informe se realizó en el año 2020 y el objetivo para este caso fue la elaboración de proyectos antivandálico, con el fin de frenar la intrusión a las cabrias de los piques (torres) para evitar los accidentes

fatales por caídas de gran altura

- **Pérdida de memoria e identidad:** El deterioro de las Ruinas de Chambeque implica una pérdida de memoria e identidad para la comunidad de Lota. El sitio representa una parte importante de la historia local y de la identidad minera de la región. Su degradación implica una desconexión con el pasado y una pérdida de referentes culturales (ver Figura 8 :).

Estos tres ejemplos ilustran las diversas consecuencias del deterioro del patrimonio arquitectónico en Chile, que van desde la pérdida de valor estético e histórico hasta el riesgo de colapso de las estructuras y la generación de problemas ambientales. La aplicación de la biomecánica, a través del desarrollo de ortesis arquitectónicas, se presenta como una alternativa para la conservación de estos monumentos, permitiendo su estabilización, protección y revalorización a largo plazo.



Figura 9. Fotografía de las cabrias (torres) de los piques Alberto 1 y Alberto 2, año 2020. Fuente: Elaboración propia, tomada y cedida por el autor al Consejo de Monumentos Nacionales para el informe de diagnóstico de conservación del complejo carbonífero de Chambeque.

1.1.2 Necesidad de Acción:

La situación actual del patrimonio arquitectónico en Chile exige la implementación de medidas urgentes para su conservación. Es necesario abordar las causas del deterioro de manera integral, considerando aspectos ambientales, sociales, económicos y culturales. Se requiere fortalecer la legislación, aumentar la inversión en

conservación, promover la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, y concientizar a la sociedad sobre la importancia de preservar este legado para las futuras generaciones.

1.1.3 Limitaciones de las técnicas actuales de intervención

Las técnicas tradicionales de intervención en el patrimonio arquitectónico, si bien han sido valiosas para la conservación de numerosos edificios, presentan limitaciones que dificultan su aplicación en ciertos casos y que hacen necesario buscar nuevas soluciones. Algunas de estas limitaciones son:

- **Invasividad y alteración de la originalidad:** Muchas técnicas tradicionales implican la remoción de material original, la sustitución de elementos o la adición de nuevos componentes que pueden alterar la autenticidad de la obra.
- **Reversibilidad:** Algunas intervenciones son irreversibles, lo que impide recuperar el estado original de la estructura en caso de ser necesario.
- **Compatibilidad con los materiales originales:** En ocasiones, los materiales utilizados en las intervenciones no son compatibles con los materiales originales, lo que puede generar problemas de deterioro a largo plazo.

- **Costos y complejidad:** Algunas técnicas tradicionales son costosas y complejas de implementar, lo que limita su aplicación en proyectos con presupuestos reducidos.
- **Dificultad de acceso:** En edificios con problemas de accesibilidad, la aplicación de ciertas técnicas puede ser complicada o incluso imposible.
- **Impacto ambiental:** Algunos materiales y procesos utilizados en las intervenciones tradicionales pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente.
- **Falta de conciencia y capacitación:** La falta de conciencia sobre la importancia de la conservación del patrimonio y la escasez de profesionales capacitados en técnicas de intervención adecuadas son factores que limitan la efectividad de las acciones de conservación.

Manuales de conservación del patrimonio, publicaciones del Consejo de Monumentos Nacionales y artículos de revistas especializadas describen las técnicas de intervención más utilizadas en Chile, como la consolidación, la reintegración, la limpieza y la protección. Sin embargo, estudios comparativos de técnicas de intervención, análisis de casos de intervención y opiniones de expertos en conservación del patrimonio han puesto de manifiesto las limitaciones de estas técnicas en términos de Invasividad, reversibilidad, compatibilidad y costos.

Algunos ejemplos de intervenciones que han tenido resultados negativos o inesperados son:

- La limpieza con productos químicos agresivos puede dañar la superficie de los materiales pétreos.
- La reintegración de elementos perdidos con materiales no compatibles puede generar nuevos problemas de deterioro.
- Las intervenciones estructurales invasivas pueden alterar la distribución de cargas y generar nuevos puntos de debilidad.

Informes de evaluación de intervenciones, estudios de caso y artículos críticos sobre prácticas de conservación documentan estos casos y alertan sobre la necesidad de una mayor investigación y un enfoque más cauteloso en las intervenciones.



Figura 10. Fotografía polvorín ex cárcel de Valparaíso, año 2023. Fuente: Elaboración propia.

En las páginas siguientes (19 a la 24) se describen algunas intervenciones halladas en la propuesta técnica analizada en esta tesis que **NO** cumplen con los principios de reversibilidad y no alteración del diseño original del monumento.

Polvorín de ex Cárcel de Valparaíso

Dentro del intrincado análisis de intervenciones fallidas o erróneas en el diagnóstico, diseño y ejecución de proyectos de restauración, emerge un caso emblemático en la Quinta Región de Chile: la intervención estructural

destinada a la estabilización del polvorín de la ex cárcel de Valparaíso (ver Figura 10). Este icónico monumento, testigo de épocas pasadas yace ahora como un claro ejemplo de las consecuencias nefastas que pueden acarrear las decisiones desacertadas en el ámbito de la conservación patrimonial.

La intervención en el polvorín buscaba implementar una estructura que, a modo de "ortesis" o "prótesis", pudiera fortalecer el cuerpo dañado del edificio, específicamente su estructura de albañilería. Sin embargo, una observación detallada apoyada por Figura 10 y 12 fotografías del polvorín y Figuras 11 ;13 y 14 bocetos de detalles elaboradas por el autor, revela que la intervención careció de un diagnóstico adecuado previo al diseño del soporte estructural. La propuesta resultante adolece de un calce perfecto con la geometría original del elemento a reforzar, lo que evidencia una falta

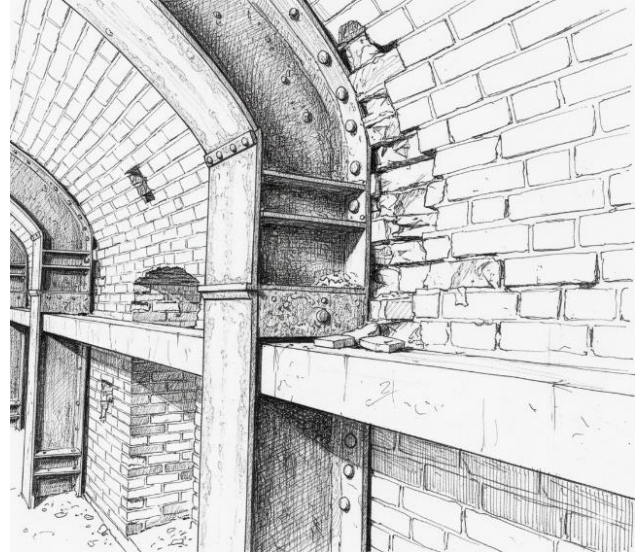


Figura 11. Boceto o ilustración del detalle del daño generado por los trabajos realizados en la albañilería del polvorín, año 2025. Fuente: elaboración propia



Figura 12. Fotografía que muestra el daño irreversible en la albañilería de la bóveda original para que los arcos de acero pudieran encajar, año 2023. Fuente: elaboración propia

de comprensión profunda de las particularidades arquitectónicas del monumento.

Para lograr una integración estructural óptima entre los perfiles de acero IP de refuerzo y la mampostería original del edificio, fue necesario realizar un rebaje en la cara interior del muro. Este procedimiento permitió que el ala de la viga metálica se acoplara de forma precisa con la albañilería existente, construida con ladrillos de gran escuadría hechos a mano en el siglo XIX (ver figuras 10 y 12, fotografías).

Si bien esta técnica es estructuralmente válida y aceptada, resulta altamente invasiva. La intervención compromete el valor patrimonial del inmueble, ya que altera de forma irreversible un elemento original del conjunto que conformó la antigua cárcel de Valparaíso.

Esta deficiencia en el diseño condujo a una decisión aún más desafortunada por parte de la inspección y el contratista a cargo de la obra. En un intento por forzar el encaje de la estructura metálica, se optó por intervenir directamente la estructura original, generando daños estructurales irreversibles en sus paredes interiores. Los arcos que componían la "prótesis" metálica no lograron acoplarse armoniosamente con la

estructura preexistente, lo que resultó en la alteración irreparable del patrimonio arquitectónico.

Este caso pone de manifiesto la importancia crucial del conocimiento y la aplicación de tecnologías actualizadas, tanto para el levantamiento de datos como para el diseño de soluciones de restauración. La carencia de estos conocimientos mínimos de diseño, aunada a la falta de pericia en el manejo de técnicas de vanguardia, condujo a una serie de errores cuyas consecuencias lamentables para el patrimonio arquitectónico del país son de carácter irreversible.

La intervención en el polvorín de la ex Cárcel de Valparaíso (ver figuras 10, 11, 12, 13 y 14) es un caso paradigmático de **mala praxis** en la conservación patrimonial. La deficiente ejecución de los trabajos de instalación de la estructura auxiliar metálica resultó en la necesidad de realizar un **rebaje invasivo** en la cara interior del muro, provocando un **daño estructural y material de carácter irreversible** en la albañilería original del monumento.

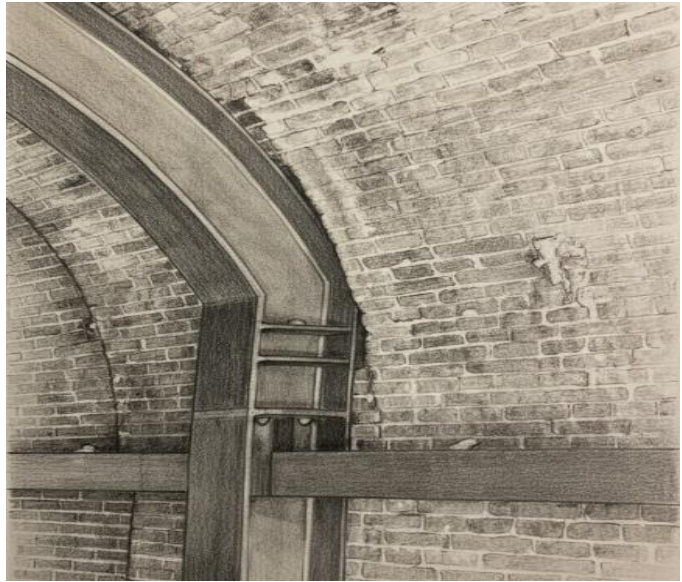


Figura 13. Boceto o ilustración que refleja el trabajo de la estructura metálica en la bóveda de albañilería del polvorín de la ex cárcel. Año 2025. Fuente : Elaboración propia.

Este error, impulsado por un diagnóstico inadecuado y la falta de un calce perfecto en el diseño del soporte, trasciende el daño físico, constituyendo una **pérdida irreparable para la memoria colectiva y la identidad cultural de la región**.



Figura 14 Boceto o ilustración que refleja el trabajo de la estructura metálica en la bóveda de albañilería del polvorín de la ex cárcel. Año 2025. Fuente : Elaboración propia.

Dichos incidentes subrayan la necesidad urgente de adoptar **enfoques más rigurosos, profesionales y científicamente fundamentados** en el campo de la conservación patrimonial, priorizando el uso de tecnologías actualizadas y la pericia técnica.

Es fundamental que los proyectos de restauración se basen en investigaciones exhaustivas y análisis profundos de las estructuras existentes, así como en la comprensión de su valor histórico y cultural.

Asimismo, es esencial que los profesionales a cargo de estas intervenciones cuenten con la capacitación

adecuada y la experiencia necesaria para llevar a cabo proyectos de esta envergadura.

La falta de cuidado y pericia en la intervención del polvorín de Valparaíso nos recuerda que el patrimonio arquitectónico es un legado frágil y valioso que merece ser protegido y preservado para las generaciones futuras. Es crucial que aprendamos de nuestros errores y nos comprometamos a adoptar prácticas más responsables y sostenibles en el campo de la conservación del patrimonio, para evitar que se repitan casos como este y garantizar que nuestro legado cultural perdure en el tiempo.

Cierro y protecciones de vanos de Puertas y ventanas edificios e iglesias durante estallido social. -

Durante el estallido social en Chile, la protección de edificios de interés patrimonial, tanto históricos como arquitectónicos, se convirtió en una prioridad. Sin embargo, un análisis de las medidas adoptadas en diversas ciudades del país revela que muchas de estas decisiones, destinadas a salvaguardar el patrimonio, generaron daños irreversibles en los elementos que componen dichos edificios.

Un recorrido por las calles del centro de Santiago, en la Región Metropolitana, ofrece un claro ejemplo de esta situación. La mayoría de los templos e iglesias católicas fueron objeto de trabajos de protección en sus vanos de acceso, puertas y ventanas. No obstante, la falta de asesoramiento adecuado en este tipo de intervenciones condujo a decisiones que, desde la perspectiva de la ley de conservación patrimonial y los estudios sobre intervenciones reversibles, resultaron ser inadecuadas.



Figura 15 .Fotografía que muestra láminas de acero clavadas en el arco de medio punto del acceso de la Catedral de Santiago, Monumento Nacional, año 2024. Fuente: Elaboración propia.

En lugar de optar por soluciones que no comprometieran la integridad de los elementos originales, se utilizaron elementos metálicos para proteger puertas y ventanas de madera. Estas fijaciones se realizaron con clavos y tornillos (ver figuras 15,16 y 17), generando perforaciones en puertas centenarias, como las de acceso a la Catedral Metropolitana que dan hacia la Plaza de Armas.

La misma situación se observa en la Iglesia de La Merced, ubicada en calle Merced. Sus puertas, que datan de los siglos XVII y XVIII, fueron tapiadas con latas de zinc pintadas de color café, fijadas con clavos que dañaron irreversiblemente la madera original.



Figura 16. Fotografía de Iglesia de las Agustinas. Se observa la colocación de láminas de acero zinc-alum. año 2024. Fuente: Elaboración propia.

a cargo de estas tareas cuentan con la capacitación adecuada y la experiencia necesaria para llevar a cabo proyectos de esta envergadura.

La protección del patrimonio arquitectónico no solo implica la preservación de los elementos materiales que lo componen, sino también la salvaguarda de su valor simbólico y cultural. Las decisiones tomadas durante el estallido social, al generar daños irreversibles en edificios históricos, no solo afectaron la integridad de los inmuebles, sino que también comprometieron su significado y valor para las generaciones presentes y futuras.

Es fundamental que aprendamos de los errores cometidos y adoptemos prácticas más responsables y sostenibles en el campo de la conservación del patrimonio. La protección de nuestro legado cultural requiere de un enfoque multidisciplinario que involucre a arquitectos, historiadores, restauradores y otros profesionales especializados.

Estos ejemplos ilustran la necesidad de adoptar enfoques más cuidadosos y profesionales en la protección del patrimonio arquitectónico. Las decisiones tomadas durante el estallido social, si bien motivadas por la urgencia de proteger los edificios, evidencian una falta de comprensión de los principios fundamentales de la conservación.

Es crucial que las intervenciones en edificios patrimoniales se basen en estudios exhaustivos y análisis detallados de los elementos existentes, así como en la comprensión de su valor histórico y cultural. Asimismo, es esencial que los profesionales

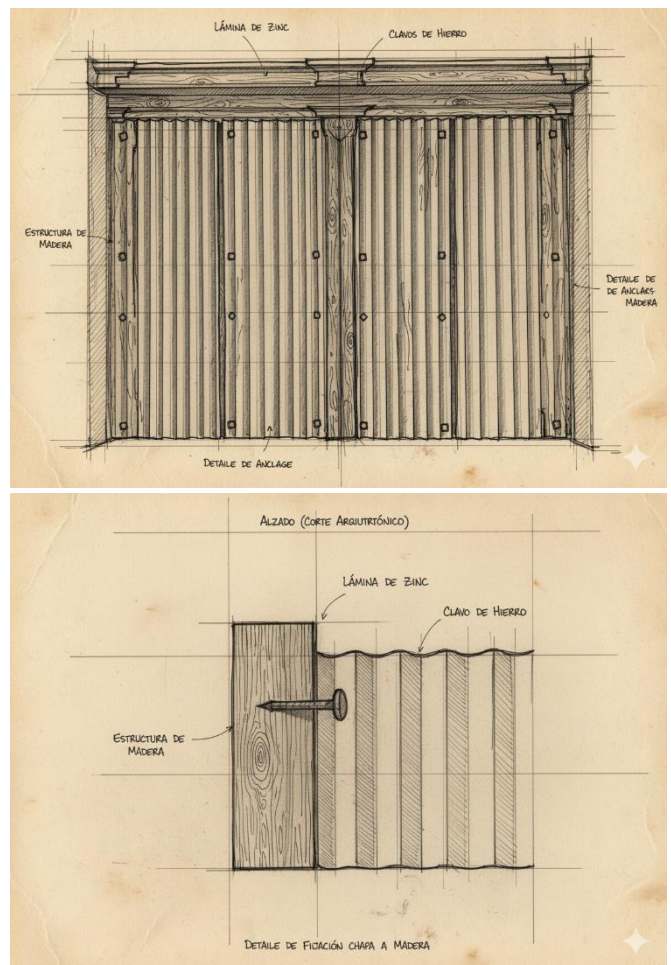


Figura 17. Boceto o ilustración de detalle de fijaciones con clavo de planchas de zinc en las puertas de las iglesias de Santiago Centro, año 2025. Fuente: elaboración propia.

Iglesia de Lora, región del Maule. -



Figura 18 Fotografía de la Iglesia de Lora, Comuna de Licantén Región del Maule, año 2022. Fuente Elaboración propia.

Si bien es cierto que se han analizado ejemplos de intervenciones fallidas en templos y edificios de gran renombre ubicados en capitales regionales, no podemos pasar por alto que también existen intervenciones de mayor gravedad en poblados pequeños, donde las consecuencias pueden ser igualmente devastadoras. Un caso paradigmático es el del poblado de Lora, en la Región del Maule, ubicado entre Licantén e Iloca.

La iglesia de Lora, un edificio de adobe de gran valor religioso para la comunidad local y regional fue objeto de una intervención irresponsable entre los años 2007 y 2010. En lugar de llevar a cabo una restauración y conservación respetuosa con la materialidad original del edificio, se le agregó un volumen decorativo ornamental de hormigón

armado, un atrio que alteró por completo la estructura y estética del templo.

La gravedad de esta decisión radica en la incompatibilidad de materiales y sistemas constructivos. El adobe, material tradicional y flexible, y el hormigón armado, rígido y resistente, presentan comportamientos y frecuencias de vibración muy diferentes ante eventos sísmicos. Esta incompatibilidad se manifestó trágicamente durante el terremoto del 2010.

El atrio de hormigón, al vibrar con una frecuencia distinta a la del adobe, actuó como un ariete sobre la estructura original, generando golpes constantes que dañaron gravemente el edificio. El resultado fue una grieta perimetral que se extendió a 70 cm del nivel del piso (ver figura 19 y un desplazamiento de aproximadamente 5 cm de la construcción de adobe (ver figura 20) y), producto de los golpes de ariete que sufrió durante el evento sísmico.



Figura 19 .Fotografía donde se observa una grieta perimetral a nivel de sobrecimiento, año 2022. Fuente Elaboración propia.

La iglesia de Lora, de gran importancia religiosa para la localidad y la región, ya que alberga la fiesta conocida como la "procesión de los negros" cada segundo domingo de octubre, se encuentra hoy en un estado deplorable debido a esta mala intervención. Las celebraciones religiosas, que antes tenían lugar en el templo, ahora deben realizarse a la intemperie, privando a la comunidad local y a los visitantes de un

espacio de recogimiento y tradición.



Figura 20. Fotografía donde se observa desplazamiento del muro de la Iglesia, año 2022. Fuente Elaboración propia.

Este caso pone de manifiesto la necesidad de adoptar enfoques más rigurosos y profesionales en la conservación del patrimonio arquitectónico, especialmente en zonas rurales y poblados pequeños, donde a menudo se carece de recursos y asesoramiento especializado. Es fundamental que las intervenciones en edificios históricos se basen en estudios exhaustivos de la estructura existente, de sus materiales y de su valor cultural.

La elección de materiales y técnicas de construcción compatibles con la estructura original es esencial para garantizar la durabilidad y seguridad de los edificios restaurados. Asimismo, es crucial que los profesionales a cargo de estas intervenciones cuenten con la capacitación adecuada y la experiencia necesaria para llevar a cabo proyectos de esta envergadura.

La iglesia de Lora es un ejemplo de cómo una intervención mal concebida puede tener consecuencias devastadoras para el patrimonio arquitectónico y cultural de una comunidad. Es necesario aprender de estos errores y adoptar prácticas más responsables y sostenibles en la conservación del patrimonio, para evitar que se repitan casos como este y garantizar que nuestro legado cultural perdure en el tiempo.

Al igual que en los ejemplos anteriores, podemos seguir enumerando una serie de intervenciones y diseños incompatibles con los monumentos originales, ya sea por la geometría, los materiales o, principalmente, porque las soluciones propuestas presentan un grado de intervención altamente invasivo. Estas intervenciones, en muchos casos, no son de carácter reversible o, si lo son, no garantizan una nula afectación a la estructura original.

En este contexto, se hace evidente la necesidad de un cambio de paradigma en el diseño para la intervención de edificios patrimoniales. Es imperativo comenzar a aprovechar los avances científicos y tecnológicos que nos facilitan herramientas digitales para el levantamiento y análisis de datos, así como software especializado para el diseño de soluciones y materiales innovadores como son los polímeros, fibras, resinas etc.

Estas herramientas y software ofrecen un abanico de posibilidades para abordar los proyectos de restauración de manera más precisa y respetuosa con el patrimonio existente. En primer lugar, permiten realizar un levantamiento exhaustivo de datos, tanto geométricos como estructurales, del edificio en cuestión. Mediante el uso de tecnologías como el escaneo láser 3D y la fotogrametría, se pueden obtener modelos digitales detallados y precisos que sirven de base para el análisis y diseño de intervenciones.

El análisis de datos, facilitado por estas mismas herramientas, permite comprender en profundidad el comportamiento estructural del edificio, sus patologías y vulnerabilidades. Esta información es fundamental para tomar decisiones informadas sobre el tipo de intervención necesaria y los materiales más adecuados a utilizar.

En cuanto al diseño de soluciones, el software especializado ofrece la posibilidad de modelar y simular diferentes escenarios de intervención, evaluando su impacto en la estructura existente y en su valor patrimonial. Esto permite optimizar el diseño de refuerzos estructurales, adaptaciones funcionales o cualquier otra modificación necesaria, minimizando el riesgo de dañar elementos originales y garantizando la compatibilidad de los nuevos elementos con el conjunto arquitectónico.

Además de las herramientas digitales, es fundamental que los profesionales a cargo de los proyectos de restauración cuenten con una formación especializada en conservación del patrimonio y un profundo conocimiento de los principios teóricos y metodológicos que rigen esta disciplina. La reversibilidad de las intervenciones, la mínima intervención, la compatibilidad de materiales y técnicas constructivas, así como el respeto por la autenticidad histórica y cultural del edificio, son criterios fundamentales que deben guiar cualquier proyecto de restauración.

En este sentido, es necesario promover la investigación y difusión de nuevas tecnologías y metodologías que permitan mejorar la calidad de las intervenciones en el patrimonio arquitectónico. La colaboración entre universidades, centros de investigación y profesionales del sector es esencial para generar conocimiento y desarrollar soluciones innovadoras que respondan a los desafíos que plantea la conservación.

En el ámbito de la conservación y restauración de edificios patrimoniales, se observa una preocupante tendencia hacia intervenciones y diseños incompatibles con los monumentos originales. Estas incompatibilidades se manifiestan en la geometría, los materiales y, principalmente, en el grado de Invasividad de las soluciones propuestas. A menudo, estas intervenciones carecen de reversibilidad o, incluso cuando se busca esta cualidad, no se garantiza una nula afectación a la estructura original.

Esta problemática pone de manifiesto la necesidad de un cambio de paradigma en el diseño de intervenciones en edificios patrimoniales. Es imperativo aprovechar los avances científicos y tecnológicos que nos brindan herramientas digitales para el levantamiento y análisis de datos, así como software especializado para el diseño de soluciones y materiales innovadores como polímeros, fibras, resinas, etc.

La implementación de estas herramientas y enfoques innovadores no solo ayudará en la precisión y eficacia de las intervenciones, sino que también permitirá reducir el impacto ambiental de los proyectos de restauración. Al optimizar el uso de materiales y minimizar la generación de residuos, se contribuye a la sostenibilidad del patrimonio arquitectónico y a la preservación del medio ambiente.

Es fundamental que los profesionales del sector adopten una actitud proactiva y se mantengan actualizados sobre los últimos avances en tecnologías y metodologías de conservación. La capacitación continua y la participación en proyectos de investigación son esenciales para garantizar que las intervenciones en edificios patrimoniales se realicen con el máximo rigor técnico y respeto por el legado histórico y cultural.

que representan.

La conservación del patrimonio arquitectónico es una responsabilidad compartida que requiere del compromiso de profesionales, instituciones y la sociedad en su conjunto. Al trabajar en conjunto, podemos asegurar que nuestro legado cultural se preserve para las generaciones futuras y siga siendo una fuente de inspiración y conocimiento.

1.1.4 Necesidad de soluciones innovadoras, sostenibles y reversibles

Ante las limitaciones de las técnicas tradicionales y la creciente necesidad de preservar el patrimonio arquitectónico, surge la necesidad de buscar soluciones innovadoras, sostenibles, reversibles y económicas. Para comprender mejor las posibilidades, es crucial analizar las mejores prácticas internacionales en conservación del patrimonio. Observar cómo otros países y organizaciones han implementado técnicas innovadoras con éxito puede proporcionar información valiosa para el contexto chileno.

Las nuevas tendencias en conservación del patrimonio a nivel internacional se inclinan hacia un enfoque más integral e interdisciplinario¹, que incorpora conocimientos de diferentes campos, como la ingeniería, la ciencia de los materiales, la biología y la arquitectura. Esta integración de disciplinas permite un análisis más completo de las problemáticas y la búsqueda de soluciones más efectivas y respetuosas con el patrimonio.

En este contexto, la biomecánica se presenta como una disciplina con gran potencial para la conservación del patrimonio arquitectónico. La biomecánica, que estudia los sistemas biológicos desde una perspectiva mecánica, puede aportar conocimientos y herramientas para el análisis y la intervención de estructuras arquitectónicas. La aplicación de la biomecánica puede ofrecer soluciones menos invasivas, más reversibles y potencialmente más rentables en comparación con los métodos tradicionales. Algunos ejemplos de intervenciones innovadoras que han utilizado la biomecánica u otros enfoques similares son:

- **El uso de materiales “biocompatibles” para la consolidación de muros y bóvedas.** Estos materiales, inspirados en la naturaleza, ofrecen una mayor compatibilidad con los materiales originales y minimizan

1

Australia ICOMOS. (2013). *The Burra charter: The Australia ICOMOS charter for places of cultural significance*. <https://australia.icomos.org/publications/burra-charter-practice-notes/>

Lourenço, P. B., & Roca, P. (Eds.). (2009). *Historical constructions: An interdisciplinary approach*. University of Minho.

Referencia clave para entender **soluciones estructurales innovadoras**, especialmente para el refuerzo sísmico de mampostería histórica mediante modelado avanzado y nuevos materiales.

Cassatella, C., & Peila, D. (Eds.). (2018). *Sustainability and historic buildings*. Springer.

Explora cómo la conservación del patrimonio contribuye a la **sostenibilidad** al preservar la energía incorporada y reducir residuos, aplicando criterios de eco-eficiencia.

Pintér, L., Hardi, P., Martinuzzi, A., & Hall, J. (2012). Bellagio STAMP: Principles for sustainability assessment and measurement. *Ecological Indicators*, 17, 20-28.

Establece principios para una evaluación **holística de la sostenibilidad**, aplicables a intervenciones patrimoniales al considerar factores ambientales, socioculturales y económicos.

el riesgo de reacciones adversas.

- **El diseño de estructuras de refuerzo inspiradas en sistemas biológicos, como los huesos o las plantas.** Estas estructuras, que imitan la eficiencia y resistencia de los sistemas naturales, permiten reforzar las estructuras patrimoniales de forma menos invasiva y más adaptable.
- **El uso de sensores y sistemas de monitoreo para detectar y prevenir daños estructurales.** Estos sistemas permiten un seguimiento constante del estado de las estructuras, lo que facilita la detección temprana de problemas y la implementación de medidas preventivas.

Estudios de caso internacionales, artículos científicos sobre biomecánica aplicada a la arquitectura y publicaciones de congresos sobre conservación del patrimonio muestran los resultados positivos de estas intervenciones innovadoras. Estudios comparativos de técnicas de intervención, análisis de impacto ambiental de las intervenciones y opiniones de expertos confirman las ventajas de las soluciones innovadoras en términos de sostenibilidad, reversibilidad y mínima intervención.

1.1.5 El Potencial de la Biomecánica

La biomecánica, ciencia que estudia la mecánica de los seres vivos, ofrece un enfoque innovador para la conservación del patrimonio arquitectónico. Al comprender cómo las estructuras biológicas, como el cuerpo humano, responden a fuerzas y tensiones, se pueden desarrollar soluciones innovadoras para la estabilización y refuerzo de edificios históricos, como si se trataran de miembros del cuerpo que sufren lesiones.

La biomecánica se centra en el análisis de fuerzas, movimientos y deformaciones en sistemas biológicos. En el cuerpo humano, estudia cómo huesos, músculos, tendones y articulaciones trabajan juntos para permitir el movimiento y soportar cargas. Estos conocimientos se aplican a la arquitectura para comprender el comportamiento estructural de edificios y desarrollar soluciones que mejoren su resistencia y estabilidad.

Una de las principales aplicaciones es el diseño de refuerzos estructurales que imitan la forma y función de los huesos. Los huesos son ligeros y resistentes, adaptándose a las fuerzas que actúan sobre ellos. Al aplicar estos principios al diseño de refuerzos auxiliares para edificios dañados, se crean estructuras más eficientes y resistentes con menor uso de materiales.

Por ejemplo, la forma cilíndrica del fémur con ensanchamiento en los extremos le permite resistir fuerzas de compresión y flexión. Este principio se aplica al diseño de un refuerzo para una columna dañada, creando una estructura más resistente con menor uso de materiales.

La biomecánica también se aplica al diseño de elementos arquitectónicos como arcos y bóvedas. Estudiando cómo los huesos se curvan para resistir fuerzas de compresión, se diseñan arcos y bóvedas más eficientes y estéticos para reforzar estructuras existentes.

Un ejemplo concreto es el uso de férulas para tratar fracturas óseas. Una férula proporciona soporte y estabilidad al hueso fracturado, permitiendo su curación. De manera similar, una estructura auxiliar de presión refuerza un pilar fracturado en un edificio, proporcionando soporte y estabilidad hasta una

reparación permanente.

El proceso de levantamiento de datos para diseñar una férula inmovilizadora es similar al proceso para el refuerzo de un pilar fracturado. En ambos casos, es necesario comprender la geometría y estructura del elemento dañado, así como las fuerzas que actúan sobre él. Esta información se utiliza para diseñar un refuerzo que proporcione el soporte y la estabilidad necesarios para la recuperación.

En resumen, la biomecánica ofrece un enfoque innovador para el diseño de soluciones que ayuden a reforzar estructuras dañadas. Al estudiar las similitudes entre estructuras arquitectónicas y el cuerpo humano, es posible encontrar soluciones de diseño más eficientes, resistentes y estéticas. La biomecánica se centra en el diseño e implementación de estructuras auxiliares que refuerzan la arquitectura dañada, como si fueran órtesis médicas para edificios.

Otro ejemplo es el uso de materiales que imitan las propiedades de los tejidos biológicos, como la piel o los músculos. Estos materiales pueden ser flexibles, resistentes y capaces de adaptarse a los cambios en el entorno. Su aplicación en la arquitectura puede permitir la creación de edificios más dinámicos y adaptables a las necesidades de sus usuarios. Materiales como fibras, polímeros, resinas, etc.

La biomecánica también puede ser útil para el desarrollo de sistemas de monitoreo estructural que imiten el sistema nervioso humano. Estos sistemas podrían detectar pequeñas variaciones en el comportamiento estructural de un edificio y alertar sobre posibles problemas antes de que se produzcan daños mayores.

En resumen, la biomecánica ofrece un nuevo paradigma para la conservación del patrimonio arquitectónico, permitiendo el desarrollo de soluciones innovadoras que sean más eficientes, sostenibles y respetuosas con la integridad de las estructuras históricas.

1.1.6 Hacia un Nuevo Paradigma de Intervención

La conservación del patrimonio arquitectónico se encuentra en un momento de transición hacia un nuevo paradigma que busca integrar los avances tecnológicos, la sostenibilidad y el respeto por la autenticidad de las obras². Este nuevo paradigma se caracteriza por: **Un enfoque holístico:** Considerar todos los aspectos

2

ICOMOS. (1994). *The Nara document on authenticity*. <https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf>

Documento crucial que amplía el concepto de autenticidad, reconociendo la diversidad cultural y sentando las bases para un **paradigma de intervención más inclusivo y basado en valores**.

ICOMOS. (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/structures_e.pdf

Actualiza la Carta de Venecia para intervenciones estructurales, estableciendo el **nuevo paradigma** basado en diagnóstico interdisciplinario, mínima intervención, seguridad y compatibilidad.

Avrami, E., Mason, R., & de la Torre, M. (Eds.). (2000). *Values and heritage conservation: Research report*. The Getty Conservation Institute.

Consolida el enfoque basado en valores (values-based approach) como pilar del **nuevo paradigma**, donde la toma de decisiones se guía por el significado cultural, social e histórico del bien.

Caple, C. (2011). *Preventive conservation in museums*. Routledge.

Aunque enfocado en museos, este texto define los principios de la **conservación preventiva** (monitoreo, mantenimiento, control de riesgos), un pilar del nuevo paradigma que prioriza el cuidado proactivo sobre la intervención reactiva.

relacionados con la conservación del patrimonio, desde el análisis histórico y arquitectónico hasta la selección de materiales y técnicas de intervención.

- **La innovación tecnológica:** Incorporar nuevas tecnologías para el diagnóstico, el monitoreo y la intervención del patrimonio, como sensores, realidad aumentada, impresión 3D y materiales inteligentes.
- **La sostenibilidad:** Priorizar el uso de materiales y procesos de bajo impacto ambiental, promover la eficiencia energética y considerar el ciclo de vida de las intervenciones.
- **La reversibilidad:** Utilizar técnicas que permitan recuperar el estado original de la obra en caso de ser necesario, sin causar daños irreversibles.
- **La mínima intervención:** Intervenir en la estructura de la manera menos agresiva posible, respetando la autenticidad y la integridad del edificio.
- **La adaptabilidad:** Desarrollar soluciones que se puedan ajustar a las características específicas de cada edificio y a las diferentes necesidades de conservación.
- **La integración con el contexto sociocultural:** Considerar el valor social y cultural del patrimonio y promover la participación de la comunidad en su conservación.
- **La difusión y transferencia de conocimiento:** Compartir las experiencias y los conocimientos adquiridos en la conservación del patrimonio para promover la mejora continua de las prácticas de intervención.

Este nuevo paradigma de intervención busca ir más allá de la simple restauración o reparación de los daños, buscando comprender el edificio como un sistema complejo en constante evolución. Se trata de encontrar

un equilibrio entre la conservación del pasado y la adaptación al presente, asegurando la permanencia del patrimonio para las futuras generaciones.

1.2 Hipótesis

La adaptación de conceptos y técnicas de ortesis médicas al campo de la arquitectura, mediante el diseño e implementación de ortesis arquitectónicas, permitirá una intervención más efectiva y respetuosa en la conservación del patrimonio arquitectónico chileno.

Esta hipótesis se basa en la premisa de que las estructuras arquitectónicas, al igual que el cuerpo humano, pueden beneficiarse de la aplicación de dispositivos externos no intrusivos que brinden soporte, corrijan deformaciones o mejoren su funcionalidad sin alterar la estructura que se pretende reforzar

1.2.1 Definición de Órtesis y Prótesis

Para el desarrollo de la presente tesis es necesario tener claridad de dos conceptos en el campo de la asistencia médica, es común confundir los términos **prótesis** y **órtesis**. Aunque ambos son dispositivos externos diseñados para mejorar la calidad de vida, sus funciones son fundamentalmente distintas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece una diferencia clave basada en su propósito.

Prótesis: Reemplazando una Parte Faltante

Una **prótesis** es un dispositivo que **reemplaza total o parcialmente una parte del cuerpo ausente o deficiente**. Su objetivo principal es restaurar la función y la apariencia, permitiendo al usuario llevar una vida más independiente y productiva.

- **Función:** Sustituir una extremidad o segmento corporal.
- **Propósito:** Devolver la capacidad funcional y/o estética.
- **Ejemplos:** Piernas artificiales, brazos biónicos o implantes mamarios.

Órtesis: Soporte para una Estructura Existente

Por otro lado, una **órtesis** es un apoyo externo que se utiliza para **modificar las características estructurales o funcionales del sistema neuromuscular y esquelético**. No reemplaza nada, sino que asiste a una parte del cuerpo que está debilitada, lesionada o funciona de manera incorrecta.

- **Función:** Soportar, alinear, corregir o proteger una parte del cuerpo.
- **Propósito:** Mejorar la función, reducir el dolor o prevenir deformidades.
- **Ejemplos:** Férulas para fracturas, plantillas ortopédicas, rodilleras o corsés para la espalda.

La Diferencia Clave

En resumen, la distinción es simple, **las prótesis reemplazan lo que no está, mientras que las órtesis dan soporte a lo que ya existe**.

1.2.2 Justificación de la Adaptación de Órtesis

La justificación de esta hipótesis se basa en la analogía que existe entre el cuerpo humano y las estructuras arquitectónicas. Ambos sistemas están compuestos por elementos que trabajan en conjunto para soportar cargas y mantener la estabilidad. Así como las ortesis y prótesis se utilizan en medicina para corregir deformidades, estabilizar articulaciones o reemplazar miembros perdidos, en arquitectura podrían utilizarse para reforzar muros, estabilizar bóvedas o sustituir elementos estructurales dañados.

Estudios³ que exploran la transferencia de conocimientos entre el campo médico y la arquitectura han

demostrado la viabilidad de adaptar conceptos y tecnologías de la biomecánica médica a la conservación del patrimonio. La aplicación de ortesis y prótesis en arquitectura permitiría:

- **Minimizar la intervención en el material original:** Las ortesis y prótesis se colocarían de forma externa, evitando la remoción de material original o la introducción de elementos invasivos.
- **Asegurar la reversibilidad de la intervención:** Las ortesis y prótesis podrían ser retiradas en el futuro sin causar daños a la estructura.
- **Garantizar la compatibilidad con los materiales originales:** Se podrían utilizar materiales biocompatibles que no reaccionen con los materiales de la obra.
- **Promover la sostenibilidad:** Se podrían utilizar materiales reciclados o de bajo impacto ambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta de intervención en el patrimonio arquitectónico chileno basada en el concepto de "órtesis arquitectónicas", que permita la conservación y el refuerzo de estructuras históricas de manera sostenible, reversible y mínimamente invasiva.

1.3.2 Objetivos Específicos.

Identificar los tipos de ortesis y prótesis más adecuados para la intervención de diferentes tipos de estructuras y materiales. Se analizarán las características de las ortesis y prótesis utilizadas en medicina y se evaluará su adaptabilidad al campo de la arquitectura.

- Investigar el estado actual del patrimonio arquitectónico en proceso de degradación en Chile, identificando las principales causas de deterioro y las limitaciones de las técnicas actuales de intervención.
- Analizar los principios de la biomecánica y la ergonomía en la arquitectura, y su potencial para el desarrollo de soluciones innovadoras para la conservación del patrimonio.

Para la Colaboración y Transferencia de Conocimientos (Medicina y Arquitectura/Diseño)

Caso concreto y exitoso en Chile donde la medicina y el diseño colaboran, validando la idea de "transferencia de conocimientos y tecnologías". Universidad de Chile. (2019). *Trabajo conjunto de médicos y diseñadores de la FAU permite implantar prótesis craneales impresas en 3D*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. / <https://fau.uchile.cl/noticias/151437/estudiantes-de-diseno-fau-crean-protesis-craneales-en-impresora-3d>. Este artículo es un ejemplo directo de cómo la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU) y la Facultad de Medicina en Chile trabajan juntas, utilizando tecnologías como la impresión 3D para crear prótesis. Prueba la viabilidad de la colaboración interdisciplinaria.

Para la Adaptación del Concepto de "Ortesis" a la Arquitectura

Muestra cómo el concepto de un soporte externo (análogo a una ortesis) ya se utiliza en la práctica de la conservación patrimonial, aunque con otro nombre. ArchDaily. (2020). *Reutilización adaptativa: 4 ejemplos de intervenciones en el patrimonio arquitectónico*. ArchDaily. Recuperado de <https://www.archdaily.cl/cl/931564/reutilizacion-adaptativa-4-ejemplos-de-intervenciones-en-el-patrimonio-arquitectonico>. El artículo describe el uso de "exo esqueletos" y "estructuras independientes" para reforzar la fragilidad de edificios en ruinas. Este es el análogo arquitectónico más claro de una ortesis médica, demostrando que el concepto de soporte externo es viable y ya se aplica en la conservación.

Desarrollar metodologías de diseño e implementación de ortesis y prótesis para la conservación del patrimonio. Se propondrán métodos de análisis estructural, selección de materiales y técnicas de fabricación e instalación.

- Definir los criterios de diseño y selección de materiales para las órtesis arquitectónicas, considerando la sostenibilidad, la reversibilidad y la compatibilidad con los materiales originales.
- Diseñar y modelar prototipos de órtesis arquitectónicas para diferentes elementos estructurales, utilizando herramientas de diseño digital.

Evaluar la efectividad de las intervenciones con ortesis y prótesis en términos de estabilidad estructural, durabilidad y compatibilidad con el patrimonio. Se realizarán pruebas y ensayos para evaluar el comportamiento de las ortesis y prótesis en diferentes condiciones.

- Evaluar la viabilidad técnica, económica, social y ambiental de la propuesta de intervención.
- Difundir los resultados de la investigación y promover la transferencia de conocimiento a la comunidad profesional y al público en general.

1.4 Alcances y limitaciones

1.4.1 Alcances:

Esta investigación se centrará en el estudio de las órtesis arquitectónicas como una alternativa para la conservación del patrimonio arquitectónico chileno. Se analizarán las diferentes tipologías de órtesis, los materiales más adecuados para su fabricación y los criterios de diseño que deben considerarse para asegurar su eficacia y su compatibilidad con los edificios históricos.

La investigación incluirá el diseño y modelado de prototipos de órtesis para diferentes elementos estructurales, como muros, pilares, arcos y bóvedas. Se evaluará la viabilidad técnica de la propuesta mediante simulaciones computacionales y pruebas de laboratorio.

Además, se analizarán casos de estudio de intervenciones en patrimonio con enfoques similares, tanto en Chile como en otros países, para identificar las mejores prácticas y las lecciones aprendidas.

1.4.2 Limitaciones:

La presente investigación acota su campo de estudio y aplicación de las órtesis arquitectónicas exclusivamente a estructuras patrimoniales construidas con sistemas y materiales tradicionales (tales como la albañilería de ladrillo de gran escuadría, la piedra, el adobe y los entramados de madera). **Se excluye expresamente del alcance de esta investigación el análisis de estructuras construidas con materiales modernos, como el hormigón armado o el acero estructural del siglo XX,** debido a las siguientes razones técnico-estructurales y de conservación:

1. **Diferencias en el Comportamiento Mecánico e Inercial:**

Los materiales tradicionales presentan una baja o nula resistencia a la tracción y un comportamiento mecánico no lineal y heterogéneo, funcionando principalmente a compresión y por gravedad. En contraste, el hormigón armado y el acero son materiales dúctiles, continuos y homogéneos diseñados para resistir altos esfuerzos de flexión y tracción. La transferencia de conceptos biomédicos (como la inmovilización o el confinamiento ortésico) responde a la fragilidad y pérdida de cohesión de la mampostería tradicional, no resultando extrapolable a la lógica estructural de los pórticos rígidos modernos.

2. Mecanismos de Degradación y Compatibilidad Físico-Química:

Las patologías del patrimonio tradicional (desplomes, separación de tendeles, ataques xilófagos o descalces) requieren sistemas de soporte externo de baja rigidez relativa que no introduzcan concentraciones de tensión. El hormigón armado presenta rigideces muy elevadas y dinámicas de deterioro distintas (como la carbonatación o la corrosión de armaduras internas), las cuales exigen métodos de rehabilitación química o encamisados estructurales de naturaleza sustancialmente diferente a la acción pasiva, superficial y reversible que caracteriza a la órtesis arquitectónica.

3. Criterios de Reversibilidad e Invasividad Patrimonial:

En las edificaciones históricas de albañilería o tierra, la introducción de consolidaciones invasivas (como inyecciones de cemento o demoliciones parciales) genera daños irreversibles en el tejido original. Las órtesis metálicas propuestas buscan actuar como exoesqueletos desmontables. En estructuras de hormigón o acero, las intervenciones de refuerzo suelen ejecutarse mediante soldaduras, conectores epóxicos o recrecidos del mismo material, donde el principio estricto de reversibilidad no opera de la misma manera ni bajo los mismos marcos éticos de restauración.

La investigación se centrará en el patrimonio arquitectónico construido con materiales tradicionales, como la piedra, el ladrillo y la madera. No se analizarán las estructuras construidas con materiales modernos, como el hormigón armado o el acero.

El diseño y modelado de prototipos de órtesis se limitará a un número reducido de casos de estudio. No se pretende desarrollar un catálogo exhaustivo de soluciones para todos los tipos de edificios y elementos estructurales.

La evaluación de la viabilidad técnica de la propuesta se realizará mediante simulaciones computacionales y pruebas de laboratorio. No se realizarán pruebas a escala real en edificios históricos.

Finalmente, la investigación se centrará en el contexto chileno. No se pretende realizar un análisis comparativo de las diferentes normativas y prácticas de conservación del patrimonio en otros países.

Conclusión del capítulo

En el presente capítulo, el autor expone la vulnerabilidad crítica que aqueja al patrimonio arquitectónico chileno, diagnosticando la "progresiva enfermedad estructural" que amenaza con silenciar su invaluable testimonio. La investigación profundiza en las causas de esta "silenciosa agonía" —desde las cicatrices sísmicas hasta el abandono social— y constata cómo las intervenciones tradicionales, a menudo invasivas e irreversibles, han resultado insuficientes. Ante esta encrucijada, el estudio sostiene la necesidad imperante de encontrar un nuevo paradigma de conservación. Es en este marco que la biomecánica emerge, no como una simple alternativa, sino como la esperanza fundamentada que se propone para tratar

las patologías del legado.

La hipótesis central que sostiene esta investigación es audaz pero lógica: si el patrimonio se comporta como un organismo que sufre, debe ser tratado como tal. En consecuencia, el autor propone la adaptación de la ortesis y la prótesis biomecánica —conceptos probados en la recuperación del cuerpo humano— para crear "sistemas de soporte vital" para las estructuras más frágiles. Tal como se describe, estos no son meros refuerzos, sino soluciones diseñadas para estabilizar, sostener y rehabilitar, respetando la integridad del "paciente". Los objetivos de la tesis, ya definidos, se centran en demostrar la viabilidad de este enfoque, desarrollando una metodología que permita diseñar estas "prótesis" arquitectónicas a la medida de cada monumento herido.

Los capítulos venideros de este trabajo abandonan el diagnóstico para iniciar el tratamiento. Se profundizará en el estudio riguroso de la biomecánica aplicada, analizando casos de estudio que funcionarán como "pacientes clínicos". El fin último de la investigación es desarrollar y evaluar un "arsenal terapéutico" de intervenciones que no solo detengan el deterioro, sino que ofrezcan un camino para la revitalización y supervivencia a largo plazo de un legado que la nación no puede permitirse perder.

1.5 Metodología de la Investigación

1.5.1 Enfoque y Tipo de Investigación

La presente investigación adopta un enfoque **mixto (cuali-cuantitativo) de carácter aplicado y diseño experimental-proyectual**, enmarcado en el paradigma de la conservación científica del patrimonio arquitectónico. El trabajo se fundamenta en la **transferencia analógica y tecnológica desde la medicina ortésica hacia la ingeniería y arquitectura de conservación**, estableciendo un paralelismo sistemático entre el diagnóstico clínico, diseño de dispositivos biomecánicos, colocación en el paciente y monitoreo funcional.

La metodología se estructura en un ciclo iterativo de **cuatro fases correlativas**, que articulan el levantamiento crítico del daño, la simulación computacional avanzada, el diseño y fabricación de sistemas modulares de soporte externo, y su posterior validación en casos de aplicación.

1.5.2 Fases del Proceso Metodológico



Detalle de las Fases Metodológicas

Fase 1: Levantamiento Crítico, Captura Digital y Diagnóstico Patológico (*In Situ*)

Levantamiento Geométrico de Alta Precisión: Captura del estado real de los inmuebles mediante vuelos fotogramétricos no tripulados (drones/UAV) apoyados por puntos de control terrestre (GCP) georreferenciados y escaneo láser 3D. Este proceso genera nubes de puntos densas a partir de las cuales

se construyen modelos tridimensionales fidedignos ("gemelos digitales") que registran deformaciones geométricas, pérdidas de plomo y desaplomes milimétricos.

Catastro Crítico de Patologías: Inspección visual y registro sistemático de lesiones mecánicas (grietas pasantes, fallas por corte, separación de juntas y pérdida de sección), identificando las causas desencadenantes (solicitación sísmica, degradación ambiental o intervenciones previas incompatibles).

Caracterización Constructiva: Levantamiento del sistema murario, aparejos y discontinuidades materiales propias de la albañilería tradicional o adobe.

Fase 2: Modelación Numérica y Análisis por Elementos Finitos (FEA)

Generación del Modelo Numérico: A partir de la geometría discretizada del gemelo digital, se desarrollan mallas volumétricas tridimensionales en el software de cálculo estructural *Abaqus*.

Simulación Mecánica y Sísmica: Se introducen las propiedades mecánicas de los materiales históricos (resistencia a compresión, módulo de elasticidad, densidad y comportamiento inelástico/frágil). Se ejecutan análisis de esfuerzos por peso propio (efectos de segundo orden P-Delta) y análisis estáticos no lineales (*pushover*) para simular la respuesta ante aceleraciones sísmicas.

Mapeo de Esfuerzos Críticos: Se evalúa la distribución de tensiones (criterio de Von Mises y tensiones principales) para identificar con exactitud los puntos de concentración de carga y los mecanismos probables de colapso en la estructura sin refuerzo.

Fase 3: Diseño Conceptual, Optimización Biomimética y Desarrollo Técnico

Criterios de Diseño Ortésico: Proyección de sistemas auxiliares fundamentados en los principios de *mínima intervención*, *reversibilidad total*, *compatibilidad física* y *legibilidad formal*. Se implementan conceptos biomédicos adaptados: sistemas de confinamiento perimetral, principio de los tres puntos de apoyo para control de flexión y ensamblajes modulares en seco tipo *mecano*.

Interfaces Suaves y Fijación sin Anclajes Destructivos: Diseño de elementos de contacto (neoprenos, morteros de cal de sacrificio o calces gravitacionales) para evitar concentraciones de tensión y corrosión galvánica entre el metal y el sustrato patrimonial.

Simulación del Conjunto Estructura-Órtesis: Reevaluación en *Abaqus* incorporando el modelo tridimensional de la órtesis metálica para validar cuantitativamente la redistribución de esfuerzos, la reducción de tensiones críticas y la restitución del recorrido de cargas.

Desarrollo de Planimetría y Manual de Montaje: Elaboración de planos de despiece, especificaciones técnicas de perfiles metálicos y protocolos de instalación y desinstalación segura.

Fase 4: Evaluación Experimental, Validación en Casos de Aplicación y Monitoreo

Ensayos Experimentales de Laboratorio: Caracterización mecánica de los componentes, perfiles y uniones

de las órtesis según normativas estandarizadas (ASTM/ISO) para determinar capacidades a tracción, compresión y flexión.

Validación en Casos de Aplicación: Implementación controlada de prototipos a escala real en estructuras patrimoniales en riesgo (e.g., pilar colapsado de la Iglesia de San Francisco de San Fernando y análisis en Chimeneas de Labrar).

Protocolo de Monitoreo Continuo: Seguimiento periódico del comportamiento mecánico del conjunto mediante instrumentación no invasiva (testigos de yeso/vidrio, niveles láser, extensómetros y registro fotogramétrico comparativo) para verificar la estabilidad de la intervención a lo largo del tiempo

1.5.3 Matriz Metodológica de la Investigación

Fase	Objetivo Operativo	Técnicas / Herramientas	Fuentes / Datos de Entrada	Resultado / Entregable
1. Diagnóstico y Levantamiento	Cuantificar la geometría deformada y catalogar patologías.	Fotogrametría UAV, GCP topográficos, escáner 3D, inspección visual.	Trabajo de campo <i>in situ</i> , registros históricos y catastros CMN.	Nube de puntos 3D, gemelo digital y mapa de patologías.
2. Simulación Numérica	Identificar puntos de falla y validar estados tensionales.	Método de Elementos Finitos (FEA) en software <i>Abaqus</i> .	Geometría 3D real y propiedades físico-mecánicas de materiales.	Mapeo de tensiones de Von Mises y curvas de capacidad sísmica.
3. Diseño de la Órtesis	Proyectar soluciones auxiliares reversibles y no invasivas.	Modelado CAD 3D paramétrico, diseño modular tipo <i>mecano</i> .	Resultados FEA, principios de medicina ortésica y cartas de restauración.	Planos de taller, detalles de interfaces suaves y manual de montaje.
4. Validación y Monitoreo	Verificar la eficacia	Ensayos de laboratorio	Prototipos a escala real	Registros de monitoreo

Fase	Objetivo Operativo	Técnicas / Herramientas	Fuentes / Datos de Entrada	Resultado / Entregable
	estructural y la reversibilidad del sistema.	(ASTM/ISO), pruebas de carga y monitoreo láser.	instalados en estructuras dañadas.	temporal e informe de validación técnica.

Capítulo II: Marco Teórico

Este capítulo presenta el marco teórico que sustenta la investigación sobre la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Se abordan conceptos fundamentales sobre patrimonio arquitectónico, incluyendo el patrimonio intangible, biomecánica y ergonomía en la arquitectura, sostenibilidad en la arquitectura, el estado del arte en la conservación del patrimonio y la analogía entre el cuerpo humano y la arquitectura propuesta por Leonardo da Vinci en "El Hombre de Vitruvio" (Leonardo da Vinci, año 1490). Cada uno de estos puntos se desarrolla en profundidad, con el objetivo de proporcionar una base sólida para la comprensión de la propuesta de ortesis arquitectónicas ⁴.

4

Consejo de Monumentos Nacionales. (1970). Ley 17.288 de Monumentos Nacionales y sus reglamentos. Gobierno de Chile. *Es el pilar legal indispensable que define y rige la protección del patrimonio en Chile.*

González, M. I. (Ed.). (2012). Patrimonio y desarrollo. Aportes y perspectivas para la construcción de un Chile diverso y sostenible. Ediciones del Consejo de Monumentos Nacionales. *Ofrece una visión integral de los desafíos y oportunidades del patrimonio en el contexto chileno contemporáneo.*

Vesely, D. (2004). Architecture in the Age of Divided Representation: The Question of Creativity in the Shadow of Production. MIT Press. *Este libro aborda la relación fenomenológica entre el cuerpo y el espacio arquitectónico, ofreciendo un marco teórico profundo para la ergonomía y la experiencia humana en la arquitectura.*

Wittkower, R. (1998). Architectural Principles in the Age of Humanism. Academy Editions. *analiza en profundidad la influencia del humanismo renacentista, incluyendo "El Hombre de Vitruvio", en la teoría arquitectónica, estableciendo la base de la analogía entre las proporciones del cuerpo humano y el edificio.*

Brand, S. (1994). How Buildings Learn: What Happens After They're Built. Viking. *Ofrece una perspectiva crucial sobre el ciclo de vida de los edificios, argumentando a favor de la adaptabilidad y la evolución, conceptos clave para una sostenibilidad a largo plazo en el patrimonio.*

Avrami, E., & Mason, R. (Eds.). (2019). Values in Heritage Management: Emerging Approaches and Research Directions. Getty Conservation Institute. *: Aborda la sostenibilidad desde la gestión de los valores culturales, argumentando que la conservación es sostenible solo si los valores asociados al patrimonio son comprendidos y mantenidos.*

Croci, G. (2000). The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. WIT Press. *: Describe métodos de diagnóstico y técnicas de intervención estructural, proporcionando la base ingenieril para conceptualizar las "ortesis arquitectónicas".*

Feireiss, K., & Burlon, L. (Eds.). (2015). Lina Bo Bardi 100: Brazil's Alternative Path to Modernism. Hatje Cantz. *: El trabajo de Lina Bo Bardi, especialmente su intervención en el Museo de Arte de São Paulo (MASP), es un caso de estudio paradigmático sobre cómo una nueva estructura puede dialogar con una preexistente, un concepto similar a una prótesis o exoesqueleto.*

Ochsendorf, J. (2010). Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile. Princeton Architectural Press. *: Un ejemplo de cómo el estudio de técnicas históricas (en este caso, las bóvedas tabicadas) puede inspirar soluciones estructurales innovadoras, eficientes y de bajo impacto, alineadas con la*

2.1 Patrimonio Arquitectónico

La legislación chilena, específicamente la Ley N°17.288 sobre Monumentos Nacionales (1970), define el patrimonio arquitectónico como aquellos bienes inmuebles que, por su valor histórico, artístico, científico o arqueológico, son declarados Monumentos Nacionales. Esta definición se centra en la importancia cultural e histórica de las edificaciones, así como en su valor como testimonio del pasado.

Por otro lado, la literatura especializada ofrece una visión más amplia del patrimonio arquitectónico, reconociendo la diversidad de valores que pueden atribuirse a las edificaciones. Como por ejemplo el historiador del arte Alois Riegl, en su obra fundacional “El Culto Moderno a los Monumentos” (1987), fue pionero al proponer que los bienes patrimoniales poseen múltiples valores, como el valor histórico, el valor artístico y el valor de antigüedad. Este enfoque permite justificar la conservación no solo de grandes obras maestras, sino también de conjuntos urbanos y arquitecturas vernáculas que, en su totalidad, reflejan la identidad de un lugar. Al comparar ambas definiciones, se observa que la legislación chilena se centra en la protección legal de los bienes inmuebles con valor patrimonial, mientras que la literatura especializada amplía el concepto para incluir aspectos sociales, culturales y ambientales. Sin embargo, ambas coinciden en la importancia de preservar el patrimonio arquitectónico como testimonio del pasado y como elemento fundamental de la identidad cultural o el caso de La socióloga **Laurajane Smith**, en su influyente obra *Uses of Heritage* (2006), argumenta que el patrimonio no es una cualidad inherente de los edificios, sino el resultado de una práctica social donde distintos grupos negocian y atribuyen significados. Esta perspectiva es clave para incluir conjuntos urbanos, paisajes culturales y obras de infraestructura, ya que reconoce que su valor emana directamente del **contexto social y cultural** que les da sentido, más allá de una simple validación de expertos

2.1.1 Problemática de la Conservación del Patrimonio en Chile

La conservación del patrimonio arquitectónico en Chile enfrenta diversos desafíos, relacionados con su contexto histórico, social y económico. A lo largo de su historia, Chile ha experimentado diversos periodos de desarrollo arquitectónico, influenciados por las culturas precolombinas, la colonización española y las corrientes europeas del siglo XIX y XX. Esta riqueza patrimonial se ve amenazada por factores como el deterioro natural, la falta de mantenimiento, la presión inmobiliaria y los desastres naturales, como los terremotos que han afectado al país a lo largo de su historia.

En Chile, la amenaza sísmica es particularmente relevante debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico. Los terremotos han causado daños significativos al patrimonio arquitectónico a lo largo de la historia, y la vulnerabilidad de las estructuras históricas a los movimientos telúricos representa un desafío constante para la conservación. La necesidad de desarrollar estrategias de conservación que consideren el riesgo sísmico y la protección de las estructuras ante eventos futuros es crucial para la preservación del patrimonio.

En el ámbito social, la valoración del patrimonio arquitectónico no siempre se encuentra arraigada en la

sociedad chilena. La falta de conciencia sobre su importancia, la escasa participación ciudadana en los procesos de conservación y la priorización de otros intereses, como el desarrollo económico, dificultan la protección efectiva del patrimonio. Es fundamental fomentar la participación de las comunidades en la identificación, protección y gestión del patrimonio, reconociendo su valor social y cultural. La percepción del patrimonio varía entre diferentes grupos sociales, y es importante considerar estas perspectivas en el desarrollo de estrategias de conservación que sean inclusivas y respondan a las necesidades de la comunidad.

Desde el punto de vista económico, la conservación del patrimonio requiere de una inversión significativa para la restauración, el mantenimiento y la gestión de los bienes patrimoniales. La falta de recursos, la dificultad para acceder a financiamiento y la limitada rentabilidad económica de algunos inmuebles históricos son obstáculos que dificultan la conservación. Sin embargo, es importante considerar también los beneficios económicos que puede generar la conservación del patrimonio. El turismo cultural, por ejemplo, puede ser una fuente importante de ingresos para las comunidades locales, generando empleo y dinamizando la economía. La conservación del patrimonio también puede contribuir a la revalorización de zonas urbanas, atrayendo inversión y mejorando la calidad de vida de los habitantes.

2.1.2 Ley N°17.288 sobre Monumentos Nacionales

La Ley N°17.288, promulgada en 1970 ⁵, constituye el principal instrumento legal para la protección del patrimonio cultural en Chile. Esta ley establece las categorías de Monumentos Nacionales (Monumentos Históricos, Zonas Típicas, Santuarios de la Naturaleza), define los criterios para su declaración y establece las medidas de protección y las sanciones por incumplimiento.

La ley se estructura en torno a los siguientes objetivos:

Identificar y declarar los bienes culturales que constituyen patrimonio nacional.

Proteger y conservar los Monumentos Nacionales.

Promover la investigación, difusión y puesta en valor del patrimonio cultural.

La aplicación de la ley en la conservación del patrimonio implica un proceso que comienza con la solicitud de declaración de un bien como Monumento Nacional, la cual es evaluada por el Consejo de Monumentos Nacionales. Una vez declarado, el Monumento Nacional queda bajo la protección de la ley, lo que implica restricciones en su intervención y la obligación de su propietario de conservarlo.

Si bien la Ley N°17.288 ha sido fundamental para la protección del patrimonio arquitectónico en Chile, permitiendo la conservación de numerosos edificios, conjuntos urbanos y sitios arqueológicos, también

⁵

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28892&idVersion=Diferido>.

LEY N° 17.288 LEGISLA SOBRE MONUMENTOS NACIONALES; MODIFICA LAS LEYES 16.617 Y 16.719; DEROGA EL DECRETO LEY 651, DE 17 DE OCTUBRE DE 1925

presenta algunas debilidades. Entre las críticas que se han formulado a la ley se encuentran la falta de recursos para su aplicación efectiva, la complejidad de los procesos burocráticos, la falta de participación ciudadana en la toma de decisiones y la necesidad de actualizar la normativa para adaptarla a las nuevas realidades del país, como el cambio climático y la presión del desarrollo urbano. La ley también ha sido criticada por su enfoque centralizado en la toma de decisiones, lo que puede dificultar la gestión del patrimonio a nivel local. Se ha planteado la necesidad de descentralizar la gestión del patrimonio, otorgando mayor autonomía a las regiones y municipios en la protección y conservación de sus bienes culturales.

2.2 El Hombre de Vitrubio como Referente

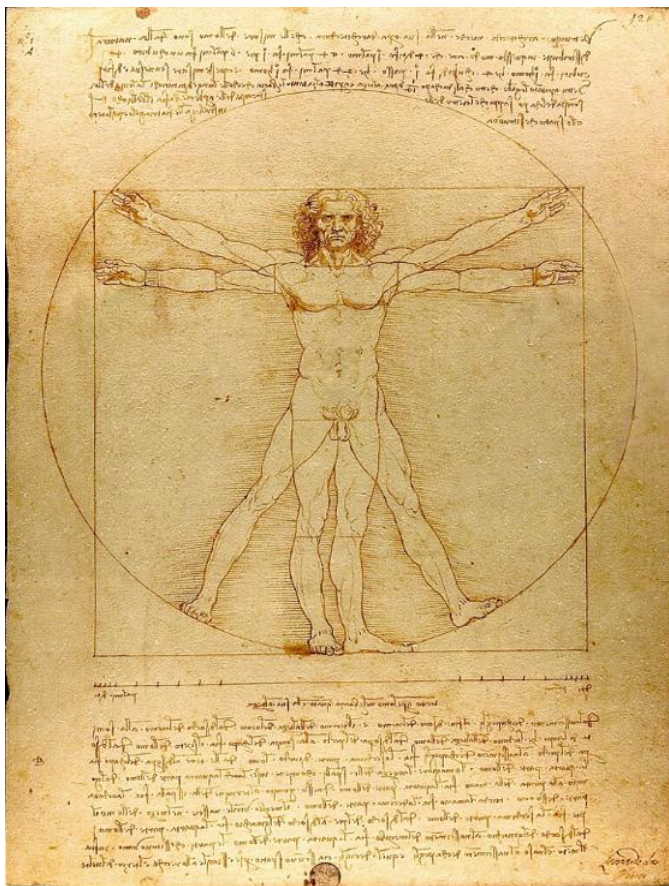


Figura 21 **Hombre de Vitrubio**, creada por Leonardo da Vinci alrededor del año 1490. Fuente: Pinterest. -

La idea de que la arquitectura y el cuerpo humano comparten principios fundamentales no es nueva. Su máxima expresión se encuentra en "El Hombre de Vitrubio", popularizado por el dibujo de Leonardo da Vinci. Sin embargo, como analizó el historiador Rudolf Wittkower en su obra "Los Principios de la Arquitectura en la Edad del Humanismo", este vínculo es mucho más profundo que una simple correspondencia de formas.

Para Wittkower, el Hombre de Vitruvio representa la creencia renacentista de que el cuerpo humano es un microcosmos que refleja la armonía matemática del universo. Creado a imagen de Dios, sus proporciones no eran arbitrarias, sino la manifestación de un orden divino y universal.

Los arquitectos de la época, como Alberti y Palladio, adoptaron esta idea como principio fundamental. No buscaban construir edificios que parecieran personas, sino aplicar las proporciones y relaciones numéricas inherentes al cuerpo humano para diseñar sus obras. El uso

de la simetría y de formas geométricas puras como el círculo y el cuadrado —que enmarcan perfectamente la figura humana en el dibujo de Leonardo da Vinci— era el método para traducir esa armonía divina en la planta y el alzado de un edificio.

Esta analogía histórica proporciona una poderosa base teórica para la presente investigación. Si la arquitectura, en su concepción más noble, fue diseñada reflejando la perfección del cuerpo humano, es

lógico y coherente recurrir a las ciencias que estudian dicho cuerpo para "sanarla". Así, la biomecánica emerge como la disciplina idónea para diagnosticar y tratar las "lesiones" de nuestro patrimonio arquitectónico, permitiendo diseñar "ortesis" que devuelvan la estabilidad y funcionalidad a estas estructuras envejecidas, respetando su armonía original.

2.2.1 Descripción de la Obra y su Contexto Histórico

"El Hombre de Vitrubio" representa a un hombre desnudo en dos posiciones superpuestas, con los brazos y las piernas extendidos, inscrito en un círculo y un cuadrado. El dibujo está acompañado de notas anatómicas que describen las proporciones del cuerpo humano.

La obra se enmarca en el Renacimiento italiano, un periodo de gran interés por el arte clásico, la anatomía humana y la búsqueda de la perfección. Leonardo da Vinci, como hombre del Renacimiento, se interesó por diversas disciplinas, como la pintura, la escultura, la arquitectura, la ingeniería y la anatomía. Su afán por comprender el mundo que lo rodeaba lo llevó a estudiar el cuerpo humano en detalle, buscando las leyes que rigen sus proporciones y su movimiento.

2.2.2 Analogía entre el Cuerpo Humano y la Arquitectura

En "El Hombre de Vitrubio", Leonardo da Vinci establece una analogía entre el cuerpo humano y la arquitectura, sugiriendo que las proporciones ideales del cuerpo humano se pueden aplicar al diseño de edificios. Esta analogía se basa en la idea de que la armonía y el equilibrio, presentes en el cuerpo humano, también se pueden encontrar en la arquitectura clásica.

Da Vinci utilizó la geometría para representar la armonía y el equilibrio en el cuerpo humano y en la arquitectura. El círculo, que representa la perfección y la divinidad, enmarca al hombre con los brazos y las piernas extendidas, mientras que el cuadrado, que representa la estabilidad y la tierra, lo enmarca con los brazos en cruz y las piernas juntas. La combinación de ambas figuras geométricas simboliza la unión entre lo divino y lo terrenal, entre el espíritu y la materia.

2.2.3 Relación con la Propuesta de Ortesis Arquitectónicas

La analogía entre el cuerpo humano y la arquitectura propuesta por Da Vinci en "El Hombre de Vitrubio" puede ser aplicada a la propuesta de ortesis arquitectónicas. Al igual que las ortesis médicas ayudan al cuerpo humano a recuperar su equilibrio y funcionalidad, las ortesis arquitectónicas pueden contribuir a la "salud" y la estabilidad de los edificios.

Las ortesis arquitectónicas, como dispositivos diseñados para la estabilización y recuperación de estructuras, pueden ser concebidas como "prótesis" que complementan o sustituyen elementos dañados, o como "exoesqueletos" que proporcionan soporte a la estructura.

La idea de Da Vinci de la armonía y el equilibrio en el cuerpo humano se puede aplicar a la conservación del patrimonio arquitectónico, buscando soluciones que respeten las proporciones originales del edificio y su integración con el entorno.

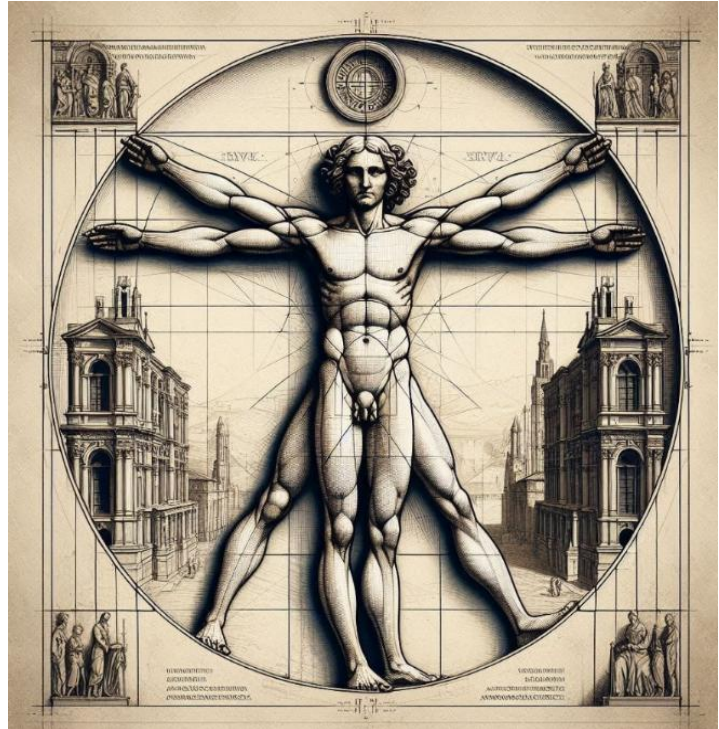


Figura 22 **Hombre de Vitrubio**, Adaptación asociada a arquitectura / Fuente: Elaboración Propia creada con IA.

La utilización de las proporciones del Hombre de Vitrubio como inspiración para el diseño de ortesis arquitectónicas podría ser una vía de exploración interesante. La búsqueda de la armonía y el equilibrio en la intervención en el patrimonio podría contribuir a la creación de soluciones más efectivas y respetuosas con el valor histórico de los edificios.

Esta analogía también plantea interrogantes filosóficas sobre la relación entre la arquitectura y el ser humano. Si consideramos los edificios como organismos vivos, ¿cómo debemos intervenir en ellos? ¿Cuál es el límite entre la conservación y la transformación? ¿Cómo podemos asegurar la "salud" a largo plazo del patrimonio arquitectónico? Estas preguntas invitan a una reflexión profunda sobre el papel de la arquitectura en la vida humana y la responsabilidad que tenemos en su conservación.

2.3 Biomecánica y Ergonomía en la Arquitectura

La biomecánica, como disciplina que estudia las fuerzas y los movimientos en los sistemas biológicos, ofrece un enfoque innovador para la conservación del patrimonio arquitectónico. Al comprender las fuerzas que actúan sobre las estructuras y los mecanismos de deterioro, se pueden desarrollar soluciones más efectivas para su estabilización y conservación.

La **ergonomía biomecánica**, en el diseño de dispositivos de asistencia, estudia la interacción físico-geométrica en la interfaz entre el artefacto exógeno y el cuerpo receptor, garantizando una adecuada disipación de presiones y compatibilidad cinemática (Nordin & Frankel, 2012). Trasladada a la conservación arquitectónica, la ergonomía no se reduce al confort del usuario, sino que se define como el **ajuste anatómico y la compatibilidad de contacto entre la órtesis estructural y la morfología irregular del edificio patrimonial**, asegurando que la transmisión de esfuerzos no genere daños mecánicos locales ni altere irreversiblemente el uso del espacio (Vesely, 2004; Wigley, 1991)."

2.3.1 Ortesis y Prótesis en la Arquitectura

La transferencia conceptual de los términos "ortesis" y "prótesis" desde el campo de la medicina al de la arquitectura no es una práctica extendida ni formalizada. Sin embargo, al analizar la historia de la intervención en estructuras y edificios, es posible identificar numerosos ejemplos que, por su función y principios de diseño, pueden ser interpretados como análogos arquitectónicos de estos dispositivos médicos. Estas intervenciones, al igual que sus contrapartes biológicas, buscan restaurar la funcionalidad, asegurar la estabilidad o reemplazar elementos dañados de un "cuerpo" arquitectónico que ha sufrido un trauma, ya sea por el paso del tiempo, por desastres naturales o por la acción humana.

Una **ortesis arquitectónica**, en este sentido, sería un dispositivo externo, a menudo visible, que se añade a una estructura existente para soportarla, inmovilizarla, corregir deformaciones o asistir su función portante sin reemplazar sus partes fundamentales. Suelen ser soluciones reversibles o, al menos, distinguibles del original, siguiendo los principios de la restauración moderna que valoran la autenticidad y la legibilidad de la intervención.

Al explorar los precedentes históricos de soporte externo en la arquitectura, resulta indispensable establecer precisiones teóricas para no desvirtuar la naturaleza de los sistemas estructurales. Tradicionalmente, se ha tendido a comparar el **arbotante gótico** con un puntal o férula exterior debido a su función puramente mecánica de canalizar los empujes laterales de las bóvedas de crucería hacia los contrafuertes exteriores (Viollet-le-Duc, 1854; Mark, 1982). No obstante, clasificar al arbotante gótico maduro como una "órtesis" resulta conceptualmente impreciso y arriesga caer en el juicio clasicista que catalogó históricamente al gótico como una arquitectura desarticulada que requería "muletas" para sostenerse. En la catedral gótica formalizada, el arbotante es un órgano constitutivo, connatural e integrado al aparejo, a la masa y a la estética del propio cuerpo arquitectónico.

La analogía con la órtesis arquitectónica —entendida como un dispositivo auxiliar exógeno que se añade para responder a una patología sobreviniente— solo es rigurosa cuando estos elementos han sido incorporados **como refuerzos correctivos sobre una estructura preexistente en crisis**:

La Basílica de Vézelay (Francia): En su nave central románica del siglo XII, el empuje continuo de las bóvedas de arista provocó deformaciones y el desplome progresivo de los muros hacia el exterior. La respuesta técnica consistió en la adición posterior de arbotantes exteriores primitivos que funcionaron como una auténtica **órtesis de descarga y alineación**, frenando la apertura de los muros sin demoler la fábrica original.

La Catedral de Saint-Pierre de Beauvais (Francia): Tras el colapso de las bóvedas del coro en 1284, producto de una altura y esbeltez llevadas al límite físico de la piedra, la intervención no solo implicó reconstruir el tramo colapsado, sino implementar una compleja **órtesis de contención global**. Se duplicaron los apoyos mediante la intercalación de nuevas columnas intermedias, se dispusieron tirantes metálicos entre los arcos y se erigió una densa red de arbotantes y contrafuertes exteriores sobredimensionados cuyo único propósito fue estabilizar el coro y evitar que los pilares supervivientes sufrieran pandeo o colapso por flexión lateral.

En ambos casos históricos, el elemento exterior no nació como una decisión estilística integrada, sino como una **asistencia ortopédica externa y obligada** frente a un fallo del equilibrio original, anticipando el principio fundamental de las órtesis arquitectónicas contemporáneas: estabilizar el cuerpo edificado en riesgo sin reemplazar su materia histórica⁶.

En la conservación del patrimonio, un ejemplo más contemporáneo y literal de ortesis lo constituyen los **contrafuertes y estructuras de arriostramiento** que se instalan en muros antiguos o fachadas inestables. Estos pueden ser de diversos materiales, desde la tradicional albañilería hasta modernos sistemas de acero o materiales compuestos. Un caso notable es el de la Torre de Pisa en Italia. Durante las obras de estabilización realizadas a finales del siglo XX, se utilizaron contrapesos de plomo en el lado norte y, posteriormente, un sistema de cables de acero anclados al suelo para "enderezar" sutilmente la torre y evitar su colapso. Estos cables funcionaron como una ortesis temporal de gran escala, aplicando una fuerza controlada para corregir una deformación patológica.

Otro ejemplo son los **zunchos o anillos metálicos** que se colocan alrededor de cúpulas o torres para contrarrestar los empujes hacia el exterior que tienden a abrirlas. La cúpula de la Catedral de Florencia, diseñada por Brunelleschi, incorpora cadenas de hierro internas que actúan como un sistema de zunchado, pero en muchos otros casos, como en la reparación de cúpulas dañadas por terremotos, estos anillos metálicos se aplican externamente, quedando a la vista como un testimonio de la intervención. Funcionan de manera análoga a un corsé ortopédico que contiene y estabiliza la columna vertebral.

Los **exoesqueletos estructurales** son quizás el ejemplo más claro de ortesis arquitectónica. Se trata de

6

Referencias para la Función del Arbotante

Mark, R. (1982). *Experiments in Gothic Structure*. The MIT Press./ **Análisis:** Este libro es una referencia fundamental. Mark demuestra empíricamente que los arbotantes no son meros elementos decorativos, sino componentes cruciales de un sistema esquelético. Sus experimentos mostraron cómo los arbotantes reciben el **empuje lateral** de las bóvedas de crucería y lo canalizan de manera segura hacia los contrafuertes exteriores y, finalmente, al suelo. Su trabajo valida científicamente la idea de que la función del arbotante es **puramente mecánica** y esencial para la estabilidad y la altura del edificio.

Viollet-le-Duc, E.-E. (1854-1868). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* (Vol. 1, Artículo "Arc-Boutant"). B. Bance./ Viollet-le-Duc fue uno de los primeros en analizar la arquitectura gótica como un **sistema estructural racional y optimizado**. En su influyente diccionario, describe el arbotante (Arc-Boutant) precisamente como se menciona en el párrafo: un brazo externo diseñado para neutralizar los empujes de las bóvedas, liberando así los muros de su función de carga y permitiendo la apertura de grandes ventanales. Su análisis, aunque a veces criticado por su excesivo racionalismo, es la base de la interpretación del gótico como una "estructura esquelética".

Para una fuente más moderna y accesible que explique visualmente este principio, los manuales de historia de la construcción o de análisis gráfico son ideales.

Ching, F. D. K. (2014). *Architecture: Form, Space, and Order* (4th ed.). John Wiley & Sons. **Análisis:** Aunque es un libro más general, los trabajos de Francis D.K. Ching son célebres por su claridad gráfica. En sus análisis de los sistemas estructurales históricos, ilustra de manera muy efectiva cómo el sistema de **bóveda de crucería + arbotante + contrafuerte** funciona como una unidad para dirigir las cargas al suelo. Sus diagramas son perfectos para visualizar la "expresión directa de las fuerzas" que menciona el párrafo.

estructuras portantes externas que se adosan a un edificio existente para reforzarlo, a menudo en el contexto de una rehabilitación o una adecuación a nuevas normativas sísmicas. Un caso emblemático es el del Centro Pompidou en París, diseñado por Renzo Piano y Richard Rogers. Aunque en este caso el exoesqueleto es parte del diseño original, su lógica funcional es la de una ortesis: la estructura portante y las instalaciones se llevan al exterior, liberando el espacio interior y exhibiendo el "aparato" técnico del edificio. En el ámbito de la rehabilitación, se han desarrollado sistemas de refuerzo sísmico basados en marcos de acero o disipadores de energía que se instalan en las fachadas de los edificios, actuando como un sistema de protección externo que absorbe y disipa la energía de un terremoto, de forma similar a como una rodillera ortopédica protege la articulación de impactos.

En el campo médico y biomecánico, una **prótesis** es un artefacto manufacturado con materiales artificiales o inertes (metales, polímeros, resinas) diseñado para sustituir un miembro, tejido u órgano ausente. Su característica definitoria es que **reemplaza una función mecánica, estática o cosmética específica mediante una materialidad diferente**, careciendo por completo de la vitalidad biológica o la capacidad de regeneración del tejido orgánico al que releva.

Trasladar con rigor este concepto a la arquitectura exige evitar catalogar cualquier sustitución o reposición tradicional como un acto protésico. Por ejemplo, **el reemplazo directo de un sillar erosionado por una nueva pieza de piedra de cantería no constituye una prótesis arquitectónica**, sino una operación convencional de *sustitución física o reintegración material*, en tanto busca recomponer la masa y continuidad de la misma fábrica sin alterar la naturaleza del sistema constructivo.

Por el contrario, la **prótesis arquitectónica** se define legítimamente cuando se incorpora un **elemento de materialidad exógena o contemporánea para suplir de forma localizada una capacidad estructural perdida**, configurando un injerto funcionalmente activo pero materialmente diferenciado:

Prótesis en estructuras de madera: El saneamiento de cabezas de vigas podridas o fustes atacados por insectos xilófagos, donde la sección degradada es sustituida mediante prótesis de resina epoxi armada con varillas de fibra de vidrio, o mediante empalmes técnicos con perfiles metálicos ocultos. La resina o el metal asumen la transmisión de esfuerzos de flexión y compresión como un "órgano artificial" dentro de la madera histórica.

Injertos de materiales compuestos en fábricas pétreas: La colocación de barras o platinas de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) o conectores de acero inoxidable en el núcleo de sillares fisurados o dinteles fracturados. Estos elementos actúan como tendones artificiales internos que asumen las tracciones que la piedra por sí sola ya no es capaz de resistir.

Reintegraciones volumétricas diferenciadas: Casos como la restauración del *Neues Museum* de Berlín por David Chipperfield, donde los elementos destruidos no fueron reconstruidos miméticamente en piedra original, sino completados mediante volúmenes de hormigón blanco prefabricado. Estas piezas funcionan como prótesis arquitectónicas que asumen la volumetría y carga portante declarando abiertamente su condición de adición contemporánea

En la arquitectura contemporánea, el uso de nuevos materiales para reemplazar elementos dañados ofrece

ejemplos interesantes de prótesis. Por ejemplo, en la restauración del Neues Museum de Berlín, el arquitecto David Chipperfield optó por no reconstruir miméticamente las partes destruidas durante la Segunda Guerra Mundial. En su lugar, utilizó hormigón y otros materiales modernos para rellenar los vacíos, creando una especie de "cicatriz" arquitectónica que narra la historia del edificio. Estas nuevas partes funcionan como prótesis que no ocultan su condición de añadido contemporáneo, sino que dialogan con el original y dan testimonio de las heridas del pasado.

Otro ejemplo son las **prótesis de madera** utilizadas en la restauración de estructuras de entramado de madera. Cuando una viga o un pilar de madera se pudre o es atacado por insectos, se puede sanear la parte dañada y reemplazarla por una pieza de madera nueva, unida a la original mediante técnicas de ensamblaje tradicionales o modernas. En algunos casos, se han utilizado resinas epoxi mezcladas con serrín para rellenar las partes perdidas, creando una prótesis que se integra tanto química como mecánicamente con la madera original.

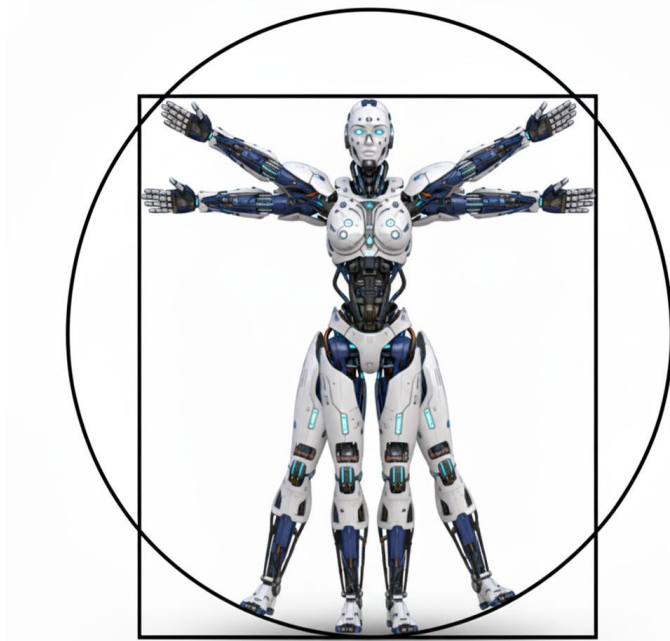


Figura 23. Reinterpretación del concepto de Leonardo da Vinci, /Fuente: Elaboración propia generada mediante inteligencia artificial

La aplicación de **materiales compuestos**, como la fibra de carbono, para reforzar o reemplazar elementos estructurales dañados es otro campo en el que la analogía con la prótesis es evidente. Las láminas o tejidos de fibra de carbono pueden adherirse a vigas de hormigón o madera para aumentar su capacidad de carga, funcionando como una especie de "músculo artificial". En otros casos, se han desarrollado perfiles de materiales compuestos que pueden reemplazar secciones de vigas corroídas, ofreciendo una solución ligera, duradera y resistente a la corrosión.

Entre las posibles barreras a la aplicación de ortesis y prótesis en la arquitectura se encuentran:

Desafíos técnicos: La adaptación de las tecnologías médicas al contexto arquitectónico puede presentar desafíos técnicos, como la necesidad de diseñar dispositivos que soporten cargas mucho mayores y que se integren con los materiales y las técnicas constructivas tradicionales.

Preocupaciones estéticas: La intervención en edificios históricos con elementos externos puede generar preocupaciones estéticas, ya que se busca preservar la autenticidad y el valor histórico del edificio. El diseño de ortesis arquitectónicas debe considerar la integración armónica con la estética del edificio y el entorno.

Filosofías de conservación: La aplicación de ortesis y prótesis en la arquitectura puede generar debate en

relación con las diferentes filosofías de conservación. Algunos puristas pueden considerar que la intervención con elementos externos altera la autenticidad del edificio, mientras que otros pueden ver en las ortesis una solución innovadora para la conservación del patrimonio.

Sin embargo, la aplicación de ortesis y prótesis en la arquitectura presenta un gran potencial para la conservación del patrimonio. Imaginemos, por ejemplo, una estructura metálica que funcione como un exoesqueleto para un edificio con problemas estructurales, o un sistema de "implantes" que refuercen los muros de una construcción histórica. Estas soluciones podrían ofrecer una alternativa menos invasiva a las técnicas tradicionales de restauración, permitiendo preservar la autenticidad del edificio.

2.3.2 Principios de Diseño de Ortesis Médicas

El diseño de ortesis médicas es una disciplina altamente especializada que se sitúa en la intersección de la medicina, la ingeniería biomecánica, la ciencia de los materiales y el diseño industrial. Su objetivo principal es el de crear dispositivos que, aplicados externamente a una parte del cuerpo, puedan modificar las características estructurales o funcionales del sistema neuromusculoesquelético. Aunque la variedad de ortesis es inmensa –desde una simple férula para un dedo hasta un complejo exoesqueleto robótico–, todas ellas se rigen por una serie de principios biomecánicos y de diseño fundamentales que buscan maximizar la eficacia terapéutica, la seguridad y el confort del paciente. Comprender estos principios es crucial para explorar su posible transferencia al ámbito de la conservación arquitectónica.

Uno de los axiomas fundamentales en el diseño de dispositivos biomecánicos es el **sistema de fuerzas o presión en tres puntos (*three-point pressure system*)** (Nordin & Frankel, 2012; Viladot et al., 1997). Este principio, derivado directamente de la **mecánica clásica y la estática de vigas sometidas a flexión**, establece que para restringir un movimiento anómalo, corregir una deformidad angular o estabilizar un segmento en un plano geométrico determinado, se requiere un sistema estáticamente determinado de tres fuerzas coplanares no colineales en equilibrio ($\sum F = 0$, $\sum M = 0$).

Estructuralmente, el sistema opera mediante:

1. **Una fuerza primaria correctora (F_1):** Aplicada en el punto de máxima curvatura, vértice de la deformidad o sobre la articulación inestable.
2. **Dos fuerzas de contrapresión en los extremos (F_2 y F_3):** Dispuestas en sentido opuesto en las zonas proximal y distal, generando el par de fuerzas necesario para anular el momento flector no deseado y estabilizar el elemento sin requerir anclajes invasivos internos (Baehler, 1986; Nordin & Frankel, 2012).

Un ejemplo canónico en medicina es el corsé de Milwaukee para la escoliosis o las ortesis para hiperextensión de rodilla, donde la correcta magnitud y dirección de estas tres fuerzas corrigen la alineación del eje longitudinal (Salter, 1986; Viladot et al., 1997)

Otro principio fundamental es la distribución de la presión. Cualquier ortesis, para ser efectiva, debe aplicar fuerzas sobre el cuerpo. Sin embargo, una presión excesiva y concentrada en un área pequeña puede causar

dolor, daño en la piel e incluso necrosis de los tejidos. Por lo tanto, un buen diseño ortésico busca distribuir la presión sobre la mayor superficie posible. Esto se logra mediante el uso de materiales acolchados, el diseño de interfaces que se adapten anatómicamente a los contornos del cuerpo y la ampliación de las áreas de contacto. La ley de la presión ($\text{Presión} = \text{Fuerza} / \text{Área}$) es el principio rector en este aspecto. Aumentando el área de aplicación de la fuerza, se reduce la presión ejercida sobre los tejidos blandos, mejorando la tolerancia y el confort del paciente.

La inmovilización y estabilización son otros dos objetivos clave del diseño ortésico. Las férulas y los collarines cervicales son ejemplos claros de ortesis diseñadas para inmovilizar una articulación o un segmento corporal después de una lesión o una cirugía. La inmovilización reduce el dolor, previene el movimiento que podría agravar la lesión y crea un ambiente propicio para la cicatrización de los tejidos. La estabilización, por su parte, se refiere al control del movimiento anómalo en una articulación laxa o inestable. Una ortesis estabilizadora, como una rodillera para una lesión de ligamentos, no busca la inmovilización total, sino limitar el movimiento en los rangos que son potencialmente dañinos, al tiempo que permite un movimiento funcional en los rangos seguros. El diseño de estas ortesis debe equilibrar cuidadosamente la necesidad de restricción con la necesidad de permitir la función.

El principio de alineación y corrección de deformidades es fundamental en el tratamiento de afecciones crónicas o congénitas, como la escoliosis o el pie equino varó. En estos casos, la ortesis se diseña para aplicar fuerzas sostenidas y de baja intensidad a lo largo del tiempo, con el objetivo de guiar el crecimiento óseo o remodelar los tejidos blandos para corregir la deformidad. El corsé de Milwaukee para la escoliosis es un ejemplo clásico. Su diseño aplica fuerzas en tres puntos para enderezar la columna vertebral, y debe ser ajustado periódicamente para adaptarse al crecimiento del paciente y al progreso de la corrección. Existen diferentes tipos de ortesis, como férulas, collarines, corsés y exoesqueletos, cada uno con una función específica. Las férulas, por ejemplo, se utilizan para inmovilizar un hueso fracturado, mientras que los collarines se emplean para estabilizar la columna cervical.

Los materiales utilizados en la fabricación de ortesis son diversos, y su elección depende de la función del dispositivo y las necesidades del paciente. Algunos de los materiales más comunes son:

Tabla 2.- Análisis Comparativo de Materiales en Ortesis Médicas como Referente para Ortesis Arquitectónicas. -

Material	Propiedades	Función en Ortesis	Ejemplos en Ortesis Médicas
Yeso	Rígido, moldeable, económico	Inmovilización, soporte	Férulas para fracturas
Plástico	Ligero, resistente, adaptable	Inmovilización, soporte, corrección	Férulas, ortesis para pie, tobillo y rodilla

Material	Propiedades	Función en Ortesis	Ejemplos en Ortesis Médicas
		de deformidades	
Metal	Alta resistencia mecánica, duradero	Soporte, corrección de deformidades, exoesqueletos	Ortesis para columna vertebral, exoesqueletos para miembros inferiores
Fibra de carbono	Ligero, alta resistencia, flexible	Ortesis de alto rendimiento, prótesis	Prótesis de miembros, ortesis deportivas

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir del estudio de materiales comúnmente utilizados en el diseño de ortesis médicas y su analogía con los requerimientos para el diseño de soportes arquitectónicos. La tabla se inspira en los principios de la biomimética y la ciencia de los materiales, tal como se exploran en textos de referencia como: Vincent, J. F. V. (2002). Structural Biomaterials. Princeton University Press./Ashby, M. F. (2013). Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice. Butterworth-Heinemann.

En el caso de los **exoesqueletos**, los principios de diseño se vuelven aún más complejos, ya que a menudo incorporan elementos activos como motores, sensores y sistemas de control. Un exoesqueleto no solo busca soportar o alinear el cuerpo, sino también asistir o reemplazar la función muscular. El diseño de estos dispositivos debe tener en cuenta la **interfaz hombre-máquina**, es decir, cómo el exoesqueleto interactúa con el cuerpo del usuario y cómo interpreta sus intenciones de movimiento. Se utilizan sensores para detectar las señales eléctricas de los músculos (electromiografía) o los pequeños movimientos del cuerpo, y un sistema de control traduce estas señales en órdenes para los motores que mueven las articulaciones del exoesqueleto. La **ergonomía** y la **usabilidad** son, por tanto, principios de diseño de primer orden. El exoesqueleto debe ser intuitivo de usar, cómodo de llevar durante largos periodos y seguro en todas las condiciones de funcionamiento.

Finalmente, un principio de diseño que a menudo se pasa por alto pero que es fundamental para el éxito de cualquier ortesis es la **personalización**. Cada paciente es único, con una anatomía, una patología y unas necesidades funcionales específicas. Por lo tanto, la mayoría de las ortesis se fabrican a medida o, al menos, se adaptan a las medidas individuales del paciente. Las tecnologías de escaneo 3D y de fabricación aditiva (impresión 3D) están revolucionando este campo, permitiendo la creación de ortesis altamente personalizadas que se adaptan perfectamente al cuerpo del usuario, mejorando su eficacia y confort.

En resumen, el diseño de ortesis médicas se basa en un conjunto de principios biomecánicos y de ingeniería bien establecidos. El sistema de tres puntos de apoyo, la distribución de la presión, la inmovilización selectiva, la alineación progresiva, la selección de materiales avanzados, la integración de sistemas activos

en el caso de los exoesqueletos y la personalización son los pilares sobre los que se construye esta disciplina. Estos principios, nacidos de la necesidad de reparar y asistir al cuerpo humano, ofrecen un marco conceptual robusto y una fuente de inspiración para el desarrollo de nuevas estrategias de intervención en el "cuerpo" arquitectónico, que, al igual que el cuerpo humano, es vulnerable al paso del tiempo y a las agresiones del entorno.

2.3.3 Transferencia de Conocimientos de la Medicina Ortésica a la Arquitectura

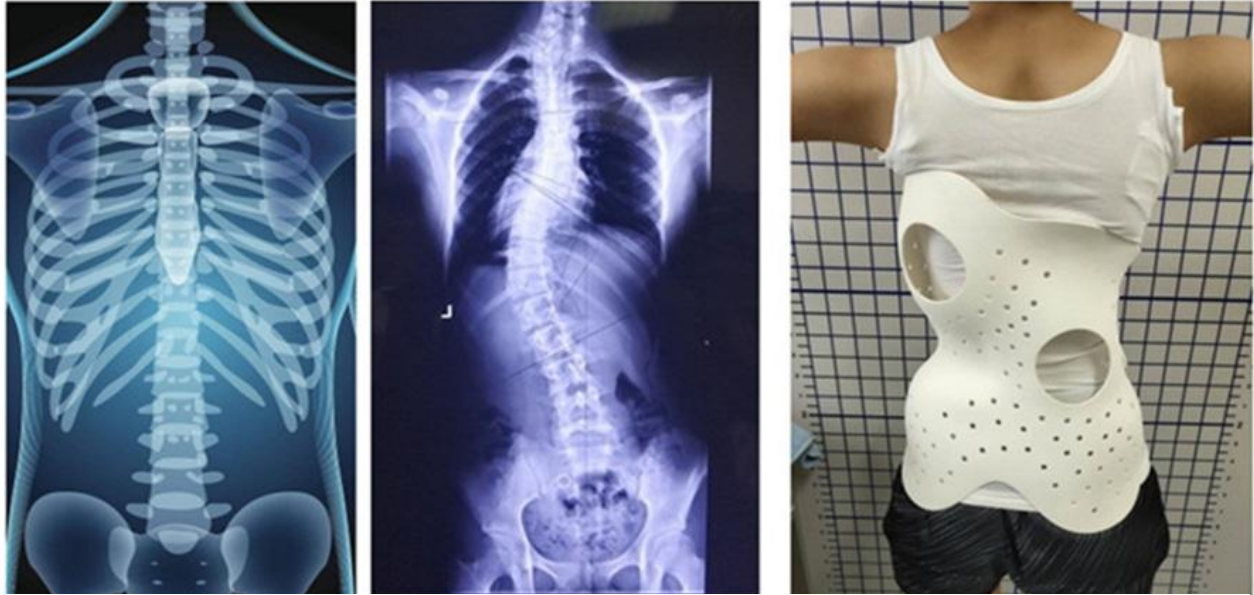


Figura 24.- Fotografías que muestra una lesión a nivel de columna cervical y la órtesis propuesta para solucionar dicha lesión. Fuente: <https://trends.directindustry.es/eplus3d/project-235666-1135770.html>

Del diagnóstico médico al diagnóstico estructural:

En medicina, el diseño de una ortesis comienza con un diagnóstico preciso de la patología del paciente. Esto implica no solo identificar la lesión o deformidad, sino también comprender su causa (etiología), su evolución probable (pronóstico) y las capacidades funcionales restantes del paciente. Se utilizan para ello técnicas de imagen (radiografías, resonancias magnéticas), análisis de la marcha, mediciones antropométricas, etc.

De manera análoga, una intervención de conservación arquitectónica debe partir de un diagnóstico estructural exhaustivo del edificio. Esto va más allá de una simple inspección visual. Implica el uso de técnicas de análisis no destructivas (georradar, ultrasonidos, termografía), el monitoreo de deformaciones y fisuras a lo largo del tiempo, el análisis histórico-constructivo para comprender las fases de construcción y las intervenciones previas, y el modelado computacional para simular el comportamiento estructural del edificio bajo diferentes cargas (sismo, viento, etc.). La transferencia de conocimiento en este punto implica adoptar un enfoque clínico y sistemático en el diagnóstico, entendiendo el edificio como un "paciente" con una historia clínica y una condición actual que debe ser comprendida en profundidad antes de prescribir cualquier "tratamiento".

De los principios biomecánicos a los principios estructurales:

Como se ha visto, el diseño de ortesis se basa en principios biomecánicos como el sistema de tres puntos de apoyo, la distribución de la presión y la inmovilización selectiva. Estos principios son directamente transferibles al diseño de refuerzos estructurales para edificios.

La transferencia del **sistema de presión de tres puntos (Nordin & Frankel, 2012)** a la ingeniería de conservación permite proyectar sistemas de arriostramiento y contrafuertes telescópicos ligeros (Crocì, 2000; Lourenço, 2002). En lugar de apuntalamientos masivos indiscriminados, este principio permite aplicar una fuerza de contención precisa (F_1) en el punto de máximo pandeo o abombamiento fuera del plano de un muro histórico, anclando las dos reacciones opuestas (F_2 y F_3) en la coronación y el sobrecimiento mediante interfaces no invasivas, neutralizando el vuelco actuando estrictamente en los puntos mecánicamente indispensable

La distribución de la presión es un concepto crucial para evitar daños inducidos por la propia intervención. Al diseñar un sistema de refuerzo, es fundamental asegurar que las cargas se transmitan al edificio de manera gradual y sobre una superficie amplia para evitar concentraciones de tensión que puedan causar nuevas fisuras o el aplastamiento de los materiales originales. Las interfaces entre la "ortesis arquitectónica" y el edificio deben ser cuidadosamente diseñadas, utilizando materiales de transición (como morteros de cal, fieltros o neoprenos) que acomoden las diferencias de rigidez y eviten la incompatibilidad químico-física. Esto es análogo al uso de acolchados y materiales blandos en las ortesis médicas.

La inmovilización selectiva se traduce en el concepto de refuerzo flexible o disipador de energía. En zonas sísmicas como Chile, no siempre es deseable una rigidez absoluta. Al igual que una ortesis que permite un movimiento funcional controlado, un sistema de refuerzo sísmico puede ser diseñado para permitir que el edificio se deforme de manera controlada durante un terremoto, disipando la energía y evitando el colapso. Los disipadores sísmicos o los aisladores de base son ejemplos de tecnologías que siguen este principio.

De los materiales biocompatibles a los materiales compatibles:

La medicina ortésica pone un gran énfasis en la biocompatibilidad de los materiales, es decir, en su capacidad para no generar rechazo o daño en los tejidos vivos. En arquitectura, el concepto análogo es la compatibilidad de los materiales. Cualquier material nuevo que se introduzca en un edificio histórico debe ser compatible con los materiales originales desde un punto de vista físico, químico y mecánico.

Compatibilidad física: El nuevo material debe tener un comportamiento similar al original en términos de dilatación térmica, permeabilidad al vapor de agua y capilaridad. El uso de materiales incompatibles (como el cemento Portland en muros de adobe o de albañilería de cal) puede atrapar la humedad, generar sales y acelerar el deterioro del original.

Compatibilidad química: Los nuevos materiales no deben reaccionar químicamente con los originales de forma que se generen subproductos dañinos. Por ejemplo, el contacto entre ciertos metales puede generar corrosión galvánica.

Compatibilidad mecánica: El material de refuerzo debe tener una rigidez y una resistencia adecuadas. Un material excesivamente rígido puede hacer que las tensiones se concentren en las partes más débiles de la estructura original, provocando daños en lugar de prevenirlos.

La búsqueda de materiales "compatibles" puede inspirarse en la investigación de nuevos materiales para ortesis. Materiales compuestos, polímeros reforzados con fibras y aleaciones con memoria de forma son ejemplos de materiales avanzados que, con la debida investigación y adaptación, podrían ofrecer soluciones innovadoras y compatibles para la conservación del patrimonio.

De la personalización y la fabricación aditiva a la intervención a medida:

La tendencia hacia la personalización masiva en la ortésica, impulsada por el escaneo y la impresión 3D, ofrece un modelo para el futuro de la intervención patrimonial. Cada edificio histórico es único, con una geometría, unos materiales y unas patologías específicas. Las soluciones de refuerzo estandarizadas rara vez son óptimas.

La transferencia de esta metodología implicaría el uso de escaneo láser 3D y fotogrametría para generar modelos digitales de alta precisión de los edificios. Sobre estos modelos, se podrían diseñar "ortesis arquitectónicas" a medida, optimizando su forma y su ubicación para una máxima eficiencia estructural con un mínimo impacto visual. Estas ortesis podrían luego ser fabricadas mediante técnicas de fabricación digital (como la impresión 3D de hormigón o metal, o el corte por control numérico) para asegurar un ajuste perfecto. Esto permitiría crear soluciones altamente eficientes, ligeras y, en muchos casos, reversibles.

De la Ergonomía de la Interfaz Médica a la Interfaz de Contacto y Compatibilidad Funcional :

En la medicina ortésica, la ergonomía rige el diseño de la **interfaz de acoplamiento (*interface fit*)**: un dispositivo mal calibrado concentra presiones sobre eminencias óseas o tejidos sensibles, provocando dolor, lesiones dérmicas y rechazo funcional (Baehler, 1986; Viladot et al., 1997). Por ello, el dispositivo debe amoldarse con exactitud a la anatomía del paciente mediante acolchados y sistemas de ajuste progresivo.

Al transferir este concepto a la arquitectura, la ergonomía ortésica se articula en dos niveles técnico-conceptuales:

1. Ergonomía de Contacto (Compatibilidad Mecánica de Interfaz):

Las fábricas históricas de adobe o ladrillo artesanal poseen superficies heterogéneas y frágiles. Una intervención rígida que aplique cargas puntuales genera aplastamiento localizado o cizalle del material original (Crocì, 2000). La ergonomía arquitectónica exige el diseño de **interfaces de transición suave** (como apoyos elastoméricos de neopreno, fieltros geotextiles o morteros de cal aérea de sacrificio), los cuales actúan como el acolchado de la férula médica, asegurando que la presión se distribuya homogéneamente ($\sigma = F/A$) sobre el sustrato histórico sin perforaciones destructivas.

2. Compatibilidad Cinemática y Espacial (Uso y Habitabilidad):

Así como una ortesis médica debe permitir el desenvolvimiento del paciente sin anular su movilidad natural (Salter, 1986), la ortesis arquitectónica debe respetar la doble condición del edificio: como cuerpo estructural y como soporte de actividades humanas (Wigley, 1991). La estructura auxiliar debe calibrarse para no interferir con las circulaciones, los vanos de iluminación ni la lectura del espacio interior, resolviendo la estabilización mediante elementos esbeltos y no invasivos que armonicen la seguridad estructural con la habitabilidad del monumento (Vesely, 2004).

En resumen, la transferencia de conocimientos desde la medicina ortésica a la arquitectura de conservación es mucho más que una simple metáfora (ver figura 25, muestra una órtesis tipo férula y su homólogo estructural utilizado en la construcción para reforzar un pilar que se encuentra dañado). Implica la adopción de un paradigma clínico en el que el edificio es tratado como un paciente, con un enfoque riguroso en el diagnóstico, la prescripción de un tratamiento a medida, el uso de materiales compatibles y el respeto por la integridad y la "calidad de vida" del edificio. Este enfoque biomecánico puede ayudar a superar algunas de las limitaciones de las prácticas de conservación tradicionales, abriendo la puerta a soluciones más



Figura 25 Fotografía que de férula y homologo estructural/Fuentes: <https://ibna.cl/ferula-de-posicionamiento/>
<https://www.tracrehabilitacio.es/es/articulo-rehabilitacion-edificios/refuerzo-de-pilares-de-hormigon-con-perfiles-metalicos>

científicas, precisas, eficientes y respetuosas con el invaluable legado del patrimonio arquitectónico...

2.3.4 Fundamentación de los Conceptos de Inmovilización, Estabilización y Alineación en la Arquitectura

La adopción de los conceptos de Inmovilización, Estabilización y Alineación no constituye una metáfora arbitraria, sino una traslación epistemológica rigurosa desde la biomecánica ortopédica (Nordin & Frankel,

2012; Viladot et al., 1997; Salter, 1986) hacia los principios de la ingeniería de consolidación patrimonial (Crocì, 2000; Lourenço, 2002; ICOMOS, 2003). En medicina musculoesquelética, estos tres términos definen la escala de prescripción terapéutica según el nivel de sollicitación del tejido; su aplicación a la fábrica arquitectónica permite clasificar las intervenciones según el estado cinemático y patológico del elemento intervenido:

Inmovilización (Restricción Rígida de Movimiento):

Origen biomecánico: Derivado del tratamiento de fracturas agudas mediante vendajes enyesados o férulas rígidas, donde se restringe todo movimiento relativo entre segmentos óseos para inducir reposo mecánico y permitir la cicatrización (Salter, 1986).

Aplicación arquitectónica: Intervención que busca anular rígidamente el desplazamiento relativo entre partes fracturadas ante patologías activas o riesgo inminente de colapso (Crocì, 2000). Ejemplos: inyecciones de consolidación, llaves o grapas metálicas transversales de cosido y apuntalamientos de emergencia

Trasladado a la arquitectura, el concepto de **inmovilización** se refiere a una intervención estructural que busca **restringir de manera rígida el movimiento relativo entre diferentes partes de una estructura o entre la estructura y sus elementos no estructurales**. Este tipo de intervención se aplica cuando se han detectado daños severos, como grandes grietas, desprendimientos o una pérdida significativa de la cohesión interna, y existe un riesgo inminente de colapso o de progresión del daño. El objetivo es "congelar" la situación patológica y evitar que el daño aumente.

Ejemplos de inmovilización en arquitectura serían:

La inyección de resinas epoxi en grietas de gran calibre en elementos de hormigón armado: Esta técnica busca "soldar" las dos partes de la grieta, restaurando la monoliticidad del elemento e impidiendo cualquier movimiento futuro a lo largo de esa fisura.

La instalación de un sistema de tirantes o grapas metálicas rígidas a través de una grieta en un muro de albañilería: Las grapas, ancladas a ambos lados de la fisura, impiden que esta se abra o se cierre, inmovilizando el movimiento.

El encamisado de un pilar con hormigón armado o perfiles de acero: Esta técnica aumenta drásticamente la rigidez del pilar, restringiendo su capacidad de deformación y, por tanto, inmovilizándolo frente a las cargas.

La inmovilización arquitectónica, al igual que la médica, es una medida a menudo drástica y no exenta de riesgos. Una inmovilización excesiva o mal diseñada puede generar concentraciones de tensión en otras partes de la estructura, trasladando el problema a otro lugar. Además, puede ser una intervención muy invasiva y poco reversible, que altera significativamente el comportamiento original del edificio. Su uso debería reservarse para casos de extrema necesidad, cuando la integridad estructural está gravemente comprometida.

Estabilización (Asistencia Dinámica y Confinamiento):

- *Origen biomecánico:* Inspirado en ortesis funcionales y rodilleras articulares para inestabilidades ligamentosas, las cuales no anulan la movilidad de la articulación, sino que controlan rangos lesivos y asisten la transmisión de cargas durante el movimiento (Viladot et al., 1997; Nordin & Frankel, 2012).
- *Aplicación arquitectónica:* Intervenciones destinadas a controlar las deformaciones y contener el fallo frágil de la fábrica sin suprimir la capacidad de deformación controlada ni la disipación de energía sísmica (Heyman, 1995; Lourenço & Roca, 2009). Ejemplos: zunchos perimetrales, cinchas externas postensadas, tirantes metálicos en arcos y mallas de refuerzo superficial compatible (FRCM).

Ejemplos de estabilización en arquitectura incluirían: **La instalación de contrafuertes o arbotantes en un muro:** Estos elementos no impiden que el muro se deforme bajo la acción del viento o de un sismo, pero

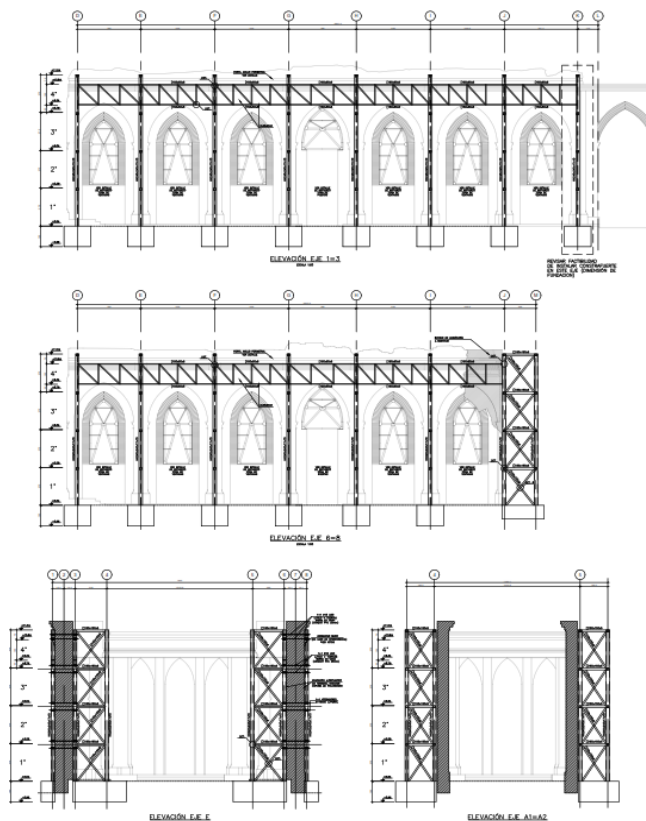


Figura 26. Imágenes del proyecto de estabilización estructural de la Iglesia San Francisco de Curicó, año 2020. Fuente: Consejo de Monumentos Nacionales.

controlan la magnitud de esa deformación, evitando que alcance un punto crítico que conduzca al colapso.

La adición de un sistema de arriostramiento flexible en una estructura de acero o madera: Las cruces de San Andrés, por ejemplo, aportan rigidez lateral a un pórtico, pero tienen una cierta capacidad de deformación elástica que les permite absorber energía.

La aplicación de mallas de materiales compuestos (como fibra de vidrio o de carbono) sobre un muro de albañilería: Estas mallas, adheridas con morteros compatibles, aumentan la ductilidad del muro, es decir, su capacidad de deformarse sin colapsar. No inmovilizan el muro, sino que controlan su modo de fallo, evitando una desintegración frágil.

La introducción de disipadores de energía sísmica: Estos dispositivos se diseñan

específicamente para moverse durante un terremoto y, a través de la fricción o la deformación de materiales viscosos, "absorber" y disipar la energía sísmica, protegiendo así el resto de la estructura. Son el epítome de la estabilización dinámica.

La estabilización es, en general, un enfoque más sofisticado y respetuoso con la naturaleza de la estructura original que la inmovilización. Busca colaborar con el comportamiento inherente del edificio, en lugar de

imponerle una rigidez ajena.

Alineación (Corrección Geométrica Activa):

- *Origen biomecánico:* Procedimientos ortésicos y quirúrgicos que aplican fuerzas progresivas sostenidas en el tiempo (e.g., corsé de Milwaukee para escoliosis) para corregir deformidades del eje anatómico (Baehler, 1986; Nordin & Frankel, 2012).
- *Aplicación arquitectónica:* Intervenciones de alta complejidad que buscan revertir una deformación o desplome ya consolidado mediante la aplicación de fuerzas activas controladas (Crocì, 2000). Ejemplos: enderezamiento de estructuras mediante gatos planos (*flat-jacks*), cables de postensado exterior activo o la subexcavación controlada empleada en la Torre de Pisa (Burland et al., 2003)

Ejemplos de alineación en arquitectura serían:

El enderezamiento de la Torre de Pisa:



Figura 27. Fotografía de contrapesos en la cara norte / Fuente: Trabajo Fin De Grado Universidad Politécnica de Madrid/ Álvaro González Martín (2016)

Mediante la extracción controlada de tierra del subsuelo en el lado norte, se logró inducir un asentamiento que redujo la inclinación de la torre. Este es un caso de alineación a gran escala y de alta complejidad técnica.

El uso de gatos hidráulicos para levantar una parte de un edificio que ha sufrido un asentamiento diferencial:

Una vez levantada, se puede recalzar la cimentación para mantener la nueva posición alineada.

La aplicación de tensores o cables de postensado para corregir la deformación de una viga o un arco:

Al tensar los cables, se introduce una fuerza de compresión en la parte inferior de la viga (o una fuerza de tracción en los estribos del arco) que contrarresta la flexión o el empuje y ayuda a recuperar la geometría original.

El desmontaje y posterior remontaje de un muro de piedra que se ha abombado:

Esta técnica, conocida como anastilosis cuando se aplica a ruinas clásicas, permite corregir la deformación pieza por pieza, asegurando una correcta alineación y trabazón entre los sillares. (La anastilosis es una técnica de reconstrucción arqueológica para erigir monumentos en ruinas usando sus fragmentos originales, previa investigación científica para ajustar las piezas. Cuando faltan piezas, se pueden usar materiales contemporáneos reconocibles y modernos, limitándose a los elementos necesarios para la

estabilidad. Es una forma de reintegrar un bien cultural a su forma original).

La alineación es, quizás, la intervención más delicada de las tres, ya que implica la aplicación de fuerzas activas sobre una estructura ya dañada. Requiere un conocimiento muy profundo del estado de la estructura y un control muy preciso del proceso de corrección para evitar causar daños mayores.

Criterio de Asignación Patológica: El Caso del Muro Agrietado

Para responder a cuál de estas categorías corresponde la intervención en un **muro agrietado de albañilería o tierra cruda**, debe evaluarse la cinemática de la fractura y su causa raíz (Croci, 2000; Feilden, 2003):

- **Clasificación en Inmovilización:** Si la grieta es activa, presenta movimientos térmicos o mecánicos continuos, o compromete la estabilidad local por desprendimiento de bloques, la intervención pertenece a la **inmovilización**. La respuesta ortésica consiste en la aplicación de grapas, tirantillas o un apeo temporal que "congele" la fractura e impida su progresión hacia el colapso.
- **Clasificación en Estabilización:** Si el agrietamiento es producto de esfuerzos de corte sísmico o flexión fuera del plano sin desplazamiento crítico instantáneo, el muro requiere **estabilización**. En este caso, no se busca una rigidez absoluta que concentre nuevas tensiones, sino un confinamiento perimetral elástico



(como un sistema de cinchas o *Typus Cingulum*) que mantenga la traba entre las piezas y permita al muro disipar energía de manera segura ante nuevas solicitaciones dinámicas.

2.3.5 Dispositivos Médicos como Inspiración para Ortesis Arquitectónicas. -

El diseño de dispositivos médicos, y en particular de las ortesis, es un campo de la ingeniería que ha alcanzado un altísimo grado de sofisticación. La necesidad de interactuar de forma segura y eficaz con el complejo y delicado sistema del cuerpo humano ha impulsado el desarrollo de soluciones que son a la vez robustas, ligeras, adaptables y mínimamente invasivas. Un análisis detallado de las características de estos dispositivos revela una serie de principios y cualidades que pueden servir como una poderosa fuente de inspiración para el diseño de una nueva generación de "ortesis arquitectónicas" destinadas a la conservación del patrimonio.

Las características más relevantes de los dispositivos médicos que pueden inspirar el diseño arquitectónico son:

Ligereza y Mínima Invasividad:

Una ortesis moderna, como una férula de fibra de carbono o un corsé de polímero termoplástico, se caracteriza por su extrema ligereza en relación a su resistencia. Esto es crucial para no sobrecargar el cuerpo del paciente y para permitir la máxima movilidad posible. Este principio de mínimo peso y máximo rendimiento es directamente aplicable a la arquitectura. Las intervenciones de refuerzo tradicionales a menudo implican la adición de grandes masas de hormigón o acero, lo que puede aumentar significativamente las cargas sobre la estructura existente y sus cimientos, un aspecto especialmente crítico en zonas sísmicas. Inspirarse en la ortésica médica nos llevaría a buscar soluciones de refuerzo que utilicen materiales avanzados de alta resistencia y bajo peso, como los polímeros reforzados con fibras (FRP) de carbono, vidrio o basalto, o aleaciones de aluminio o titanio. El objetivo sería lograr la estabilización requerida con la mínima adición de masa, respetando así el comportamiento dinámico original de la estructura. La mínima invasividad también se refiere a la necesidad de reducir al mínimo los anclajes y las demoliciones en el sustrato original, de forma análoga a como se busca evitar las incisiones y las heridas en el cuerpo del paciente.



Figura 28. Imagen de férula para rodilla /Fuente <https://orliman.cl/producto/ortesis-de-rodilla-rom/?srsltid=AfmBOopeWlw6N8nyXnPEGZdUVODfuRr8nZ86R8Vjh3YC2U9IjYqqeVP7>

Adaptabilidad y Personalización:

Rara vez una ortesis es un producto "de talla única". La mayoría se fabrican a medida a partir de un molde o un escaneo 3D del paciente, o son dispositivos modulares que permiten un ajuste preciso. Esta adaptabilidad anatómica es clave para su eficacia y confort. Los edificios patrimoniales también son únicos; no hay dos muros de albañilería o dos bóvedas de ladrillo exactamente iguales. Por lo tanto, las soluciones de refuerzo deberían ser igualmente personalizadas. La tecnología de escaneo láser 3D permite hoy en día capturar la geometría compleja y a menudo irregular de las estructuras históricas con una precisión milimétrica. Estos modelos digitales pueden ser utilizados para diseñar "ortesis

arquitectónicas" que se adapten perfectamente a la superficie del edificio, asegurando una transmisión de cargas óptima y un ajuste perfecto. La fabricación digital (impresión 3D, corte por control numérico) podría entonces producir estos componentes a medida de forma eficiente.

Modularidad y Reversibilidad:

Muchas ortesis están diseñadas con un enfoque modular, permitiendo que sus componentes sean reemplazados, ajustados o retirados a medida que el paciente se recupera. Este principio de modularidad y reversibilidad es uno de los pilares de la teoría de la restauración contemporánea. Una intervención en el patrimonio debería, en la medida de lo posible, ser reversible, es decir, debería poder ser retirada en el futuro sin causar daños al original, permitiendo así que futuras generaciones puedan aplicar nuevas y mejores técnicas de conservación. El diseño de "ortesis arquitectónicas" como sistemas modulares, compuestos por elementos discretos y mecánicamente unidos (en lugar de químicamente adheridos de forma irreversible), facilitaría su montaje, desmontaje y eventual sustitución. Por ejemplo, en lugar de un encamisado de hormigón in situ, se podría pensar en un sistema de paneles prefabricados de material compuesto, atornillados a la estructura.

Materiales Inteligentes y Funcionales:

La investigación en dispositivos médicos está a la vanguardia del desarrollo de materiales inteligentes. Las aleaciones con memoria de forma (SMA), por ejemplo, son metales que pueden "recordar" y volver a una forma predefinida cuando se calientan. Se utilizan en stents y otros implantes. En arquitectura, las SMA podrían ser utilizadas para crear dispositivos de refuerzo que se puedan "activar" después de su instalación para aplicar una fuerza de pretensado precisa, o que puedan cambiar su rigidez en respuesta a un estímulo como un terremoto. Otros materiales funcionales, como los polímeros autocurables o los sensores de fibra óptica embebidos, que se están investigando para aplicaciones biomédicas, podrían ser incorporados en las ortesis arquitectónicas para que estas tengan la capacidad de autodiagnosticarse y repararse (nanotecnología), o de proporcionar información en tiempo real sobre el estado de salud de la estructura.

Distribución de Cargas e Interfaces Suaves:

Como ya se ha mencionado, una ortesis debe distribuir la presión sobre una gran superficie para no dañar los tejidos blandos. Las interfaces entre la ortesis y la piel suelen estar hechas de materiales acolchados y transpirables. De la misma manera, la interfaz entre la ortesis arquitectónica y el edificio histórico es un punto crítico del diseño. Se deben evitar las uniones rígidas y puntuales que puedan generar concentraciones de tensión. En su lugar, se deben diseñar interfaces "suaves", utilizando materiales de transición como morteros de cal de baja resistencia, fieltros geotextiles o apoyos elastoméricos. Estos materiales actúan como un "amortiguador" entre la rigidez del refuerzo y la relativa fragilidad del sustrato histórico, asegurando una transferencia de cargas gradual y compatible.

Estética y Discreción (o Expresión Consciente):

El diseño de una ortesis a menudo busca un equilibrio entre la funcionalidad y la estética. En algunos casos,

se busca que sea lo más discreta posible para no estigmatizar al usuario. En otros, especialmente en el campo de las prótesis, el diseño se celebra y se convierte en una forma de expresión. Este doble enfoque es muy pertinente en la conservación del patrimonio. Una "ortesis arquitectónica" puede ser diseñada para ser visualmente discreta, utilizando materiales y colores que se integren con el edificio original. O, por el contrario, puede ser diseñada como un elemento contemporáneo claramente legible, que exprese su función y su tiempo, siguiendo el principio de la Carta de Venecia de distinguir la intervención del original. La elección entre la discreción y la expresión consciente dependerá del contexto y de la filosofía de la intervención, pero en ambos casos, la dimensión estética debe ser una consideración de diseño fundamental, no un mero resultado de la ingeniería.

2.4 Sostenibilidad en la Arquitectura

La sostenibilidad en la arquitectura se ha convertido en un imperativo en el siglo XXI, ante la creciente preocupación por el impacto ambiental de la actividad humana. La construcción y el uso de edificios consumen una gran cantidad de recursos naturales y energía, generando emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático.

En el contexto de la conservación del patrimonio, la sostenibilidad adquiere una relevancia aún mayor, ya que se trata de preservar edificios históricos para las generaciones futuras. La intervención en el patrimonio debe ser respetuosa con el medio ambiente, minimizando el impacto ambiental y utilizando materiales y tecnologías sostenibles.

2.4.1 Conceptos Clave de Sostenibilidad en la Arquitectura

Ciclo de vida: El análisis del ciclo de vida de un edificio permite evaluar su impacto ambiental a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su demolición. Este análisis considera el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos y el impacto en el entorno.

Huella de carbono: La huella de carbono de un edificio se refiere a la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por su construcción y uso. La reducción de la huella de carbono es un objetivo fundamental para la sostenibilidad en la arquitectura.

Eco-eficiencia: La eco-eficiencia se refiere al uso eficiente de los recursos naturales y la energía en la construcción y operación de un edificio. Esto implica la reducción del consumo de agua, la optimización del uso de la energía y la utilización de materiales reciclados o de bajo impacto ambiental.

Además de estos conceptos clave, existen otras definiciones y enfoques relevantes para la sostenibilidad en la arquitectura, como:

Bioconstrucción: La bioconstrucción utiliza materiales naturales y técnicas tradicionales para crear edificios saludables, ecológicos y energéticamente eficientes. Se basa en el uso de materiales locales, renovables y con bajo impacto ambiental, como la madera, la tierra cruda, la paja y el bambú.

Arquitectura bioclimática: La arquitectura bioclimática se basa en el diseño de edificios que aprovechan las condiciones climáticas del lugar para reducir el consumo energético y mejorar el confort térmico. Considera factores como la orientación solar, la ventilación natural y el aislamiento térmico para crear espacios confortables con un mínimo consumo energético.

Arquitectura Vernácula: La arquitectura vernácula se refiere a las construcciones tradicionales de una región, que se han adaptado a las condiciones climáticas y culturales del lugar. El estudio de la arquitectura vernácula puede proporcionar valiosas lecciones para el diseño de edificios sostenibles, que se integren con el entorno y aprovechen los recursos locales.

Diseño regenerativo: El diseño regenerativo va más allá de la sostenibilidad, buscando crear edificios que tengan un impacto positivo en el medio ambiente, regenerando los recursos naturales y mejorando la biodiversidad. Se basa en la idea de que los edificios pueden funcionar como ecosistemas, generando energía, purificando el agua y proporcionando hábitat para la flora y fauna.

Principios de economía circular: La economía circular busca reducir el consumo de recursos y la generación de residuos, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales. En la arquitectura, la economía circular se aplica al diseño de edificios desmontables, la reutilización de materiales de construcción y la gestión de residuos.

2.4.2 Criterios de Sostenibilidad en la Intervención del Patrimonio

Para ilustrar la integración de la sostenibilidad en la conservación patrimonial chilena, la selección del **Palacio Pereira (Santiago)** y de las **Iglesias de Chiloé (Región de Los Lagos)** no fue arbitraria, sino que obedeció a una matriz de **cuatro criterios metodológicos de representatividad técnico-ambiental**:

Contraste de Culturas Constructivas y Materialidades:

Permiten contrastar la intervención en dos de las matrices materiales predominantes del país: la *fábrica urbana pesada* (albañilería de ladrillo del siglo XIX en zona sísmica central) frente a la *estructura vernácula ligera* (entramados de madera nativa del sur insular).

Divergencia de Enfoques de Sostenibilidad (Tecnológico vs. Vernáculo):

El **Palacio Pereira** ejemplifica la *sostenibilidad tecnológica y circular*: reconversión adaptativa de un inmueble en ruinas mediante reciclaje de áridos, consolidación estructural diferenciada e integración de sistemas de climatización pasiva y eficiencia energética.

Las **Iglesias de Chiloé** representan la *sostenibilidad biocultural y de ciclo de vida cerrado*: preservación de saberes constructivos locales (carpintería tradicional de ribera), uso de maderas de origen local con baja huella de carbono y tratamientos naturales no tóxicos.

Validación Institucional y Reconocimiento Normativo:

Ambos casos constituyen hitos de referencia validados: el Palacio Pereira como estándar contemporáneo de intervención pública del Estado de Chile (Premio AOA / CMN) y las Iglesias de Chiloé como Sitio del Patrimonio Mundial (UNESCO).

Transferibilidad hacia el Enfoque Ortésico:

Ambos precedentes evidencian que la sostenibilidad no radica únicamente en la eficiencia energética, sino en la **compatibilidad mecánica y la prolongación del ciclo de vida del sustrato histórico** sin recurrir a demoliciones innecesarias, premisa rectora de la propuesta de órtesis arquitectónicas.

Matriz Metodológica de Selección

Criterio Metodológico	Caso 1: Palacio Pereira (Santiago)	Caso 2: Iglesias de Chiloé (Chiloé)
Ubicación y Entorno	Urbano metropolitano denso (Región Metropolitana).	Rural / Insular disperso (Región de Los Lagos).
Sistema Constructivo	Albañilería de ladrillo, cantería y refuerzos mixtos.	Entramados, tijerales y revestimientos de madera nativa.
Enfoque Sostenible	Reconversión adaptativa, reciclaje material, climatización eficiente y eco-diseño.	Materiales de bajo carbono incorporado, preservación de oficios tradicionales y gestión comunitaria.
Rol en la Tesis	Referente de compatibilidad entre lo nuevo y lo preexistente en ruina consolidada.	Referente de mantenimiento cíclico, desmontabilidad y reemplazo de piezas sin pérdida de autenticidad.

2.4.3 Materiales y Tecnologías Sostenibles para la Construcción

La utilización de materiales y tecnologías sostenibles es fundamental para la construcción de edificios

ecológicos y la intervención en el patrimonio arquitectónico. Algunos de los materiales ecológicos más utilizados son:

Madera certificada: Madera proveniente de bosques gestionados de forma sostenible.

Tierra cruda: Material natural con bajo impacto ambiental, utilizado en la construcción de muros y revestimientos.

Bambú: Material renovable con alta resistencia, utilizado en estructuras, revestimientos y mobiliario.

Materiales reciclados: Materiales provenientes del reciclaje de residuos de construcción, como ladrillos, tejas y hormigón.

Las tecnologías que permiten reducir el consumo energético de los edificios incluyen:

Energía solar: Utilización de paneles solares para la generación de energía eléctrica y agua caliente sanitaria.

Geotermia: Aprovechamiento del calor del subsuelo para la climatización de edificios.

Ventilación natural: Diseño de sistemas de ventilación que aprovechan las corrientes de aire naturales para la renovación del aire interior.

En la intervención del patrimonio, la elección de los materiales y las tecnologías debe considerar la compatibilidad con los materiales originales del edificio y el respeto por su valor histórico. Por ejemplo, en la restauración de un edificio de adobe, se podría utilizar tierra cruda para la reparación de muros, combinada con técnicas de aislamiento térmico que mejoren la eficiencia energética del edificio.

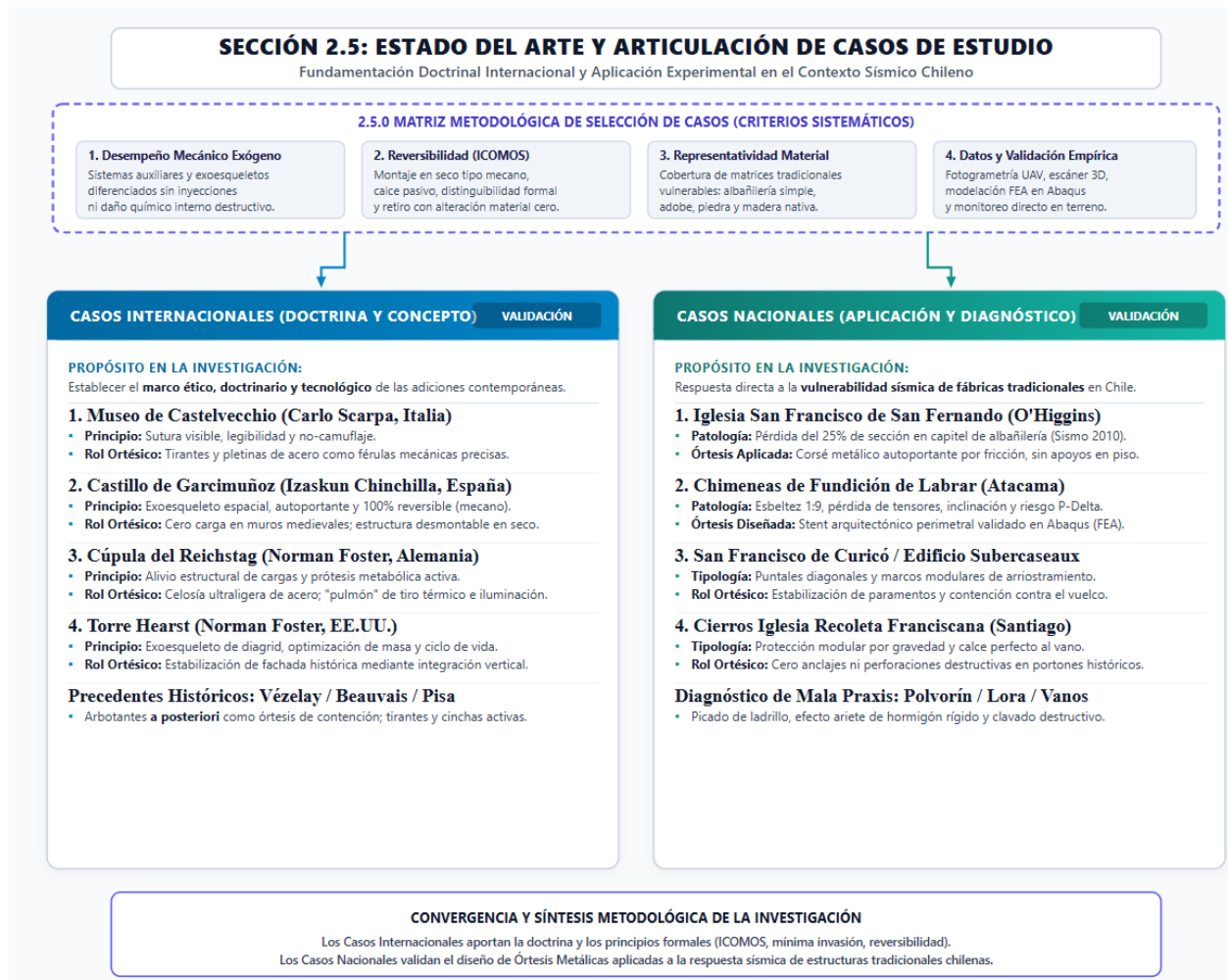
2.5 Estado del Arte: Precedentes Doctrinales Internacionales y Casos de Aplicación Nacional

El estado del arte en la intervención del patrimonio edificado evidencia una transición fundamental desde las reconstrucciones miméticas e historicistas hacia un paradigma basado en la mínima intervención, la reversibilidad y la autenticidad material (ICOMOS, 1964, 2003; Jokilehto, 1999). Las doctrinas contemporáneas de restauración estructural enfatizan que cualquier dispositivo de refuerzo debe ser formalmente distinguible y respetar el comportamiento mecánico intrínseco del edificio, evitando la introducción de masas o rigideces incompatibles que puedan alterar la dinámica del monumento (Crocì, 2000; Lourenço & Roca, 2009). En este escenario, la ingeniería de conservación y la arquitectura contemporánea han convergido en el uso de estructuras auxiliares externas, prótesis funcionales y exoesqueletos metálicos ligeros como estrategias idóneas para garantizar la estabilidad sin comprometer el valor documental del bien patrimonial (Brand, 1994; Feilden, 2003).

Para articular de manera rigurosa esta revisión, la presente investigación establece una distinción metodológica y funcional entre dos niveles de análisis:

Precedentes Doctrinales y Tecnológicos Internacionales: No se presentan como órtesis sísmicas estandarizadas de emergencia, sino como los *referentes de vanguardia que validan los principios ético-restaurativos y biomecánicos* de la propuesta a nivel global (el no camuflaje y sutura visible en Scarpa; el exoesqueleto autoportante 100% reversible tipo mecano en Chinchilla; y la descarga axial con prótesis bioclimática en Foster).

Casos de Aplicación, Diagnóstico y Validación en Chile: Corresponden a las estructuras patrimoniales tradicionales locales (adobe, albañilería simple y madera) donde se implementan *órtesis arquitectónicas de contención física ante el riesgo sísmico real* o se analizan malas praxis de refuerzos rígidos destructivos.



2.5.0 Criterios Metodológicos para la Selección de Casos

Con el propósito de asegurar el rigor científico y justificar la inclusión de cada caso de estudio, la selección obedeció a una matriz de cuatro criterios sistemáticos:

Criterio 1 (Desempeño Mecánico e Interfaz Exógena): Selección de intervenciones donde el refuerzo

estructural opera mediante dispositivos auxiliares o exoesqueletos exteriores diferenciados, evitando la consolidación destructiva interna del muro histórico (Crocì, 2000; Lourenço & Roca, 2009).

Criterio 2 (Reversibilidad y Distinguibilidad - Doctrina ICOMOS): Obras que demuestran la viabilidad del montaje en seco (tipo mecano), el calce pasivo y el retiro sin daño al sustrato original, cumpliendo con la Carta de Venecia (1964) e ICOMOS (2003).

Criterio 3 (Representatividad Material y Vulnerabilidad Sísmica): Cobertura de las tipologías tradicionales más vulnerables del país: albañilería simple de ladrillo artesanal, mampostería de piedra, tierra cruda/adobe y entramados de madera.

Criterio 4 (Levantamiento Crítico y Acceso a Datos de Campo): Casos con disponibilidad de datos métricos de alta resolución (fotogrametría UAV, escáner láser 3D, modelos de elementos finitos en Abaqus o monitoreo directo del autor en terreno).

Matriz Comparativa: Relación de Casos con el Concepto de Órtesis Arquitectónica

Nivel de Análisis	Caso de Estudio / Precedente	Sistema y Materialidad	Patología o Desafío Abordado	Relación / Aporte al Concepto de Órtesis Arquitectónica
Internacional (Doctrina)	Museo de Castelveccchio (Italia; Carlo Scarpa)	Mampostería de ladrillo y sillería medieval.	Ruina bélica, vanos inestables y necesidad de recorridos.	Precedente de Sutura y No-Camuflaje: Demuestra cómo pletinas y perfiles de acero vistos actúan como llaves mecánicas de contención sin falsificar la historia ni ocultar la lesión.
Internacional (Tecnología)	Castillo de Garcimuñoz (España; Izaskun Chinchilla)	Ruinas de fábrica medieval de piedra.	Paramentos desestabilizados incapaces de admitir cargas.	Precedente de Exoesqueleto Modular (Mecano): Demuestra la viabilidad de un sistema auxiliar autoportante, con micro-apoyos sin anclajes destructivos y 100% desmontable.
Internacional (Metabolismo)	Cúpula del Reichstag (Alemania; Norman Foster)	Muros de sillería decimonónica dañados.	Pérdida de cubierta histórica y fatiga estructural.	Precedente de Descarga y Prótesis Funcional: Celosía ligera de acero que alivia la carga axial sobre los apoyos antiguos y reactiva bioclimáticamente el edificio.
Nacional (Aplicación 1)	Iglesia San Francisco de San Fernando	Albañilería de ladrillo artesanal.	Pérdida del 25% de la sección transversal en capitel.	Órtesis de Descarga y Confinamiento (Estructura Ferrata): Corsé metálico autoportante por fricción pasiva con interfase de neopreno, sin apoyos en piso ni perforaciones.
Nacional (Aplicación 2)	Chimeneas de Fundación de Labrar	Albañilería tubular esbelta (1:9).	Pérdida de tensores, inclinación de 50 cm y riesgo de vuelco.	Órtesis de Confinamiento y Torsión (Stent): Exoesqueleto perimetral validado en <i>Abaqus</i> (FEA) para

Nivel de Análisis	Caso de Estudio / Precedente	Sistema y Materialidad	Patología o Desafío Abordado	Relación / Aporte al Concepto de Órtesis Arquitectónica
				neutralizar efectos P-Delta sin perforar el fuste.
Nacional (Diagnóstico Crítico)	Polvorín Ex Cárcel / Templos de Santiago / Lora	Albañilería abovedada, portones de madera y adobe.	Picado de ladrillo, clavado de zinc e impacto de masas rígidas de hormigón.	Antítesis Ortésica (Mala Praxis): Evidencia el daño irreversible de intervenciones sin ajuste paramétrico ni respeto por las frecuencias dinámicas del sustrato.

2.5.1 Precedentes Internacionales: Sistemas de Soporte Diferenciado, Exoesqueletos y Prótesis Contemporáneas

La revisión de intervenciones a nivel internacional permite identificar precedentes de referencia que, aun sin emplear explícitamente el término "órtesis arquitectónica", comparten sus mismos principios biomecánicos y criterios de conservación:

Casos Internacionales

A continuación, se presentan algunos casos internacionales que ilustran la aplicación de enfoques innovadores en la conservación del patrimonio arquitectónico:

Museo de Castelvecchio, Verona, Italia (Carlo Scarpa, 1958-1974)

Este proyecto es considerado una obra paradigmática de la intervención patrimonial moderna y un referente doctrinal sobre el diálogo dialéctico entre la preexistencia histórica y la adición contemporánea (Murphy, 2017; Olsberg et al., 1999). Aunque no se concibió estrictamente como una órtesis en el sentido estructural masivo, su aproximación metodológica responde de manera análoga a una intervención quirúrgica de precisión: respetuosa, legible y orientada a la conservación de la autenticidad estratigráfica del inmueble (Jokilehto, 1999; Solà-Morales, 2006).

El Proyecto y Contexto Histórico:

Scarpa asumió la restauración y adecuación museográfica de un castillo bajomedieval profundamente alterado por refacciones historicistas decimonónicas y severamente dañado por los bombardeos de la Segunda Guerra Mundial (Murphy, 2017). Frente a las posturas que promovían la reconstrucción mimética o la imposición de una envolvente unificadora que enmascarara las cicatrices bélicas, el arquitecto optó por un proceso de "excavación crítica" y saneamiento. Esta estrategia consistió en desnudar los estratos históricos del monumento y evidenciar sus heridas constructivas, insertando las nuevas funciones y elementos de refuerzo de forma abierta, visible y honesta (Murphy, 2017; Olsberg et al., 1999).

Analogía con la Órtesis y la Prótesis Arquitectónica:

La propuesta de Scarpa opera a través de un sistema articulado de "suturas", elementos de descarga y prótesis funcionales de alta precisión técnico-constructiva:

Estabilización Puntual y Descarga Mecánica: La intervención incorpora tirantes de acero dulce, ménsulas metálicas vistas, platinas apernadas y apoyos de hormigón armado. Estos componentes no pretenden camuflar su rol ni imitar el lenguaje lícito de la fábrica medieval; por el contrario, actúan como férulas y piezas de transferencia de carga que estabilizan paramentos debilitados, abren vanos con control de tensiones y suspenden pasarelas de circulación sin sobrecargar los muros históricos (Crocì, 2000; Murphy, 2017).

Diálogo y Compatibilidad de Materiales: El acero laminado en perfiles esbeltos, el hormigón visto tratado artesanalmente y el vidrio se yuxtaponen y acoplan con precisión a la mampostería tradicional de ladrillo y piedra (Olsberg et al., 1999). Este contraste matérico evita deliberadamente el falso histórico y permite una lectura estratigráfica clara: la materia histórica preexistente y el sistema auxiliar contemporáneo coexisten como dos entidades diferenciadas pero mecánicamente colaborativas (ICOMOS, 1964; Mansergas, 2013).

Principios de Conservación Aplicados:

Mínima Intervención y Reversibilidad: Cada elemento añadido fue concebido bajo el principio del "contacto delicado", reduciendo al mínimo los puntos de apoyo o anclaje sobre la fábrica antigua. El exhaustivo diseño de las juntas secas, uniones mecánicas y separaciones físicas permite que las estructuras metálicas y pasarelas puedan, en teoría, ser retiradas o ajustadas en el futuro sin generar pérdidas irreversibles en la mampostería original (Crocì, 2000; Feilden, 2003).

Distinción entre lo Nuevo y lo Antiguo (Distinguibilidad): En estricta concordancia con las directrices de la Carta de Venecia (ICOMOS, 1964, Art. 9 y 12), la obra renuncia a cualquier mimetismo formal. La intervención contemporánea declara abiertamente su condición y temporalidad, consolidando una lectura honesta del edificio como un organismo vivo que acumula pátina, transformaciones y fases de consolidación a lo largo de su ciclo de vida (Brand, 1994; Jokilehto, 1999).

Este caso de estudio se consolida como un precedente fundacional para la presente tesis, ya que establece el **marco ético, estético y operativo de la propuesta ortésica**: la intervención sobre el patrimonio no debe operar como un camuflaje destructivo ni como un refuerzo masivo e invasivo, sino como un dispositivo técnico calibrado y distinguible que asiste, sostiene y dialoga respetuosamente con el cuerpo histórico edificado (Crocì, 2000; Murphy, 2017)

Rehabilitación del Castillo de Garcimuñoz, Cuenca, España (Izaskun Chinchilla, 2013-2016)

Rehabilitación del Castillo de Garcimuñoz, Cuenca, España (Izaskun Chinchilla, 2013–2016)

Este proyecto constituye un referente internacional contemporáneo que materializa el concepto de **exoesqueleto ortésico ligero, autoportante y tecnológico**, alineándose estrictamente con los principios de

mínima intervención, sostenibilidad del ciclo de vida y reversibilidad absoluta exigidos por la teoría de la restauración contemporánea (Chinchilla, 2017; ICOMOS, 2003).

El Proyecto y Contexto Patrimonial:

La intervención abordó la recuperación y puesta en valor de las ruinas de una fortaleza del siglo XV en estado de abandono y colapso parcial de sus dependencias interiores. El desafío radicaba en habilitar el recinto como mediateca y centro cultural público sin alterar la estratigrafía arqueológica, sin modificar la volumetría de los lienzos medievales y sin sobrecargar muros de mampostería con empujes horizontales o cargas verticales incompatibles (Chinchilla, 2017; Lourenço & Roca, 2009). Frente a las soluciones convencionales de consolidación pesada o forjados invasivos, la propuesta introdujo una estructura exógena que coexiste con la ruina como un "mueble arquitectónico" de gran escala.

Analogía con la Órtesis Arquitectónica y Principios Biomecánicos:

La propuesta de Chinchilla opera a través de un sistema de soporte exógeno que ilustra de manera literal los principios de la medicina ortésica:

Sistema Autoportante sin Carga sobre el Monumento (Descarga Total): La intervención se concibe como un exoesqueleto metálico espacial que se sustenta sobre micro-cimentaciones puntuales e independientes. Las pasarelas, plataformas suspendidas y cubiertas translúcidas no se anclan ni descargan peso sobre los muros de mampostería histórica; por el contrario, se aproximan a ellos a escasos milímetros mediante juntas secas y apoyos de sacrificio, protegiendo las coronaciones de la intemperie sin inducir tensiones de flexión o corte (Crocì, 2000; Lourenço, 2002).

Diseño Biomimético y Eficiencia Estructural: La estructura triangulada de barras tubulares metálicas se inspira en sistemas ramificados vegetales y en la porosidad del tejido óseo trabecular (Vincent, 2002). Esta geometría orgánica optimiza las trayectorias de carga, logrando una elevada rigidez global con un peso propio mínimo, reduciendo la inercia del conjunto ante eventuales solicitaciones dinámicas o térmicas (Ashby, 2013; Nordin & Frankel, 2012).

Criterios de Restauración y Sostenibilidad Aplicados:

Reversibilidad Total y Sistema Mecano (Montaje en Seco): El principio rector de la intervención fue garantizar una reversibilidad del 100%. La totalidad de la estructura fue prefabricada en taller y ensamblada en obra mediante uniones mecánicas atornilladas y pernos de alta resistencia (sistema tipo *mecano*), prescindiendo de soldaduras directas a la fábrica histórica, morteros de cemento o resinas químicas irreversibles (Cassatella & Peila, 2018; Peña & Lourenço, 2012). La ortesis arquitectónica posee así un ciclo de vida propio e independiente, pudiendo ser desmantelada o reconfigurada en el futuro sin dejar huellas físicas, fracturas ni pérdidas de masa en la ruina medieval.

Sostenibilidad de Materiales y Análisis de Ciclo de Vida: La selección matérica priorizó componentes 100% reciclables (perfiles de acero dulce, placas de policarbonato alveolar y tarimas de madera de tala controlada), reduciendo drásticamente la energía incorporada (*embodied energy*) y la huella de carbono de

la intervención respecto a las restauraciones tradicionales a base de hormigón armado (Ashby, 2013; Pintér et al., 2012).

La intervención en el Castillo de Garcimuñoz demuestra la viabilidad técnica y conceptual de la **órtesis arquitectónica como un exoesqueleto contemporáneo**: un dispositivo de asistencia formalmente diferenciado, altamente tecnificado y totalmente reversible, capaz de devolver el uso y la seguridad a un cuerpo arquitectónico en ruinas sin vulnerar su autenticidad material ni su valor de testimonio histórico (Chinchilla, 2017; ICOMOS, 2003; Jokilehto, 1999)

Cúpula del Reichstag, Berlín, Alemania (Norman Foster, 1999)

La intervención de Norman Foster en el Palacio del Reichstag constituye uno de los precedentes internacionales más emblemáticos sobre cómo un dispositivo contemporáneo de alta tecnología puede actuar como una **prótesis funcional y una órtesis de alivio mecánico sobre un cuerpo arquitectónico históricamente dañado** (Foster, 2000; Pawley, 1999)



El Proyecto y Diagnóstico de la Arquitectura Dañada:

Inaugurado en 1894, el histórico edificio decimonónico fue víctima de incendios devastadores, bombardeos masivos durante la Segunda Guerra Mundial y décadas de abandono e intervenciones provisionales precarias. Tras la reunificación alemana, el inmueble presentaba una pérdida total de su cúpula original y una severa degradación en la capacidad portante de sus muros de mampostería y piedra. Frente a las posturas que exigían una reconstrucción mimética o un falso histórico en piedra pesada, Foster planteó un tratamiento radicalmente diferenciado: no reconstruir la masa perdida, sino implantar una nueva cúpula ligera de acero y vidrio concebida como un órgano exógeno de asistencia y reactivación (Foster, 2000; Jokilehto, 1999).

Analogía desde el Concepto de Órtesis y Prótesis en la Arquitectura:

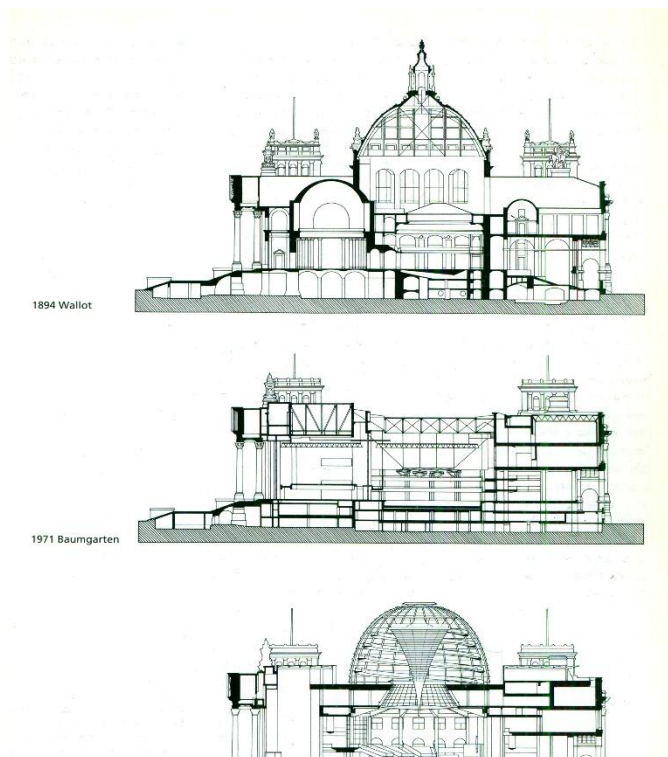


Figura 29. Ilustración de la evolución del edificio hasta el estado actual /fuente: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2014/07/03/restauracion-reichstag-berlin-1992-1999-foster-associates/>

La intervención trasciende la mera analogía estética y se fundamenta en un desempeño biomecánico directo sobre la preexistencia dañada:

Órtesis de Descarga Gravitacional y Mínima Inercia: Reconstruir la cúpula original de albañilería y mampostería habría significado reintroducir miles de toneladas de carga axial sobre los paramentos y pilares históricos ya fatigados por el fuego y las fracturas bélicas. La cúpula de Foster actúa como una órtesis de descarga: una celosía espacial ligera de acero de alta resistencia que minimiza las cargas gravitacionales y no sobrecarga los apoyos perimetrales del edificio dañado, respetando el límite elástico residual de la fábrica antigua (Crocì, 2000; Lourenço & Roca, 2009).

Prótesis Metabólica ("El Pulmón del Edificio"): Al igual que una prótesis médica asume una función fisiológica esencial, la

cúpula incorpora un cono escultórico invertido recubierto de espejos (*light sculptor*) que opera en dos vías: refleja la luz natural cenital hacia el interior del salón de plenos (reduciendo drásticamente la demanda lumínica artificial) y canaliza la ventilación por tiro térmico natural, extrayendo el aire viciado caliente por la cúspide (Edwards, 2013; Pawley, 1999). La prótesis no es un elemento inerte; es un "pulmón" que restablece y mejora el metabolismo funcional de la estructura dañada.

Alineación Cinemática y Simbólica: La estructura aloja dos rampas helicoidales continuas suspendidas en voladizo. Este sistema circulatorio independiente distribuye el flujo de visitantes sin transferir empujes desestabilizadores hacia los muros perimetrales, realineando el propósito del inmueble desde un antiguo **monumento imperial hacia un espacio democrático transparente y transitable** (Brand, 1994; Foster, 2000).

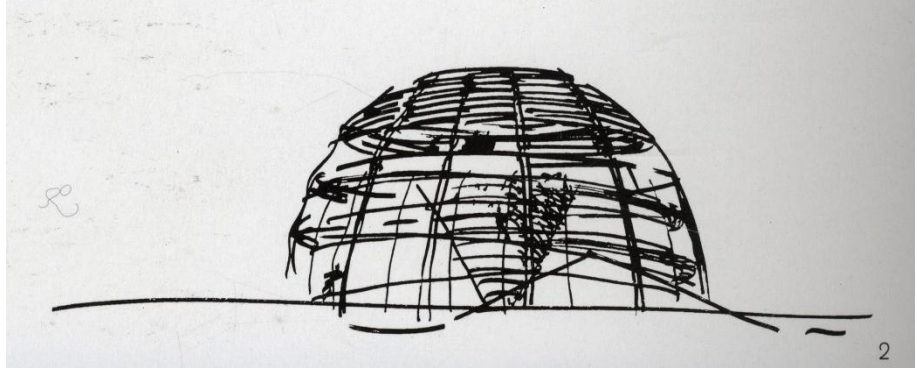


Figura 30. Boceto o ilustración de idea. Vista desde el exterior de la cúpula. Fuente: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2014/07/03/restauracion-reichstag-berlin-1992-1999-foster-associates>

Principios Restaurativos y Criterios de Sostenibilidad Aplicados:

Honestidad Tectónica y Diálogo entre lo Nuevo y lo Viejo: En estricto apego a la Carta de Venecia (ICOMOS, 1964), la intervención renuncia a cualquier camuflaje historicista. La transparencia y ligereza del acero contrastan nítidamente con la masividad de la piedra dañada, permitiendo una lectura estratigráfica honesta de la historia del edificio.

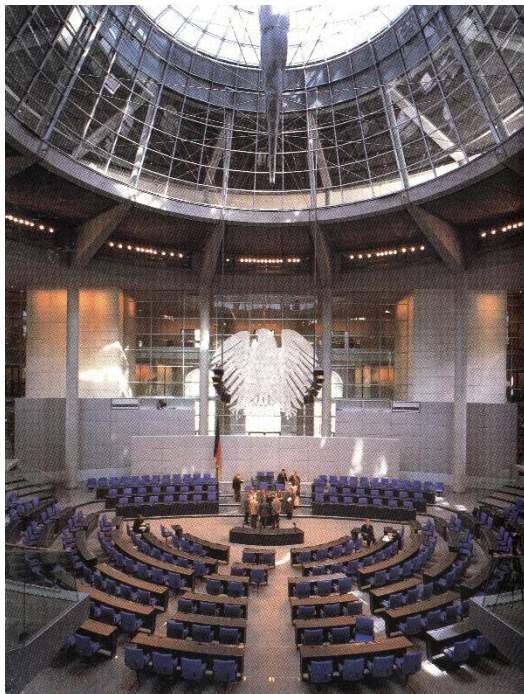


Figura 31. Imágenes digitales. Izquierda Render Interior de la cámara. / Fuente: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2014/07/03/restauracion-reichstag-berlin-1992-1999-foster-associates/> Derecha render exterior de la cúpula y del espacio público en altura situado en la terraza. / Fuente: <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2014/07/03/restauracion-reichstag-berlin-1992-1999-foster-associates/>

Eco-eficiencia y Ciclo de Vida: El proyecto constituye un manifiesto de sostenibilidad patrimonial al

combinar estrategias bioclimáticas pasivas con materiales de ciclo cerrado (acero reciclado y vidrio de alto rendimiento), reduciendo la huella de carbono operacional del edificio y prolongando su ciclo de vida útil sin comprometer su autenticidad (Ashby, 2013; Pintér et al., 2012).

En el marco de la presente investigación, la Cúpula del Reichstag demuestra que una órtesis arquitectónica aplicada a un cuerpo en ruina no debe limitarse únicamente al apuntalamiento estático de emergencia: tiene el potencial de aliviar mecánicamente las tensiones del edificio dañado, reactivar su desempeño funcional y dotar al patrimonio de una resiliencia técnica y energética contemporánea (Crocì, 2000; Foster, 2000)

Hearst Tower, Nueva York, EE.UU. (Norman Foster, 2006)



Figura 32. Fotografía Torre Hearst, Nueva York, Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/torre-hearst>

Este proyecto es un ejemplo radical de cómo se puede preservar una fachada histórica utilizándola como base para una estructura completamente nueva, un concepto análogo a un exoesqueleto que emerge de un cuerpo preexistente.

El Proyecto: La base del edificio era la fachada de seis pisos de un edificio art déco de 1928, originalmente destinado a ser la base de un rascacielos que nunca se construyó. Foster completó esa visión casi 80 años después, construyendo una torre de 46 pisos que parece brotar desde el interior de la estructura original.

Analogía con la Ortesis Arquitectónica: La torre de acero y vidrio actúa como un **poderoso exoesqueleto** que no solo se apoya en la base histórica, sino que la dota de la función para la que fue concebida.

Estabilización e Integración: La estructura original no es un mero adorno; es el podio y la entrada monumental a la nueva torre. La nueva estructura se diseñó para respetar y **estabilizar** la antigua, creando un atrio interior que une visual y funcionalmente ambas partes.



Figura 33. Render corte planta baja Torre Hearst, Nueva York, Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/torre-hearst>

Eficiencia Estructural: La torre utiliza una estructura de "diagrid" (una malla de triángulos de acero), que es un 20% más ligera y eficiente que un marco de acero convencional. Esta optimización material es análoga al diseño de las ortesis médicas, que buscan la máxima resistencia con el mínimo peso y material.

Principios Aplicados:

Ciclo de Vida: El proyecto le da una nueva vida y un propósito completado al edificio original, extendiendo drásticamente su ciclo de vida útil.

Materiales y Tecnología Sostenible: Fue el primer rascacielos "verde" de Nueva York, con un diseño que recolecta agua de lluvia, maximiza la luz natural y está construido con un 90% de acero reciclado.

Figura 34. Imagen elevacion y corte Torre Hearst, Nueva York, Fuente: <https://arquitecturaviva.com/obras/torre-hearst>

Este ejemplo lleva la idea de la ortesis a una escala masiva, mostrando cómo un exoesqueleto moderno puede cumplir la

promesa estructural de un "cuerpo" antiguo, integrándolo en un nuevo organismo arquitectónico altamente eficiente y sostenible.

Casos Nacionales

En la búsqueda de ejemplos de intervenciones en el patrimonio que se asemejen al concepto de ortesis arquitectónica, con sus características de refuerzo estructural, reversibilidad y provisionalidad, nos encontramos con un desafío: la escasez de bibliografía o casos que ejemplifiquen este enfoque de manera explícita.

Sin embargo, el panorama no es desalentador. Existen intervenciones en el contexto nacional que, si bien no se autodenominan ortesis arquitectónicas, utilizan elementos estructurales para reforzar o sustituir partes dañadas de un edificio, compartiendo así similitudes con los principios que buscamos explorar. Estos ejemplos, que abarcan diversas tipologías y épocas, nos sirven como punto de partida para comprender las posibilidades y desafíos de la ortesis arquitectónica, abriendo un espacio para la reflexión y el desarrollo de nuevas propuestas en el ámbito de la conservación del patrimonio.



1. Iglesia san francisco de Curio, Región del Maule. -

Intervenciones con elementos estructurales:

Refuerzo de muros con contrafuertes: En la arquitectura tradicional chilena, el uso de contrafuertes para reforzar muros de adobe o tapial es una práctica común. Estos elementos, contruidos en piedra o ladrillo, actúan como estructuras de soporte externas,

absorbiendo las tensiones y evitando el colapso de los muros. Si bien en muchos casos los contrafuertes se concibieron como parte integral del diseño original, también se han utilizado como



Figura 35. Fotografía de la Iglesia de San Francisco de Curicó, Región del Maule, comuna de Curicó. Fuente propia, cedida al Consejo de Monumentos Nacionales para el diagnóstico del proyecto de estabilización de la estructura de la Iglesia San Francisco de Curicó, año 2021.

intervenciones posteriores para estabilizar estructuras dañadas, actuando como una especie de "ortesis" que prolonga su vida útil.

Sustitución de elementos estructurales en madera: En edificios patrimoniales con estructuras de madera, la sustitución de elementos deteriorados, como vigas, pilares o soleras, es una intervención frecuente. En estos casos, se busca replicar la forma y dimensiones de las piezas originales, utilizando maderas de características similares y técnicas constructivas tradicionales. Esta intervención, aunque no siempre reversible en su totalidad, permite preservar la estabilidad estructural del edificio y su valor patrimonial.

Estructuras metálicas de refuerzo: En intervenciones más contemporáneas, se ha recurrido al uso de



Figura 36 fotografía de la Iglesia San Francisco de Curicó. Instalación de estructuras de tipo ortésica para reforzar los paramentos de la iglesia que están con riesgo de colapso, año 2022/ Fuente: constructora ARCOS. -

estructuras metálicas para reforzar edificios patrimoniales. Estas estructuras, generalmente ocultas o integradas de manera discreta, permiten aportar mayor resistencia y estabilidad a muros, techos o cimentaciones. Un ejemplo de ello es el refuerzo de la estructura de la Iglesia de San Francisco de Curicó, donde se utilizaron perfiles metálicos para estabilizar las ruinas después de verse afectada por el terremoto del año 2010 y posterior incendio que afectó el inmueble.

2.-Edificio Subercaseaux, Calle serrano, Región de Valparaíso



Figura 37 . Fotografía de Edificio Subercaseux , calle Serrano, Valparaíso , año 2024.Fuente: Elaboración propia.

Puntales y apeos provisionales: En situaciones de emergencia, como sismos o derrumbes, se utilizan puntales y apeos provisionales para estabilizar las estructuras dañadas y evitar su colapso. Estos elementos,



Figura 38, imagen de fotogrametría de Edificio Subercaseaux, calle Serrano, Valparaíso, año 2023. Fuente: Elaboración propia,

generalmente de madera o metal, se instalan de manera temporal y se retiran una vez que se ha realizado la intervención definitiva. Su carácter reversible y su fácil montaje los convierten en una herramienta valiosa para la protección del patrimonio en situaciones de riesgo.

Estructuras modulares desmontables:

En el ámbito de la restauración patrimonial, se recurre a menudo a estructuras modulares desmontables para revitalizar espacios antiguos o adaptarlos a nuevos usos. Estas construcciones, erigidas con materiales ligeros y de fácil

ensamblaje, ofrecen una versatilidad notable y pueden ser removidas sin alterar la esencia del edificio original. Un ejemplo icónico es la intervención en el Palacio Cousiño en Santiago, donde una estructura modular alberga un restaurante, diseñada para ser desmontada sin impactar la integridad histórica.

No obstante, en la región de Valparaíso, el emblemático Edificio Subercaseaux presenta un caso distinto, tal como se aprecia en la imagen. Tras el devastador incendio de 2007 en la calle Serrano, el edificio quedó reducido a ruinas, un testimonio palpable de la fragilidad del patrimonio ante la adversidad. La Figura 38, Fotografía captura la crudeza de su estado actual: muros de ladrillo desnudos, ventanas tapiadas y la vegetación reclamando su espacio, todo ello sostenido por imponentes estructuras metálicas diagonales. Estas estructuras, lejos de ser una adición estética, cumplen una función vital: estabilizar las ruinas y prevenir su colapso. Su diseño modular y el uso de puntales metálicos reflejan una estrategia de conservación que prioriza la seguridad y la preservación de la memoria histórica, permitiendo una posible restauración futura sin comprometer la autenticidad del edificio. En este contexto, las estructuras modulares no solo son una herramienta de intervención, sino un símbolo de resiliencia y esperanza, permitiendo que el Edificio Subercaseaux aspire a renacer de sus cenizas.

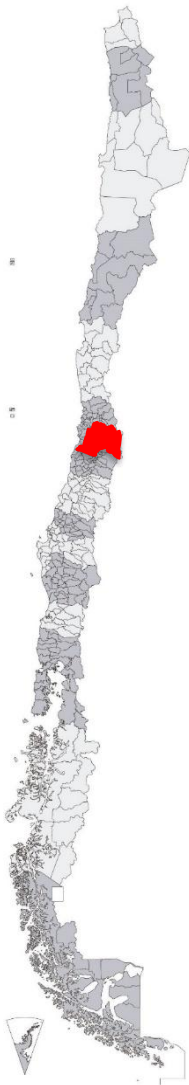


3.- Recoleta Franciscana, Región Metropolitana

Estructuras Modulares Antivandálicas:

Desmontables para la Protección de edificios de interés: En algunas intervenciones de protección antivandálica en edificios de interés patrimonial, se ha optado por el uso de estructuras modulares desmontables. Este sistema ofrece una protección no invasiva y adaptable al diseño de los elementos a resguardar.

Estas estructuras, construidas con materiales ligeros y de fácil montaje, permiten una gran flexibilidad y pueden retirarse sin dejar huella en el edificio original.



Un ejemplo destacado es la intervención realizada en el acceso de la Recoleta Franciscana en Santiago. Allí, se instaló una estructura modular que utiliza la gravedad de sus elementos para generar esfuerzos controlados. Esta particularidad permite que la estructura interactúe con los elementos a proteger, proporcionando un grado de fijación superior al que se lograría con insertos o anclajes convencionales entre la estructura y el inmueble. Tal y como se muestra en la figura 39, compuestas por dos

Fotografías del acceso de la iglesia Recoleta Franciscana. Fotografía de la Izquierda muestra la puerta de madera original, con evidencia del daño ocasionado por acciones vandálicas durante el estallido social, en la

Fotografía de la derecha se



Figura 39 . Fotografías antes y después del acceso de la Iglesia Recoleta Franciscana, Comuna de Recoleta, Región Metropolitana, año 2020. Fuente: Elaboracion Propia



Figura 40. Fotografías del Interior Iglesia Recoleta Franciscana, año 2022.. Fuente: Elaboracion propia.

observa la puerta protegida con una lamina metálica de calce perfecto a la geometría del vano. Este tipo de soluciones garantiza cero daños al momento de retirar las protecciones ya que como

se ha mencionado solo actúa de manera gravitante, sin fijaciones del tipo insertos ni anclajes.

Reflexiones sobre la ortesis arquitectónica:

La órtesis arquitectónica, concebida como una estructura de refuerzo externa, temporal y reversible, emerge como un enfoque prometedor para la conservación del patrimonio. Aunque los ejemplos puros de este concepto son escasos, las intervenciones patrimoniales que emplean refuerzos provisionales sirven como valiosos precedentes para explorar su potencial.

Su principal valor radica en la capacidad para:

Minimizar la intervención: Al actuar como un soporte externo, reduce la necesidad de alterar elementos históricos, preservando así su autenticidad e integridad material.

Adaptarse a necesidades específicas: Permite el diseño de soluciones a medida, eficientes y específicas para la geometría y las patologías de cada edificio.

Garantizar la reversibilidad: Su carácter provisional asegura que la estructura pueda ser retirada sin dejar rastro, permitiendo futuras actuaciones o la recuperación del estado original.

Facilitar el monitoreo estructural: Puede incorporar sensores para el seguimiento continuo del comportamiento del edificio, evaluando en tiempo real la efectividad de la intervención.

Por ello, la órtesis arquitectónica se postula como una alternativa innovadora y respetuosa. Es imperativo profundizar en su investigación y desarrollo para consolidar su aplicación, asegurando la preservación de nuestro legado cultural para las futuras generaciones.

2.5.2 Técnicas y Materiales Innovadores en la Conservación de Estructuras

La conservación del patrimonio arquitectónico se beneficia de las últimas tecnologías en el campo de la ingeniería, la arquitectura y la ciencia de los materiales. Algunas de las técnicas y materiales innovadores utilizados en la conservación de estructuras son:

- **Escaneo láser 3D:** El escaneo láser 3D permite la creación de **modelos tridimensionales con precisión geométrica**. Como se observa en la figura 41, esta técnica es crucial para capturar la geometría compleja de estructuras como un pórtico soportado por pilares y arcos, facilitando así el análisis riguroso

de la estructura, la planificación y la documentación patrimonial

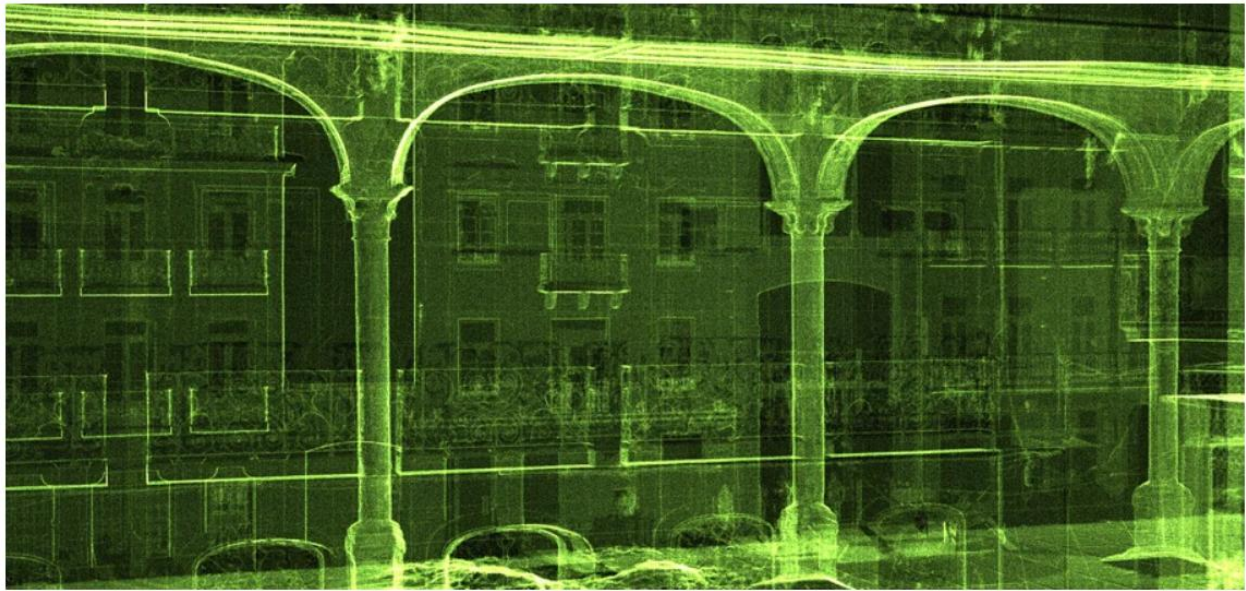


Figura 41. Imagen de Levantamiento de fachada con tecnología láser. / Fuente: <https://gekkota3d.es/es/blog-escaner-laser-3d/222-conservacion-de-patrimonio-arquitectura-e-industria-scan-to-bim>

- **Impresión 3D:** Permite la fabricación de piezas a medida para la restauración de elementos arquitectónicos, con alta precisión y rapidez. La impresión 3D se está utilizando en la conservación del patrimonio para la reproducción de elementos decorativos, la creación de moldes para la restauración de piezas dañadas y la fabricación de prótesis arquitectónicas que sustituyan elementos estructurales deteriorados.

Realidad aumentada: Permite visualizar las intervenciones en el edificio antes de su ejecución, facilitando la toma de decisiones y la comunicación entre los diferentes actores involucrados en el proyecto.

Morteros de cal hidráulica: Morteros tradicionales con propiedades similares a las de los morteros originales de los edificios históricos, permitiendo una restauración compatible con los materiales existentes.

Resinas epoxi: Resinas con alta resistencia mecánica y adhesiva, utilizadas para la consolidación de materiales pétreos y la reparación de grietas.

Nanos materiales: Materiales con propiedades especiales, como la hidrofobicidad y la resistencia a la corrosión, que se están utilizando en la conservación del patrimonio para proteger las superficies de los edificios del deterioro.

Conclusiones Capítulo

Este capítulo ha presentado el marco teórico que sustenta la investigación sobre la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Se han abordado conceptos fundamentales sobre patrimonio arquitectónico, incluyendo el patrimonio intangible, biomecánica y ergonomía en la arquitectura, sostenibilidad en la arquitectura, el estado del arte en la conservación del patrimonio y la analogía entre el cuerpo humano y la arquitectura propuesta por Leonardo da Vinci en "El Hombre de Vitrubio".

La revisión de la literatura y la investigación realizada han permitido identificar la problemática de la conservación del patrimonio en Chile, los desafíos que enfrenta, como la amenaza sísmica y la falta de recursos, y las oportunidades que ofrece la aplicación de la biomecánica en este campo. La falta de investigación específica sobre ortesis arquitectónicas, la necesidad de desarrollar tecnologías adaptadas al contexto arquitectónico y la importancia de la sostenibilidad en la intervención en el patrimonio son algunos de los aspectos que se han destacado en este capítulo.

La analogía entre el cuerpo humano y la arquitectura propuesta por Da Vinci en "El Hombre de Vitrubio" ofrece una perspectiva interesante para el desarrollo de ortesis arquitectónicas. La idea de la armonía y el equilibrio, presente en el cuerpo humano, puede ser aplicada a la conservación del patrimonio, buscando soluciones que respeten las proporciones originales del edificio y su integración con el entorno. Esta analogía también invita a una reflexión sobre la ética de la intervención en el patrimonio y la responsabilidad de preservar los edificios históricos para las generaciones futuras.

El análisis de los principios de diseño de ortesis médicas, la transferencia de conocimientos de la medicina ortésica a la arquitectura y la revisión de casos de estudio de intervenciones innovadoras en el patrimonio proporcionan una base sólida para el desarrollo de la propuesta de ortesis arquitectónicas. La incorporación de criterios de sostenibilidad en el diseño, la fabricación y la aplicación de ortesis arquitectónicas es fundamental para asegurar la conservación a largo plazo del patrimonio y minimizar el impacto ambiental de las intervenciones.

En los siguientes capítulos de esta investigación, se profundizará en el diseño, la fabricación y la aplicación de ortesis arquitectónicas en casos de estudio específicos, con el objetivo de contribuir a la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile de una manera innovadora y sostenible. Se explorarán las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías, como la impresión 3D y la realidad aumentada, para la creación de ortesis arquitectónicas personalizadas y adaptadas a las necesidades específicas de cada edificio. La investigación se centrará en el desarrollo de soluciones que sean a la vez efectivas, respetuosas con el valor histórico del patrimonio y sostenibles desde el punto de vista ambiental.

Capítulo III: Propuesta: Ortesis Arquitectónicas

Este capítulo presenta una propuesta innovadora para la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile: el uso de ortesis arquitectónicas. Se explorará el diseño conceptual de estas ortesis, incluyendo su justificación, principios de diseño, criterios de selección de materiales y sistemas de fijación. Además, se abordará el desarrollo técnico, con el diseño de prototipos, la selección de materiales, las técnicas de fabricación y la elaboración de planos y un manual de instalación.

3.1 Diseño Conceptual

3.1.1 Justificación de la elección de ortesis como solución para la conservación del patrimonio

La conservación del patrimonio arquitectónico enfrenta el desafío de preservar la autenticidad histórica de las estructuras mientras se garantiza su estabilidad y seguridad. En este contexto, las ortesis arquitectónicas emergen como una solución idónea que permite abordar las patologías estructurales de manera mínimamente invasiva y reversible.

A diferencia de las intervenciones tradicionales, que a menudo implican la sustitución de elementos originales o la adición de estructuras invasivas, las ortesis actúan como elementos de soporte externos que refuerzan y estabilizan las estructuras existentes sin comprometer su integridad. Esta característica es fundamental en la conservación del patrimonio, donde la preservación de la materia original es primordial.

Las ortesis arquitectónicas se inspiran en la biomecánica, la ciencia que estudia las estructuras y los sistemas de movimiento de los seres vivos. Al aplicar los principios biomecánicos al diseño de las ortesis, se busca imitar la eficiencia y la adaptabilidad de las estructuras naturales, creando soluciones que se integran armónicamente con el edificio y responden a sus necesidades específicas. Un ejemplo de la aplicación de la biomecánica es el análisis de la distribución de tensiones en los huesos para diseñar ortesis que redistribuyan las cargas en muros con fisuras, evitando su propagación.

La fundamentación para adoptar sistemas ortésicos en la conservación del patrimonio edificado descansa en la convergencia de seis principios técnico-restaurativos fundamentales. En primer término, la **mínima intervención** se garantiza al proyectar dispositivos auxiliares que interactúan externamente con la mampostería o el entramado, evitando perforaciones o la remoción de sustratos originales. Ligado intrínsecamente a esto, la **reversibilidad** del sistema asegura que la estructura auxiliar pueda ser retirada en el futuro sin dejar secuelas ni alterar la materia histórica, respetando los criterios de la Carta de Venecia.

Por otra parte, la **adaptabilidad geométrica** permite proyectar soluciones a la medida (*custom-made*) a partir de levantamientos tridimensionales y gemelos digitales, lo que faculta abordar patologías complejas como desplomes o descalces. A su vez, la **durabilidad** de los componentes —garantizada por la selección de aceros inoxidables o perfiles protegidos— asegura la estabilidad temporal de la estructura sin requerir mantenimientos invasivos. Finalmente, la integración de **sistemas de monitoreo continuo** mediante sensores de deformación y la cuidadosa **integración estética** del exoesqueleto permiten vigilar la respuesta dinámica del inmueble sin distorsionar su valor perceptivo ni su autenticidad.

3.1.1.1 Productividad Epistemológica de la Analogía Ortésica frente a la Obra de Emergencia Tradicional

Resulta pertinente explicitar que la traslación de los conceptos de la medicina ortopédica a la conservación de estructuras no constituye una homología material ni una simple alteración semántica sobre los conceptos de "apuntalamiento" o "consolidación". Se trata de una **analogía metodológica y de diseño funcional altamente productiva**, orientada a superar las limitaciones de la praxis tradicional en intervenciones de emergencia.

Históricamente, las obras de consolidación y apeo de emergencia se han enfocado en el objetivo final de sostener el inmueble sin protocolizar el *cómo*, recurriendo con frecuencia a perforaciones destructivas, insertos mecánicos expansivos, adición de masas rígidas irreversibles o apeos megalíticos que dañan el sustrato que pretendían salvar.

En contraste, adoptar el paradigma de la **órtesis arquitectónica** transforma radicalmente el proceso de intervención en cuatro dimensiones técnico-operativas:

De la Invasión Monolítica a la Asistencia Exógena: La ortesis se define formalmente como un sistema auxiliar que asiste la función portante sin invadir el núcleo material de la fábrica, garantizando un ensamblaje en seco 100% reversible y desmontable.

Ergonomía de Interfaz y Fijación No Destructiva: Incorpora desde la biomecánica el principio de distribución controlada de presiones ($\sigma = F/A$), reemplazando el anclaje penetrante por el confinamiento perimetral, la compresión pasiva y el uso de interfaces de transición suave (elastómeros o morteros de sacrificio) que protegen la mampostería histórica.

Gestión Dinámica de Deformaciones: A diferencia de los refuerzos rígidos tradicionales que bloquean el comportamiento intrínseco de materiales flexibles como el adobe o la madera, la órtesis actúa como un soporte funcional que contiene el desmoronamiento permitiendo la deformación controlada y la disipación de energía sísmica.

Protocolización Clínica y Fabricación a Medida: Sustituye la improvisación en faena por un flujo analógico estricto: captura de la geometría real mediante gemelos digitales tridimensionales, optimización topológica mediante análisis de elementos finitos (FEA) y producción prefabricada de precisión.

De este modo, denominar y proyectar estos dispositivos como *órtesis arquitectónicas* establece un marco operativo riguroso que condiciona el diseño hacia la mínima invasión, la reversibilidad y la compatibilidad mecánica, diferenciándose cualitativa y cuantitativamente de las técnicas convencionales de apuntalamiento.

3.1.2 Definición de los principios de diseño de las ortesis arquitectónicas

(funcionalidad, estética, etc.)

El diseño de ortesis arquitectónicas para la conservación del patrimonio debe guiarse por una serie de principios que aseguren su eficacia, su compatibilidad con el edificio y su respeto por los valores patrimoniales. Estos principios son:

Funcionalidad: La ortesis debe cumplir su función principal de manera eficiente, proporcionando el soporte y la estabilidad necesarios para el elemento estructural que se busca proteger. El diseño debe considerar las cargas, las tensiones y las deformaciones a las que está sometido el elemento, y la ortesis debe ser capaz de contrarrestarlas o redistribuirlas de forma segura.

Mínima intervención: El diseño debe minimizar la intervención en la estructura original. Se deben evitar perforaciones, cortes o modificaciones que alteren la integridad del material original. La ortesis debe ser lo más ligera y discreta posible, integrándose con la estructura de manera armoniosa.

Reversibilidad: La ortesis debe ser reversible, es decir, que pueda ser retirada en el futuro sin dejar rastros o causar daños a la estructura original. Esto permite la adaptación a futuras necesidades o la aplicación de nuevas técnicas de conservación.

Compatibilidad material: Los materiales utilizados en la fabricación de la ortesis deben ser compatibles con los materiales originales del edificio. Se debe evitar el contacto entre materiales que puedan generar reacciones químicas o electroquímicas que dañen la estructura. Además, se debe considerar la compatibilidad estética de los materiales, buscando una integración visual armoniosa.

Durabilidad: La ortesis debe ser durable y resistente a las condiciones ambientales a las que estará expuesta (humedad, temperatura, radiación solar, etc.). La selección de materiales y los sistemas de protección deben garantizar la longevidad de la ortesis y su capacidad para proteger el patrimonio a largo plazo.

Estética: La ortesis debe **integrarse armoniosamente con el entorno** y respetar el valor estético del patrimonio [5]. Su diseño debe ser discreto, evitando la alteración visual del conjunto arquitectónico. Se deben considerar aspectos como la forma, el color, la textura y los materiales de la ortesis para que se mimeticen con el edificio y no generen un impacto visual negativo.

En algunos casos, la ortesis puede incluso realzar la estética del edificio, al poner de manifiesto las técnicas constructivas originales o al crear un contraste visual interesante. Sin embargo, siempre se debe priorizar el respeto por la autenticidad del patrimonio.

Seguridad: La ortesis debe ser segura tanto para el edificio como para las personas. Su diseño debe garantizar la estabilidad del elemento estructural y evitar riesgos de desprendimientos o colapsos. Además, se deben considerar las medidas de seguridad necesarias durante la instalación y el mantenimiento de la ortesis.

El diseño de ortesis arquitectónicas debe guiarse por una serie de principios que aseguren su eficacia, su integración armoniosa con el patrimonio y su respeto por los valores históricos y estéticos del edificio [4].

Estos principios incluyen:

Estabilidad estructural: La ortesis debe ser capaz de mantener el equilibrio de fuerzas en el elemento patrimonial, evitando desplazamientos, rotaciones o deformaciones excesivas.

Capacidad portante: La ortesis debe ser capaz de soportar las cargas que actúan sobre el elemento patrimonial, incluyendo el peso propio, las cargas vivas (personas, mobiliario, etc.) y las cargas ambientales (viento, nieve, sismo).

Resistencia a las fuerzas ambientales: La ortesis debe ser resistente a la acción de las fuerzas ambientales, como la humedad, la radiación solar, la contaminación y las variaciones de temperatura.

Sostenibilidad: La sostenibilidad es un principio cada vez más importante en la conservación del patrimonio. El diseño de la ortesis debe **minimizar el impacto ambiental** de la intervención. Esto se puede lograr mediante:

La utilización de materiales reciclados o reciclables.

La elección de **materiales de bajo impacto ambiental** en su producción y transporte.

La optimización del diseño para reducir la cantidad de material utilizado.

La **reutilización de la ortesis** en otras intervenciones.

Criterios de diseño específicos:

Además de los principios generales, se deben establecer criterios de diseño específicos para cada tipo de ortesis, considerando las características del elemento arquitectónico a intervenir.

Muros: Las ortesis para muros deben ser capaces de resistir las cargas laterales, como el empuje del terreno o la presión del viento. Se pueden utilizar ortesis de diferentes tipos, como contrafuertes, tirantes o mallas de refuerzo.

Columnas: Las ortesis para columnas deben proporcionar soporte vertical y resistir las cargas axiales. Se pueden utilizar anillos metálicos, encamisados de hormigón o refuerzos de fibra de carbono.

Arcos: Las ortesis para arcos deben contrarrestar las fuerzas de empuje que tienden a abrir el arco. Se pueden utilizar tirantes, zunchos o sistemas de refuerzo internos.

Ejemplos de ortesis arquitectónicas:

Existen numerosos ejemplos de ortesis arquitectónicas que se han utilizado con éxito en la conservación del patrimonio. Algunos ejemplos notables son:

Ortesis de acero en la Torre de Pisa: Se utilizaron cables de acero para contrarrestar la inclinación de la

torre y evitar su colapso [9].

Ortesis de madera en el Templo de Luxor: Se utilizaron vigas de madera para sostener las columnas dañadas del templo y permitir su restauración [10].

Ortesis de fibra de carbono en el Puente de Rialto:



Figura 42. Fotografía del Puente de Rialto , Ciudad de Venecia/ Fuente.- <https://chl.sika.com/es/proyectos-referencia/rialto-puente-venecia-italia.html>.

La **ortesis** aplicada al Puente de Rialto consistió en la utilización de láminas de **fibra de carbono** para reforzar su estructura y, consecuentemente, aumentar su capacidad de carga. Específicamente, se aplicaron láminas de **CFRP** (polímero reforzado con fibra de carbono) para fortalecer los voladizos de piedra, aumentando así la seguridad y permitiendo que la barandilla resistiera mejor las fuerzas (ver figura 43 y figura 44).

Innovaciones en el diseño de ortesis:

La investigación en el campo de la biomecánica está impulsando el desarrollo de ortesis arquitectónicas más eficientes e innovadoras. Se están explorando nuevas técnicas y materiales, como:

Ortesis activas: Sistemas que pueden adaptarse a las condiciones cambiantes del edificio, como las variaciones de temperatura o las vibraciones

Ortesis inteligentes: Sistemas que incorporan sensores para monitorizar el estado de la estructura y ajustar la intervención en tiempo real

Ortesis biocinéticas: Sistemas que se inspiran en las estructuras biológicas, como los huesos o los árboles, para optimizar su resistencia y eficiencia

En resumen, el diseño de ortesis arquitectónicas debe ser un proceso riguroso que considere la funcionalidad, la estética, la reversibilidad, la durabilidad y la



Figura 43. Fotografía de refuerzo con fibra de carbono / Fuente.- Sika Group

sostenibilidad. La aplicación de principios biomecánicos y la exploración de nuevas tecnologías permiten desarrollar soluciones innovadoras que garanticen la conservación del patrimonio arquitectónico de manera eficaz y respetuosa.

3.1.3 Establecimiento de criterios de selección de materiales (sostenibilidad, compatibilidad, durabilidad, etc.)

La selección de los materiales para la fabricación de ortesis arquitectónicas es crucial para garantizar su eficacia, durabilidad y compatibilidad con el patrimonio. Los criterios de selección deben considerar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales, así como su impacto ambiental y su integración estética con el edificio.

Criterios principales:

- **Compatibilidad:** Los materiales de la ortesis deben ser compatibles con los materiales originales del edificio, evitando reacciones químicas o electroquímicas que puedan causar daños. Se debe considerar la porosidad, la acidez, la alcalinidad y otras propiedades que puedan influir en la interacción entre los materiales.
- **Resistencia mecánica:** Los materiales deben tener la resistencia mecánica necesaria para soportar las cargas y tensiones a las que estará sometida la ortesis. Se debe considerar la resistencia a la compresión, la tracción, la flexión y el cizallamiento, en función del tipo de elemento estructural y de la función de la ortesis.
- **Durabilidad:** Los materiales deben ser durables y resistentes a la degradación causada por factores ambientales como la humedad, la temperatura, la radiación solar, la contaminación atmosférica y los agentes biológicos. Se debe considerar la resistencia a la corrosión, la erosión, la intemperie y el envejecimiento.
- **Ligereza:** Se deben priorizar materiales ligeros para minimizar la carga adicional sobre la estructura original. La ligereza también facilita la manipulación e instalación de la ortesis.
- **Estética:** Los materiales deben integrarse visualmente con el edificio, respetando su estilo, su época y su entorno. Se debe considerar el color, la textura y el acabado superficial de los materiales.
- **Sostenibilidad:** Se deben priorizar materiales con bajo impacto ambiental, preferiblemente de origen local o reciclado. Se debe considerar la energía incorporada en la fabricación del material, su huella de carbono y su capacidad de reciclaje o reutilización.

Ejemplos de materiales:

Tabla 3.- Evaluación de Materiales para el Diseño de Ortesis Arquitectónicas.

Material	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Aceros inoxidables	Alta resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión	Peso elevado, coste elevado	Ortesis que requieren gran capacidad de carga
Aleaciones de aluminio	Ligeros, resistentes a la corrosión y con buenas propiedades mecánicas	Menor resistencia mecánica que el acero	Ortesis que requieren menor capacidad de carga
Fibras de carbono	Alta resistencia mecánica, ligereza y resistencia a la corrosión	Coste elevado	Ortesis que requieren alta resistencia y bajo peso
Madera laminada	Material tradicional con buenas propiedades mecánicas y estéticas, sostenible	Sensible a la humedad y a los agentes biológicos	Ortesis en edificios históricos con estructuras de madera
Morteros de cal	Material tradicional compatible con la mampostería histórica, transpirable	Baja resistencia mecánica	Reparación y consolidación de muros y elementos de piedra
Resinas epoxi	Alta resistencia mecánica y adhesión	Envejecimiento con la radiación UV	Unión de elementos y refuerzo de estructuras

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de la síntesis de información de manuales de materiales de construcción y guías de rehabilitación estructural. La tabla resume las características clave discutidas en literatura de referencia, tales como: Ashby, M. F. (2013). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. Butterworth-Heinemann /Triantafillou, T. C. (2016). *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. Woodhead Publishing /Teutonico, J. M. (1988). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. ICCROM.

La selección final del material dependerá de las características específicas de cada caso, considerando la función de la ortesis, el tipo de elemento estructural, las condiciones ambientales y los criterios estéticos.

3.1.3.1 Justificación del Sistema Híbrido y Rol de los Materiales Complementarios

Si bien la investigación se focaliza operativamente en el diseño de órtesis de chasis metálico (*Estructuras Ferrata*) debido a su alta capacidad mecánica, rapidez de montaje en seco, ductilidad y estricta reversibilidad, el dispositivo ortésico no se concibe como una pieza monolítica homogénea, sino como un sistema multicomponente e interactivo:

Estructura Portante Primaria (Metal):

Perfiles tubulares, pletinas y tensores de acero dulce o inoxidable que asumen la transferencia de cargas gravitacionales y sísmicas, limitando deformaciones críticas sin sobrecargar los elementos debilitados.

Materiales de Interfaz Suave y Acolchado (Elastómeros y Morteros de Sacrificio):

Para evitar daños por concentración de tensiones, aplastamiento mecánico o corrosión galvánica sobre sustratos de tierra cruda o ladrillo artesanal, el contacto se resuelve mediante bandas elastoméricas de neopreno, fieltros geotextiles o lechos de mortero de cal aérea. Estos elementos actúan como el forro interno de una ortesis médica, garantizando un reparto homogéneo de la presión pasiva.

Prospección de Nuevos Materiales (Sostenibilidad y Futura Transferencia):

La inclusión y análisis de compuestos avanzados (FRP, polímeros y fibras naturales) en el estado del arte y en los criterios de selección responde a la necesidad de proyectar la evolución del paradigma ortésico. Evaluar estos materiales permite contrastar el comportamiento del acero frente a opciones de menor masa, menor huella de carbono y mayor adaptabilidad geométrica, sentando las bases teóricas para desarrollos futuros en la disciplina.

Cuadro Síntesis de Respuesta

Categoría	Material Componente /	Función Específica en la Órtesis	Justificación en la Tesis
Chasis Estructural	Acero estructural / Inoxidable	Resistencia axial, tracción, rigidez global y reversibilidad en seco.	Elemento central definido en el título y prototipos de la tesis.
Interfaz de Contacto	Neopreno, morteros de cal, geotextiles	Distribución uniforme de presiones ($\sigma = F/A$) y protección del sustrato histórico.	Imprescindible para no fracturar la albañilería o adobe con el metal.
Materiales Prospectivos	Fibras compuestas (FRP/FRCM), polímeros	Comparativa de eco-eficiencia, menor peso y adaptación paramétrica.	Rigor científico y alineación con la evolución de la medicina ortésica moderna.

3.1.4 Investigación de sistemas de fijación sin anclajes para minimizar la intervención en la estructura original

La fijación de las ortesis a la estructura original es un aspecto crítico en la conservación del patrimonio. Se deben buscar sistemas de fijación que minimicen la intervención en el material original, evitando perforaciones, cortes o alteraciones que puedan comprometer su integridad. En este sentido, los sistemas de fijación sin anclajes ofrecen una solución ideal para preservar la autenticidad del edificio.

La selección del sistema de fijación adecuado es fundamental para garantizar la eficacia y la durabilidad de la ortesis, así como para preservar la integridad del patrimonio arquitectónico.

Tipos de sistemas de fijación sin anclajes:

Existen diferentes tipos de sistemas de fijación sin anclajes que se pueden utilizar en la conservación del patrimonio:

- **Adhesivos:** Los adhesivos estructurales, como las resinas epoxi o los adhesivos acrílicos, ofrecen una alta resistencia y durabilidad. Se pueden utilizar para unir la ortesis a la superficie del elemento patrimonial sin necesidad de perforaciones.
- **Morteros especiales:** Existen morteros con propiedades adhesivas que se pueden utilizar para fijar las ortesis. Estos morteros se formulan con materiales compatibles con el patrimonio y ofrecen una buena resistencia mecánica.
- **Sistemas de presión:** Se pueden utilizar sistemas de presión para fijar las ortesis a la estructura original. Estos sistemas utilizan elementos que se expanden o se contraen para generar presión y asegurar la fijación.
- **Gravedad:** En algunos casos, la propia gravedad puede ser suficiente para fijar la ortesis, especialmente si se trata de elementos pesados o con una base amplia.

Ventajas y desventajas de cada sistema:

Cada sistema de fijación tiene sus propias ventajas y desventajas:

Tabla 4 Análisis Comparativo de Sistemas de Fijación para Ortesis Arquitectónicas.

Sistema de fijación	Ventajas	Desventajas
Adhesivos	Alta resistencia, durabilidad, reversibilidad, estética	Puede requerir una preparación superficial específica, limitado a ciertos materiales
Morteros especiales	Buena resistencia, compatibilidad con el patrimonio	Puede ser menos reversible que los adhesivos, puede requerir un tiempo de curado
Sistemas de presión	No requiere perforaciones, fácil de instalar y remover	Puede ser menos resistente que los adhesivos o morteros, puede no ser adecuado para todos los tipos de ortesis
Gravedad	Simple y económico, no requiere materiales adicionales	Limitado a elementos pesados o con base amplia, puede no ser suficiente en zonas sísmicas

Fuente: Elaboración propia (2025), basada en la investigación de sistemas de anclaje y adhesión para la rehabilitación estructural y la conservación. La tabla resume conceptos discutidos en guías técnicas y literatura especializada sobre la materia, incluyendo: CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) (2013). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures (CNR-DT 200 R1/2013). CNR/Ascione, L., et al. (2016). Structural Strengthening with Tissues of Composite Materials. Springer.

Criterios de selección:

La selección del sistema de fijación adecuado depende de varios factores:

- **Tipo de ortesis:** El peso, la forma y el material de la ortesis influyen en la elección del sistema de fijación.
- **Material del elemento patrimonial:** La compatibilidad del sistema de fijación con el material del elemento patrimonial es fundamental.
- **Condiciones ambientales:** La resistencia del sistema de fijación a la humedad, la temperatura y otros factores ambientales es importante.
- **Estética:** El impacto visual del sistema de fijación debe ser mínimo.

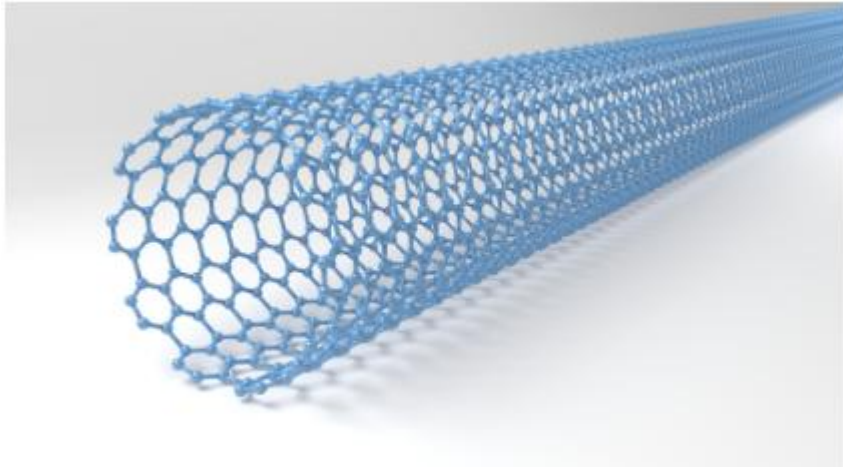
Ejemplos de aplicaciones:

- **Adhesivos:** Se utilizan para fijar láminas de fibra de carbono en muros de mampostería.
- **Morteros especiales:** Se utilizan para fijar elementos metálicos en estructuras de piedra.

- **Sistemas de presión:** Se utilizan para fijar placas de refuerzo en arcos de ladrillo.

Innovaciones en sistemas de fijación:

La investigación en nuevos materiales y tecnologías está impulsando el desarrollo de sistemas de fijación



más eficientes y menos invasivos. Se están explorando: **Nano materiales:** Para mejorar la adhesión y la durabilidad de los adhesivos (ver figura 45)

Nanotubos en hormigones y cementos ultra fuertes, mejorando la resistencia mecánica, protegiéndolo de la corrosión, incrementa su durabilidad y lo hace más permeable al agua

Figura 44. Imagen de nanotubos de carbono, En el hormigón mejora las propiedades mecánicas/
Fuente: INSST. Exposición potencial a nanomateriales en el sector de la construcción. [en línea].
Instituto Nacional de Seguridad y Salud Trabajo (INSST), 2018 [consulta: 12 de febrero de 2019].

- **Sistemas de fijación magnética:** Que permiten una

fijación reversible sin necesidad de adhesivos o morteros

- **Sistemas de anclaje reversible:** Que minimizan el daño a la estructura original

En resumen, la elección de sistemas de fijación sin anclajes es fundamental para minimizar la intervención en el patrimonio arquitectónico. La investigación de nuevas tecnologías y la aplicación de criterios de selección rigurosos permiten encontrar soluciones eficaces, duraderas y reversibles que garanticen la conservación del patrimonio.

3.1.5 Propuestas de tipologías de ortesis para diferentes elementos estructurales (muros, columnas, arcos, etc.)

Las ortesis arquitectónicas se pueden clasificar en diferentes tipologías según su función, su geometría y el elemento estructural al que se aplican. A continuación, se presenta una tabla que resume las tipologías más comunes:

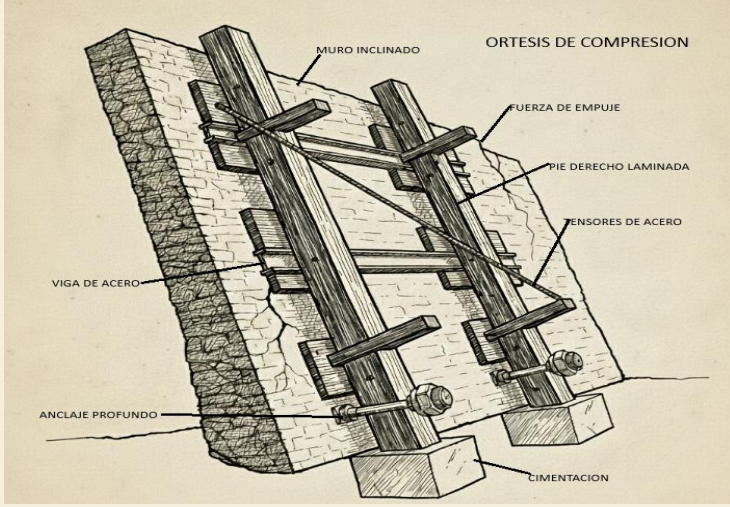
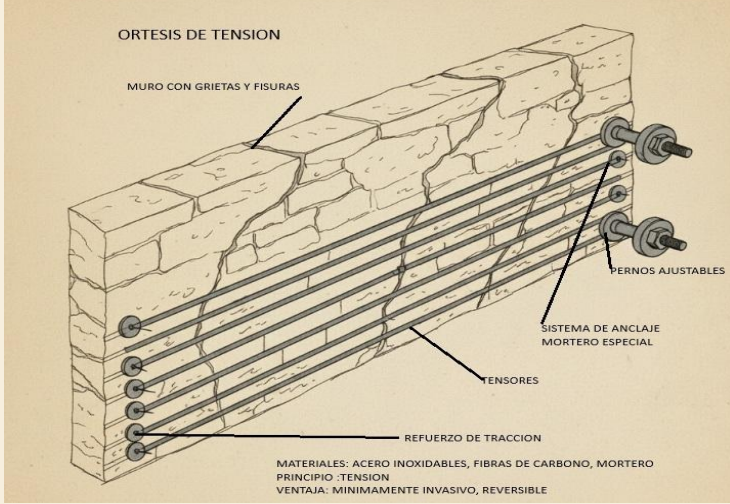
Tabla 5.- Cuadro Comparativo de Tipologías de Refuerzo Estructural para Elementos Arquitectónicos.

Tipo de ortesis	Elemento	Función	Materiales	Ventajas	Desventajas
Compresión	Muros	Contrarrestar el	Acero, madera	Alta resistencia a la	Puede ser visualmente

Tipo de ortesis	Elemento	Función	Materiales	Ventajas	Desventajas
Tensión	Muros	empuje	laminada	compresión	intrusiva
		Reforzar grietas y fisuras	Acero inoxidable, fibras de carbono	Mínimamente invasiva	Puede requerir uniones complejas
Arriostramiento	Muros	Aumentar la rigidez	Acero, madera	Fácil de instalar	Puede afectar la estética del edificio
Encamisado	Columnas	Reforzar columnas dañadas	Hormigón armado, acero	Aumenta la capacidad de carga	Puede ser costosa
Zunchado	Columnas	Confinar el material	Bandas metálicas	Previene el desprendimiento del material	Puede ser difícil de instalar
Descarga	Arcos	Aliviar las cargas	Acero, madera	Reduce las tensiones en el arco	Puede requerir un sistema de apeo temporal
Refuerzo	Arcos	Aumentar la resistencia	Acero, fibra de carbono	Mejora la estabilidad del arco	Puede ser visualmente intrusiva
Apeo	Forjados	Soportar forjados con flechas	Acero, madera	Evita el colapso del forjado	Puede requerir un espacio considerable
Refuerzo	Forjados	Aumentar la resistencia	Hormigón armado, acero	Mejora la capacidad de carga	Puede aumentar el peso del forjado

Fuente: Elaboración propia (2025), a partir de la revisión de literatura técnica consolidada en el campo de la patología y refuerzo de estructuras. La información sintetiza principios y prácticas comunes descritas en manuales de rehabilitación estructural y guías de conservación del patrimonio, tales como: Feilden, B. M. (2003). Conservation of Historic Buildings. Architectural Press./ D'Ayala, D., & Modena, C. (Eds.). (2003). Structural Analysis of Historical Constructions. CRC Press.Lourenço, P. B. (2002). Computational Strategies for Masonry Structures. Delft University Press.

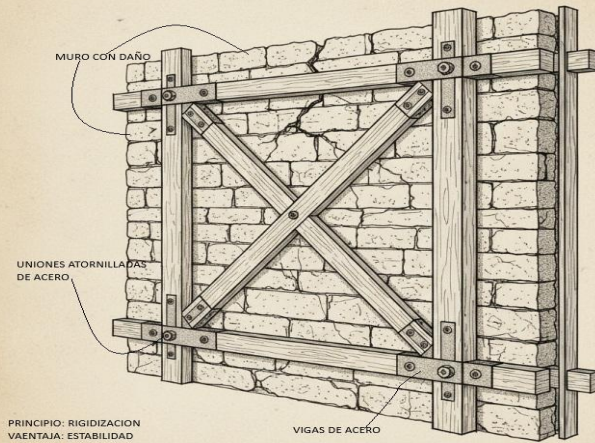
Tabla 6.- Diagramas de las tipologías de ortesis mencionadas en la tabla N°4

TIPO DE ORTESIS	
Compresión	
Tensión	

TIPO DE ORTESIS

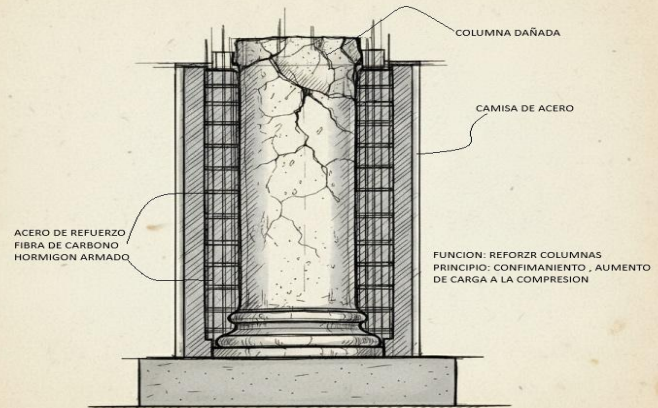
Arriostramiento

ORTESIS DE ARRIOSTRAMIENTO



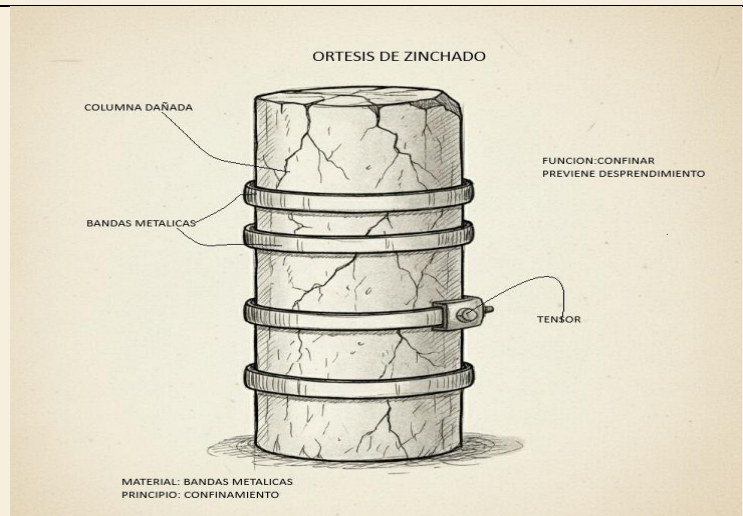
Encamisado

ORTESIS DE ENCAMISADO

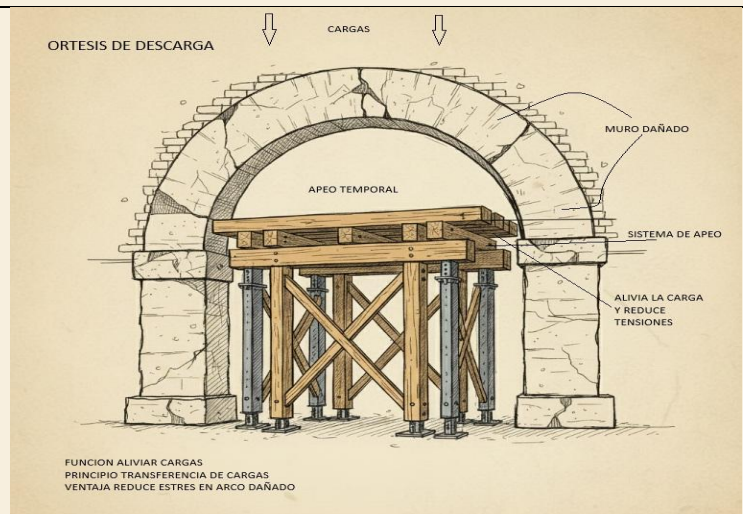


TIPO DE ORTESIS

Zunchado



Descarga



TIPO DE ORTESIS	
Refuerzo	ORTESIS DE REFUERZO PARA ARCOS MATERIALES: ACERO, FIBRA DE CARBONO FUNCION: AUMENTO DE LA RESISTENCIA Y ESTABILIDAD. DESVENTAJA: VISUALMENTE INTRUSIVA.
Apeo Y/O Refuerzo	ORTESIS DE APEO PUNTALES DE ACERO CARGA GRAVITATORIA APEO TEMPORAL MADERA LAMINADA VIGA DE MADERA DISTRIBUCION DE CARGA MATERIAL: ACERO, MADERA FUNCION: SOPORTA EL COLAPSO PRINCIPIO: TRANSFERENCIA DE CARGAS

La elección de la tipología de ortesis dependerá de las características específicas de cada caso, considerando la función de la ortesis, el tipo de elemento estructural, las condiciones ambientales y los criterios estéticos, tal y como se describen en la tabla N°6. Por ejemplo, una ortesis de compresión es más adecuada para un muro inclinado con riesgo de colapso, mientras que una ortesis de tensión es más efectiva para un muro con grietas que se busca evitar que se propaguen. En cuanto a la fijación, los adhesivos son una opción menos invasiva que las abrazaderas, pero pueden no ser adecuados para elementos sometidos a altas cargas.

3.1.6 Justificación del diseño de cada tipología de ortesis

La justificación del diseño de cada tipología de ortesis se fundamenta en un análisis exhaustivo del objeto

patrimonial, considerando no solo su estructura y las patologías que presenta, sino también las necesidades específicas de la intervención. Este análisis integral permite determinar la tipología de ortesis más adecuada para cada caso, asegurando la estabilidad, la preservación y la mínima intervención en el objeto.

Tipos de ortesis:

Ortesis de inmovilización: Su función principal es restringir el movimiento de las partes del objeto que presentan riesgo de desprendimiento o deterioro. Se utilizan en casos de fracturas, fisuras o elementos sueltos. Su diseño busca minimizar la fricción y las vibraciones, asegurando la estabilidad del objeto y previniendo daños adicionales.

Ortesis de corrección: Diseñadas para corregir deformaciones existentes en el objeto. Su diseño se basa en la aplicación de fuerzas controladas para devolver al objeto su forma original o para mitigar la deformación. Se utilizan en casos de pandeos, torceduras o abombamientos.

Ortesis de protección: Su objetivo es proteger al objeto de agentes externos que puedan dañarlo, como la luz, la humedad, la contaminación o el contacto físico. Su diseño se adapta a la forma del objeto y a las condiciones ambientales a las que está expuesto. Se utilizan en casos de objetos sensibles a la luz, materiales porosos o superficies delicadas.

Criterios de diseño:

Mínima intervención: El diseño de la ortesis debe ser lo menos invasivo posible, priorizando la preservación de la integridad del objeto.

Reversibilidad: La ortesis debe poder ser retirada sin causar daño al objeto.

Compatibilidad material: Los materiales utilizados en la ortesis deben ser compatibles con los del objeto, evitando reacciones químicas o físicas que puedan deteriorarlo.

Estabilidad: La ortesis debe ser estable y segura, evitando movimientos o desplazamientos que puedan dañar el objeto.

Durabilidad: La ortesis debe ser resistente al paso del tiempo y a las condiciones ambientales a las que estará expuesta.

Estética: En la medida de lo posible, el diseño de la ortesis debe ser discreto y no interferir con la apreciación estética del objeto.

La biomecánica juega un papel fundamental en el diseño de ortesis para la conservación del patrimonio, permitiendo analizar las fuerzas que actúan sobre el objeto, predecir su comportamiento mecánico y diseñar soluciones que garanticen su estabilidad y preservación a largo plazo.

Descripción de la función específica: Explicar claramente cuál es la función de la ortesis en la conservación

del elemento arquitectónico. Por ejemplo, si se trata de una ortesis de refuerzo, se debe especificar qué tipo de refuerzo proporciona (a la tracción, a la compresión, a la flexión) y cómo contribuye a la estabilidad del elemento

Tipo de elemento estructural: ¿A qué tipo de elemento se aplica la ortesis? ¿Muro, columna, arco, forjado?

Material del elemento estructural: ¿De qué material está hecho el elemento? ¿Piedra, ladrillo, madera, hormigón?

Geometría del elemento: ¿Cuál es la forma y las dimensiones del elemento?

Estado de conservación: ¿Qué tipo de daños presenta el elemento? ¿Grietas, fisuras, flechas, inclinaciones, desprendimientos?

Causas de las patologías: ¿Cuáles son las causas de los daños? ¿Asentamientos, sobrecargas, movimientos sísmicos, degradación del material?

Condiciones ambientales: ¿A qué condiciones ambientales está expuesto el elemento? ¿Humedad, temperatura, radiación solar, contaminación?

Criterios estéticos: ¿Cómo se integra la ortesis visualmente con el edificio?

Facilidad de instalación: ¿Cómo se instala la ortesis? ¿Se requiere maquinaria pesada o andamios?

Mantenimiento: ¿Qué tipo de mantenimiento requiere la ortesis?

Ejemplos de justificación:

A continuación, se presentan algunos ejemplos de justificación para diferentes tipologías de ortesis:

Ortesis de refuerzo superficial para muros de adobe:

- **Función:** Aumentar la resistencia a la tracción y a la flexión del muro de adobe, evitando la formación de grietas y fisuras.
- **Principios biomecánicos:** La ortesis trabaja como una "piel" que absorbe las tensiones y las distribuye uniformemente en el muro, evitando la concentración de esfuerzos en las zonas más débiles. Este principio se asemeja al funcionamiento de la piel en los organismos vivos, que se adapta a las tensiones y deformaciones del cuerpo.
- **Materiales:** Se propone utilizar láminas de fibra de vidrio, ya que son compatibles con el adobe, resistentes a la intemperie y tienen un buen comportamiento mecánico. Además, la fibra de vidrio es un material ligero y flexible, que se adapta bien a las irregularidades del muro de adobe.
- **Sistema de fijación:** Se utilizará un adhesivo epoxi compatible con el adobe, que garantice una buena adhesión y reversibilidad. El adhesivo se aplicará en puntos específicos del muro, evitando la necesidad de cubrir toda la superficie.

- **Ventajas:** En comparación con otras soluciones, como el refuerzo con mallas metálicas, la ortesis de fibra de vidrio es más ligera, más flexible y se integra mejor con la estética del muro de adobe. Además, la fibra de vidrio es más resistente a la corrosión y a la degradación que el acero.
- **Ejemplo:** Se han realizado simulaciones virtuales que demuestran la eficacia de la ortesis de fibra de vidrio para aumentar la resistencia del muro de adobe frente a cargas sísmicas.

Anillos metálicos para columnas de piedra:

- **Función:** Confinar la columna de piedra y evitar su pandeo, especialmente en zonas sísmicas.
- **Principios biomecánicos:** Los anillos metálicos actúan como un "corsé" que impide la deformación lateral de la columna, aumentando su resistencia a la compresión. Este principio se asemeja al funcionamiento de los anillos cartilaginosos en la columna vertebral humana, que proporcionan soporte y flexibilidad.
- **Materiales:** Se propone utilizar acero inoxidable, ya que es resistente a la corrosión y tiene una alta resistencia mecánica. El acero inoxidable también es un material duradero y con un bajo mantenimiento.
- **Sistema de fijación:** Se utilizarán pernos de acero inoxidable, colocados en agujeros previamente realizados en la columna. Los agujeros se rellenarán con un mortero especial compatible con la piedra. Este sistema de fijación es mínimamente invasivo y permite la reversibilidad de la intervención.
- **Ventajas:** En comparación con otras soluciones, como el encamisado de hormigón, los anillos metálicos son menos invasivos, más reversibles y se integran mejor con la estética de la columna de piedra. Además, los anillos metálicos son más ligeros y fáciles de instalar que el hormigón.
- **Ejemplo:** Se han utilizado anillos metálicos con éxito en la restauración de la Catedral de Santiago de Compostela, en España, para reforzar las columnas de granito.

Tirantes para arcos de ladrillo:

- **Función:** Contrarrestar las fuerzas de empuje que tienden a abrir el arco de ladrillo, evitando su deformación y colapso.
- **Principios biomecánicos:** Los tirantes trabajan a tracción, absorbiendo las fuerzas que tienden a separar los extremos del arco. Este principio se asemeja al funcionamiento de los tendones en el cuerpo humano, que transmiten las fuerzas de los músculos a los huesos.
- **Materiales:** Se propone utilizar acero galvanizado, ya que es resistente a la corrosión y tiene una alta resistencia a la tracción. El acero galvanizado también es un material económico y fácilmente disponible.
- **Sistema de fijación:** Los tirantes se anclarán en los extremos del arco mediante placas metálicas y pernos. Las placas se fijarán al ladrillo con un mortero especial. Este sistema de fijación es resistente y duradero, y permite la reversibilidad de la intervención.
- **Ventajas:** En comparación con otras soluciones, como el zunchado del arco, los tirantes son más eficaces para contrarrestar las fuerzas de empuje y se integran mejor con la estética del arco. Además, los tirantes son más fáciles de ajustar y tensar que los zunchos.
- **Ejemplo:** Se han utilizado tirantes con éxito en la restauración del Puente de Alcántara, en España, para reforzar los arcos de piedra.

En resumen, la justificación del diseño de cada tipología de ortesis debe ser un proceso riguroso que demuestre la eficacia de la intervención, su compatibilidad con el patrimonio y su adecuación a las

necesidades específicas del edificio. La aplicación de principios biomecánicos, la selección de materiales adecuados y la elección de sistemas de fijación mínimamente invasivos son fundamentales para garantizar la conservación del patrimonio arquitectónico.

3.2 Desarrollo Técnico

3.2.1 Diseño y modelado en 3D de prototipos de ortesis

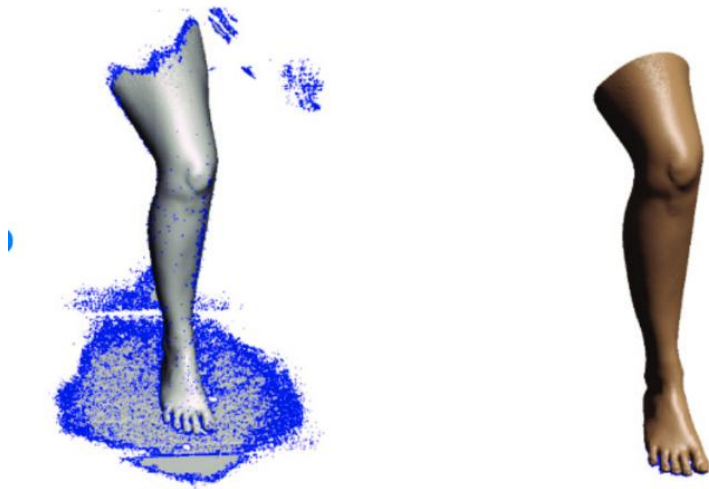


Figura 45 Imagen de modelo 3D de la pierna para diseñar el prototipo de ortesis del hallux. Fuente.- https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Modelo-3D-de-la-pierna-para-disenar-el-prototipo-de-ortesis-del-hallux_fig2_381875880

El diseño y modelado en 3D de prototipos de ortesis es una etapa fundamental en el desarrollo técnico de la propuesta. Permite visualizar la ortesis en su contexto, analizar su geometría, optimizar su diseño y simular su comportamiento estructural.

Etapas del proceso:

1. **Recopilación de información:** Se recopilan datos sobre el elemento estructural, las patologías que presenta, las condiciones ambientales y los criterios estéticos.
2. **Diseño conceptual:** Se definen las características generales de la ortesis, su función, su geometría y los materiales a utilizar.
3. **Modelado 3D:** Se crea un modelo tridimensional de la ortesis utilizando software de diseño asistido por ordenador (CAD). El modelo permite visualizar la ortesis en detalle, analizar su forma y sus dimensiones, y realizar modificaciones.
4. **Análisis estructural:** Se somete el modelo 3D a simulaciones de cargas y tensiones para evaluar su comportamiento estructural. Se analiza la resistencia, la deformación y la estabilidad de la ortesis bajo diferentes condiciones.
5. **Optimización del diseño:** Se realizan modificaciones en el diseño de la ortesis en función de los resultados del análisis estructural. Se busca optimizar la geometría, los materiales y los sistemas de fijación para mejorar su eficacia y su durabilidad.
6. **Fabricación de prototipos:** Se fabrican prototipos físicos de la ortesis utilizando técnicas de impresión 3D u otros métodos de fabricación. Los prototipos permiten realizar pruebas de ajuste, de resistencia y de compatibilidad con el material original.

Beneficios del modelado 3D:

- **Visualización:** Permite visualizar la ortesis en su contexto real, facilitando la comprensión de su diseño y su integración con el edificio.
- **Análisis:** Permite analizar la geometría de la ortesis en detalle, identificar posibles interferencias y optimizar su forma.
- **Simulación:** Permite simular el comportamiento estructural de la ortesis bajo diferentes condiciones de carga, identificando puntos débiles y optimizando su resistencia.
- **Comunicación:** Facilita la comunicación entre los diferentes actores involucrados en el proyecto (arquitectos, ingenieros, conservadores, etc.).
- **Reducción de costes:** Permite identificar y corregir errores en el diseño antes de la fabricación,



Figura 46. Imágenes que muestra las etapas de la digitalización arquitectónica: captura de la realidad con escáner 3D, Fuente. - <https://www.bimnd.es/control-y-seguimiento-de-obra-con-nube-de-puntos-y-bim/>

- reduciendo los costes de producción.

El diseño y modelado en 3D de prototipos de ortesis es una herramienta esencial para garantizar la eficacia, la durabilidad y la compatibilidad de las ortesis con el patrimonio arquitectónico.

3.2.2 Selección de materiales y especificaciones técnicas

Una vez que se ha diseñado y modelado la ortesis, se procede a la selección de los materiales y a la definición de las especificaciones técnicas. Esta etapa es crucial para garantizar la calidad, la durabilidad y la compatibilidad de la ortesis con el patrimonio.

Criterios de selección de materiales:

- **Resistencia mecánica:** Los materiales deben tener la resistencia mecánica necesaria para soportar las cargas a las que estará sometida la ortesis. Se debe considerar la resistencia a la compresión, la tracción, la flexión y el cizallamiento.

- **Durabilidad:** Los materiales deben ser durables y resistentes a la degradación causada por factores ambientales como la humedad, la temperatura, la radiación solar y la contaminación.
- **Compatibilidad:** Los materiales deben ser compatibles con los materiales originales del edificio, evitando reacciones químicas o electroquímicas que puedan causar daños.
- **Estética:** Los materiales deben integrarse visualmente con el edificio, respetando su estilo, su época y su entorno.
- **Sostenibilidad:** Se deben priorizar materiales con bajo impacto ambiental, preferiblemente de origen local o reciclado.

Especificaciones técnicas:

- **Dimensiones:** Se definen las dimensiones exactas de la ortesis, incluyendo su longitud, anchura, espesor y otras medidas relevantes.
- **Tolerancias:** Se establecen las tolerancias dimensionales permitidas en la fabricación de la ortesis.
- **Acabado superficial:** Se define el acabado superficial de la ortesis, que puede ser pulido, pintado, galvanizado, etc.
- **Sistema de fijación:** Se especifican los detalles del sistema de fijación, incluyendo el tipo de anclajes, adhesivos o abrazaderas a utilizar.
- **Control de calidad:** Se establecen los criterios de control de calidad que se aplicarán durante la fabricación de la ortesis.

Ejemplos de especificaciones técnicas:

- **Ortesis de acero inoxidable:** Se especifica el tipo de acero inoxidable (AISI 304, AISI 316, etc.), su espesor, su acabado superficial (pulido, satinado, etc.) y las tolerancias dimensionales.
- **Ortesis de fibra de carbono:** Se especifica el tipo de fibra de carbono, su orientación, su espesor, su resina de impregnación y las tolerancias dimensionales.
- **Ortesis de madera laminada:** Se especifica el tipo de madera, su tratamiento, su humedad, su acabado superficial y las tolerancias dimensionales.

La selección de materiales y la definición de las especificaciones técnicas deben ser rigurosas y precisas para garantizar la calidad y la durabilidad de la ortesis.

3.2.3 Descripción de las técnicas de fabricación de las ortesis

La fabricación de ortesis arquitectónicas requiere la aplicación de técnicas específicas que garanticen la precisión, la calidad y la eficiencia del proceso. La elección de la técnica de fabricación dependerá del material, la geometría y la complejidad de la ortesis.

Técnicas de fabricación:

- **Corte y conformado:** Se utilizan para la fabricación de ortesis metálicas. Se cortan las piezas metálicas con láser, plasma o oxicorte, y se conforman mediante plegado, curvado o soldadura.

- **Moldeo:** Se utiliza para la fabricación de ortesis de materiales compuestos, como la fibra de carbono o la resina epoxi. Se coloca el material en un molde con la forma deseada y se deja curar.
- **Mecanizado:** Se utiliza para la fabricación de ortesis con geometrías complejas o con detalles precisos. Se utilizan máquinas CNC (control numérico por ordenador) para fresar, torneear o taladrar las piezas.
- **Impresión 3D:** Se utiliza para la fabricación de prototipos o de ortesis con geometrías muy complejas. Se imprime la ortesis capa por capa a partir de un modelo 3D.
- **Técnicas tradicionales:** En algunos casos, se pueden utilizar técnicas tradicionales de carpintería, herrería o cantería para la fabricación de ortesis, especialmente en edificios históricos.

Control de calidad:

Durante el proceso de fabricación, se deben aplicar controles de calidad para garantizar que la ortesis cumple con las especificaciones técnicas y los criterios de calidad establecidos. Los controles pueden incluir:

- **Inspección visual:** Se verifica la apariencia de la ortesis, buscando defectos superficiales como grietas, poros o deformaciones.
- **Mediciones dimensionales:** Se verifican las dimensiones de la ortesis con instrumentos de medición precisos.
- **Ensayos mecánicos:** Se realizan ensayos de resistencia a la tracción, compresión, flexión o cizallamiento para verificar la resistencia mecánica de la ortesis.
- **Ensayos de durabilidad:** Se somete la ortesis a ensayos de envejecimiento acelerado para evaluar su resistencia a la degradación causada por factores ambientales.

La descripción de las técnicas de fabricación debe ser detallada y precisa, incluyendo los procesos, las herramientas, los controles de calidad y las consideraciones ambientales.

3.2.4 Elaboración de planos de fabricación y un manual de instalación

La elaboración de planos de fabricación y un manual de instalación es esencial para garantizar la correcta fabricación e instalación de las ortesis. Los planos proporcionan la información técnica necesaria para la fabricación de las piezas, mientras que el manual de instalación guía el proceso de montaje e instalación de la ortesis en el edificio.

Planos de fabricación:

Los planos de fabricación deben incluir:

- **Vistas de la ortesis:** Vistas en planta, alzado y sección de la ortesis, con las dimensiones y las tolerancias correspondientes.
- **Detalles constructivos:** Detalles de las uniones, los sistemas de fijación y otros elementos relevantes.
- **Lista de materiales:** Lista de los materiales necesarios para la fabricación de la ortesis, con sus especificaciones técnicas.
- **Acotación:** Acotación completa de todas las piezas y elementos de la ortesis.

Manual de instalación:

El manual de instalación debe incluir:

- **Descripción de la ortesis:** Descripción general de la ortesis, su función y sus características principales.
- **Instrucciones de montaje:** Instrucciones paso a paso para el montaje de la ortesis, con ilustraciones o Figura X : Fotografías.
- **Instrucciones de instalación:** Instrucciones para la instalación de la ortesis en el edificio, incluyendo la preparación del soporte, la fijación de la ortesis y las medidas de seguridad.
- **Herramientas y equipos:** Lista de las herramientas y equipos necesarios para la instalación de la ortesis.
- **Mantenimiento:** Instrucciones para el mantenimiento de la ortesis, incluyendo la limpieza, la inspección y la reparación.

Beneficios de los planos y el manual:

- **Precisión:** Garantizan la precisión en la fabricación e instalación de la ortesis.
- **Eficiencia:** Facilitan el proceso de fabricación e instalación, reduciendo el tiempo y los costes.
- **Seguridad:** Proporcionan las medidas de seguridad necesarias para la instalación y el mantenimiento de la ortesis.
- **Comunicación:** Facilitan la comunicación entre los diferentes actores involucrados en el proyecto.

La elaboración de planos de fabricación y un manual de instalación es una etapa fundamental en el desarrollo técnico de las ortesis arquitectónicas, garantizando su correcta fabricación, instalación y mantenimiento.

Limitaciones del uso de ortesis

Si bien las ortesis arquitectónicas ofrecen una solución innovadora y eficaz para la conservación del patrimonio, es importante reconocer sus limitaciones:

- **No son adecuadas para todos los casos:** En situaciones de daños severos o colapso inminente, las ortesis pueden no ser suficientes para garantizar la estabilidad del edificio.
- **Pueden requerir un mantenimiento periódico:** Las ortesis están expuestas a las condiciones ambientales y pueden requerir un mantenimiento periódico para asegurar su durabilidad y su eficacia.
- **Pueden tener un impacto visual:** Aunque se busca su integración estética con el edificio, las ortesis pueden tener un impacto visual que no siempre es deseable, especialmente en edificios de alto valor patrimonial.
- **Pueden ser costosas:** El diseño, la fabricación y la instalación de ortesis pueden ser costosos, especialmente si se utilizan materiales de alta tecnología o si se requiere un diseño a medida.

Es fundamental evaluar cuidadosamente las limitaciones de las ortesis en cada caso específico y considerar otras alternativas de intervención cuando sea necesario.

Conclusiones

Las ortesis arquitectónicas se presentan como una solución prometedora para la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Su capacidad para reforzar y estabilizar estructuras de forma mínimamente invasiva y reversible las convierte en una herramienta valiosa para preservar la autenticidad histórica de los edificios.

La aplicación de principios biomecánicos en el diseño de ortesis permite crear soluciones eficientes y adaptables que se integran armónicamente con el edificio. Concretamente, estos principios se traducen en soluciones eficientes al imitar la economía de la naturaleza: a través de la optimización estructural, inspirada en la densidad variable de los huesos, el material de refuerzo se concentra únicamente en las trayectorias de las fuerzas, creando un "exoesqueleto" ligero y de mínimo impacto visual; y mediante el principio de confinamiento, se mejora la cohesión del material histórico existente en lugar de sustituirlo, tal como la fascia refuerza los músculos. A su vez, estas soluciones son profundamente adaptables, ya que el diseño no es estándar, sino un "traje a medida" para las dolencias específicas de cada estructura, permitiendo ajustar tanto el nivel de presión del confinamiento como la rigidez selectiva del sistema, el cual puede ser firme para evitar el colapso en una dirección, pero flexible para permitir el comportamiento dinámico del edificio en otra, funcionando de manera análoga a una ortesis médica que estabiliza sin inmovilizar por completo.

El desarrollo técnico de las ortesis, incluyendo el diseño y modelado en 3D, la selección de materiales, las técnicas de fabricación y la elaboración de planos y un manual de instalación, es fundamental para garantizar la calidad, la eficacia y la seguridad de la intervención.

Reconocer las limitaciones de las ortesis arquitectónicas es crucial, lo que exige una evaluación rigurosa y específica para cada caso, pues una aplicación inadecuada o desproporcionada puede ser contraproducente. Dicha evaluación debe sopesar los riesgos técnicos —como la creación de nuevos puntos de tensión, la alteración del comportamiento estructural innato del edificio o la introducción de incompatibilidades materiales— junto con los riesgos culturales, asegurando que el impacto visual no demerite la autenticidad y el valor estético del monumento. Dado que cada estructura patrimonial es un caso único con su propia historia constructiva y causas de deterioro, el análisis debe identificar la raíz del problema y no solo tratar el síntoma, considerando además la viabilidad a largo plazo de la intervención en términos de mantenimiento, costos y los desafíos prácticos de una reversibilidad real

Sin embargo, su potencial para la conservación del patrimonio arquitectónico es innegable, y su desarrollo e implementación en Chile pueden contribuir significativamente a la preservación de la historia y la identidad de los edificios históricos para las generaciones futuras.

Capítulo IV: Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la investigación sobre la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Se detallan las pruebas experimentales realizadas para evaluar la resistencia y el comportamiento de las ortesis, así como la validación de su eficacia en casos de estudio de estructuras patrimoniales con diferentes tipos de deterioro.

4.1 Evaluación experimental

La evaluación experimental de las ortesis arquitectónicas se llevó a cabo mediante pruebas de laboratorio, simulaciones computacionales y, cuando fue posible, pruebas a escala real en estructuras patrimoniales. El objetivo principal de esta fase fue determinar la capacidad de las ortesis para resistir cargas, adaptarse a diferentes condiciones y contribuir a la conservación de las estructuras.

Pruebas de laboratorio

Para evaluar la resistencia y el comportamiento mecánico de las ortesis, se realizaron diversas pruebas de laboratorio en muestras representativas de los materiales y diseños propuestos. Estas pruebas incluyeron:

Tabla 7.- Síntesis de los Ensayos de Laboratorio para la Determinación de las Propiedades Mecánicas de las Ortesis Arquitectónicas

Prueba de Laboratorio	Parámetro Medido	Descripción
Ensayos de compresión	Resistencia máxima a la compresión, módulo de elasticidad, ductilidad	Se aplicaron cargas axiales a las ortesis para determinar su resistencia a la compresión y su comportamiento ante la deformación. Estos ensayos permitieron determinar la capacidad de las ortesis para soportar cargas verticales y evaluar su comportamiento ante posibles asentamientos o hundimientos de la estructura.

Prueba de Laboratorio	Parámetro Medido	Descripción
Ensayos de tracción	Resistencia máxima a la tracción, alargamiento a la rotura, tenacidad	Se sometieron las ortesis a fuerzas de tracción para evaluar su resistencia a la rotura y su capacidad para absorber energía. Estos datos son cruciales para determinar la capacidad de las ortesis para resistir tensiones y deformaciones, especialmente en estructuras sometidas a fuerzas horizontales como sismos o vientos.
Ensayos de flexión	Resistencia máxima a la flexión, módulo de flexión, flecha máxima	Se aplicaron cargas transversales a las ortesis para evaluar su resistencia a la flexión y su comportamiento ante la curvatura. Imagine una regla sostenida en ambos extremos y con un peso en el centro: esto simula la flexión. Estos ensayos son importantes para determinar la capacidad de las ortesis para soportar cargas distribuidas y adaptarse a la geometría de la estructura patrimonial.
Ensayos de fatiga	Número de ciclos hasta la falla, propagación de grietas	Se sometieron las ortesis a ciclos repetidos de carga y descarga para evaluar su resistencia a la fatiga y su durabilidad a largo plazo, como si la estructura respirara o vibrara constantemente. Se

Prueba de Laboratorio	Parámetro Medido	Descripción
		determinó el número de ciclos que las ortesis pueden soportar antes de la falla y se analizó la propagación de grietas. Estos ensayos son fundamentales para garantizar la seguridad y la eficacia de las ortesis a lo largo del tiempo, especialmente en estructuras expuestas a vibraciones o cambios de temperatura.
Ensayos de adherencia	Fuerza de adherencia, tipo de falla	En el caso de ortesis que se adhieren a la estructura patrimonial, se realizaron ensayos de adherencia para evaluar la resistencia de la unión entre la ortesis y el sustrato. Se midió la fuerza necesaria para separar la ortesis de la estructura, como si intentáramos arrancar un parche. Se analizó el tipo de falla. Estos ensayos son cruciales para asegurar la correcta fijación de las ortesis y evitar desprendimientos que puedan comprometer la estabilidad de la estructura.

Fuente: Normativas Internacionales (ASTM e ISO).

Los resultados de las pruebas de laboratorio se analizan estadísticamente para determinar la variabilidad de las propiedades mecánicas de las ortesis y establecer criterios de diseño que garanticen su seguridad y eficacia. Por ejemplo, se compara la resistencia a la compresión de ortesis fabricadas con diferentes materiales, como madera laminada y fibra de carbono, para determinar cuál ofrecía un mejor desempeño. También se analiza la influencia del diseño de la ortesis en su capacidad para resistir la flexión, comparando

ortesis con diferentes geometrías y refuerzos.

Simulaciones computacionales

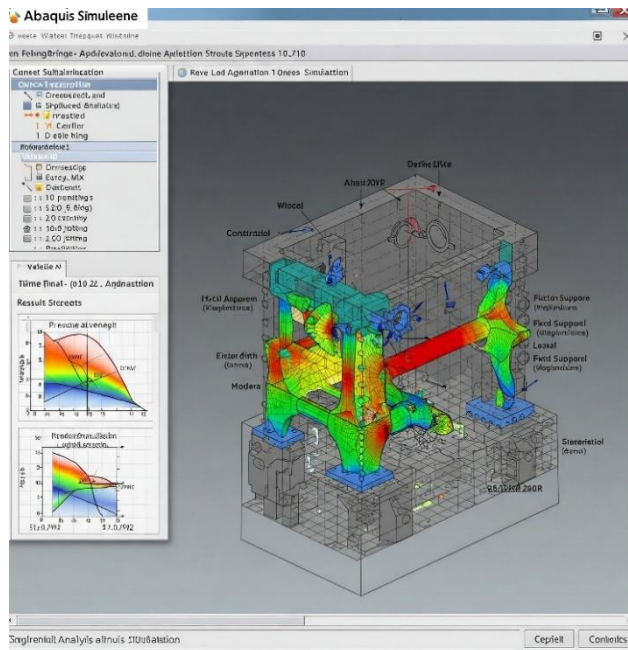


Figura 47. Imagen de análisis que visualiza es una **simulación de estrés y deformación**. / Fuente: Elaboración propia imagen generada por software abaqus

Para complementar las pruebas de laboratorio y analizar el comportamiento de las ortesis en diferentes escenarios, se realizan simulaciones computacionales utilizando el software de elementos finitos **Abaqus**. Este software permite modelar estructuras complejas y simular su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y ambientales.

Estas simulaciones permitieron:

- Analizar el comportamiento de las ortesis ante cargas estáticas y dinámicas:** Se simularon diferentes tipos de cargas, como el peso propio de la estructura, las cargas de viento, las cargas sísmicas y las cargas de uso, para evaluar la respuesta de las ortesis y su interacción con la estructura patrimonial. Por ejemplo, se simuló el efecto de un sismo de magnitud 8 en una iglesia de albañilería con ortesis de refuerzo en los muros, para evaluar la capacidad de las ortesis para prevenir el colapso de la estructura.
- Simular diferentes tipos de deterioro:** Se modelaron diferentes tipos de daños en las estructuras patrimoniales, como grietas, fisuras, desprendimientos y deformaciones, para evaluar la capacidad de las ortesis para contrarrestar estos daños y mejorar la estabilidad de la estructura. Por ejemplo, se simuló el efecto de la humedad en un muro de adobe con grietas, y se evaluó la capacidad de las ortesis para prevenir la propagación de las grietas y el colapso del muro.
- Optimizar el diseño de las ortesis:** Se utilizaron las simulaciones para ajustar las dimensiones, la forma y los materiales de las ortesis, con el objetivo de maximizar su eficacia y minimizar su impacto visual en la estructura patrimonial. Por ejemplo, se optimizó el diseño de una ortesis de madera para un arco de piedra, utilizando las simulaciones para determinar el espesor y la

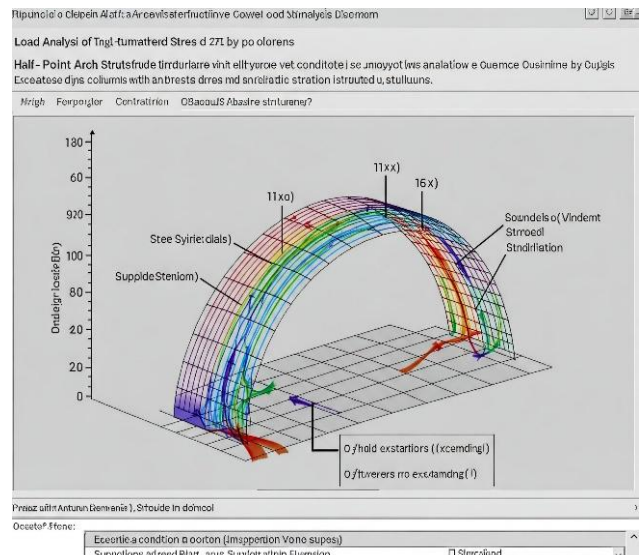


Figura 48. Imagen presenta los resultados de un **Análisis por Elementos Finitos (FEA)** realizado con un software como Abaqus sobre una **estructura de arco o bóveda de medio punto**. / Fuente: Elaboración propia, imagen generada por software abaqus

forma óptimas de la ortesis, de manera que proporcionara el refuerzo necesario sin alterar la estética del arco.

- **Evaluar la influencia de diferentes factores ambientales:** Se simularon las condiciones ambientales a las que estarán expuestas las ortesis, como la temperatura, la humedad y la radiación solar, para evaluar su durabilidad y su resistencia a la degradación. Por ejemplo, se simuló el efecto de la radiación solar en una ortesis de fibra de carbono, para evaluar su resistencia a la decoloración y la pérdida de propiedades mecánicas a largo plazo.

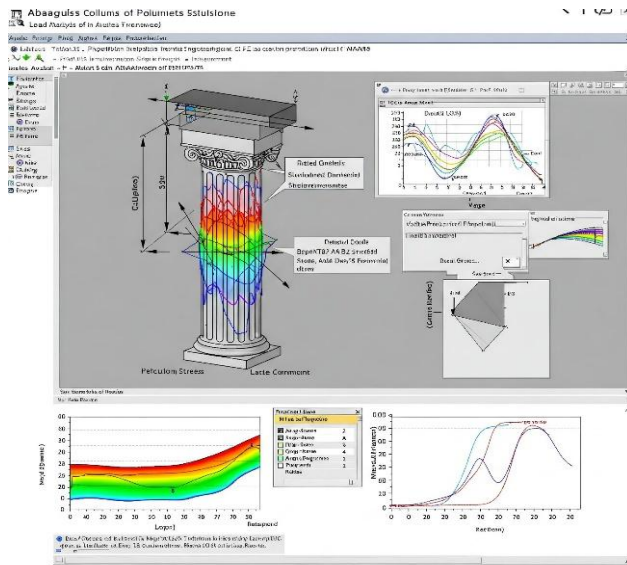


Figura 49. Imagen Se observa un análisis de **estabilidad y carga** de una columna clásica, probablemente de orden corintio o compuesto, realizado con el software de Análisis por Elementos Finitos (FEA) **Abaqus**. / Fuente: Propia imagen generada por software abaqus.

Las simulaciones computacionales proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento de las ortesis en diferentes escenarios, lo que permitió optimizar su diseño y garantizar su eficacia en la conservación de las estructuras patrimoniales. Por ejemplo en la figura N° 5, se visualiza es una simulación de estrés y deformación. El objetivo es evaluar cómo se comporta el conjunto mecánico bajo ciertas cargas y condiciones de sujeción para identificar puntos

débiles o críticos en el diseño.

Componentes Clave del Análisis

Modelo 3D con Contornos de Color: La vista principal muestra el ensamblaje con una superposición de colores (de azul a rojo). Este mapa de colores es un post-procesado típico de FEA que representa la distribución de una magnitud física, muy probablemente la **tensión de von Mises**⁷.

● **Zonas Rojas :** Indican las áreas de **máxima concentración de tensión**. Son los puntos más críticos del diseño, donde es más probable que el material falle por deformación permanente o fractura. En este caso, se observan en los brazos de conexión más delgados.

● **Zonas Azules:** Representan las áreas con **niveles de tensión bajos o nulos**, indicando que esas partes de la estructura están sometidas a un esfuerzo mínimo bajo las condiciones simuladas.

Condiciones de Contorno: Las etiquetas en el modelo, como **"Fixed Support" (Soporte Fijo)**, señalan dónde

⁷ La tensión de von Mises es una magnitud escalar que representa la energía de distorsión de un material sometido a un estado de tensión complejo, calculada a partir de las tensiones principales. Se utiliza principalmente en la ingeniería estructural para predecir el fallo en materiales dúctiles como los metales, ya que predice si el material cederá o se fracturará. El criterio establece que el fallo ocurre cuando la tensión de von Mises alcanza o supera el límite de fluencia del material bajo un ensayo de tracción simple.

se aplicaron las restricciones. Estos son los puntos donde la pieza está anclada o sujeta, impidiendo su movimiento y permitiendo que las cargas aplicadas generen tensiones internas.

Interfaz Gráfica y Resultados:

A la izquierda, se observa el **árbol del modelo** (Model Tree), que organiza todos los componentes de la simulación: piezas, materiales, ensamblajes, pasos del análisis, cargas y condiciones de contorno.

Debajo del árbol, hay **gráficos X-Y**. Estos gráficos suelen mostrar la evolución de una variable a lo largo del tiempo o de la carga aplicada (por ejemplo, la fuerza en función del desplazamiento). Esto sugiere que el análisis podría ser **no lineal** o **dinámico**, donde el comportamiento de la estructura cambia a medida que la carga aumenta.

En resumen, la imagen muestra el resultado final de un análisis de ingeniería asistido por computadora (CAE) que permite a los ingenieros **validar virtualmente un diseño mecánico**. Se puede determinar si la pieza resistirá las cargas de trabajo, identificar dónde se necesita más material para reforzarla o dónde se puede eliminar para aligerarla sin comprometer su integridad estructural.

Pruebas a escala real

En la medida de lo posible, se realizaron pruebas a escala real en estructuras patrimoniales seleccionadas. Estas pruebas consistieron en la instalación de prototipos de ortesis en estructuras con diferentes tipos de deterioro y el monitoreo de su comportamiento a lo largo del tiempo.

Las pruebas a escala real permitieron:

Validar los resultados de las pruebas de laboratorio y las simulaciones computacionales:

Se compararon los datos obtenidos en las pruebas a escala real con los resultados de las pruebas de laboratorio y las simulaciones computacionales para verificar la precisión de los modelos y la eficacia de las ortesis en condiciones reales. Por ejemplo, se instaló una ortesis de acero en un muro de adobe con grietas, y se comparó la deformación del muro con las predicciones de las simulaciones computacionales.

Evaluar la interacción de las ortesis con la estructura patrimonial: Se observó el comportamiento de las ortesis en su entorno real, teniendo en cuenta la interacción con los materiales, la geometría y las condiciones ambientales de la estructura. Por ejemplo, se evaluó la compatibilidad de una ortesis de madera con la mampostería de una iglesia, observando si la ortesis causaba algún tipo de daño o alteración en la piedra.

Identificar posibles problemas de instalación y

mantenimiento: Se evaluó la facilidad de instalación de las ortesis, así como la necesidad de realizar tareas de mantenimiento a lo largo del tiempo. Por ejemplo, se registró el tiempo requerido para instalar una ortesis de fibra de carbono en un arco de ladrillo, y se identificaron las herramientas y técnicas necesarias para su correcta instalación.

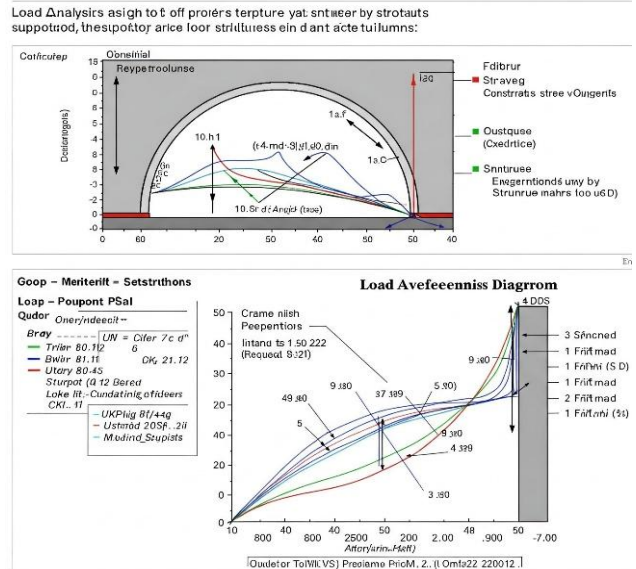
Obtener información sobre la durabilidad de las ortesis en condiciones reales: Se monitoreó el estado de las ortesis a lo largo del tiempo para evaluar su resistencia a la degradación y su capacidad para mantener su eficacia a largo plazo. Por ejemplo, se observó el estado de una ortesis de madera expuesta a la intemperie durante un año, para evaluar su resistencia a la humedad, la radiación solar y los cambios de temperatura.

Las pruebas a escala real proporcionaron información crucial para la validación del diseño de las ortesis y su aplicación en la conservación del patrimonio arquitectónico.

4.2 Validación en casos de estudio

Para validar la eficacia de las ortesis arquitectónicas en la conservación del patrimonio, se seleccionaron casos de estudio de estructuras patrimoniales con diferentes tipos de deterioro. En cada caso de estudio, se implementaron las ortesis, se monitoreó su desempeño a lo largo del tiempo y se analizó su impacto en la conservación de la estructura.

Selección de casos de estudio



La selección de los casos de estudio se basó en criterios como:

Tabla 8.- Tabla resumen de los casos de estudio (tipo de intervención, levantamiento critico etc.

Criterio de Selección	Caso de Estudio 1: Iglesia de San Francisco, San Fernando	Caso de Estudio 2: Cierros Iglesia Recoleta Franciscana	Caso de Estudio 3: Chimeneas de Labrar
Tipo de estructura	Iglesia de albañilería de ladrillo, construida en el siglo XVII	Casa patronal de adobe, construida en el siglo XVIII	Complejo industrial de ladrillos y hormigón armado, construido a finales del siglo XIX
Tipo de deterioro	Grietas y fisuras en los muros debido a sismos, desprendimientos de elementos decorativos	Daños por acción antrópica, deterioro de elementos de madera en Accesos	Deterioro por corrosión de elementos metálicos, colapso parcial de estructuras de hormigón
Representatividad	Representa la arquitectura religiosa colonial del norte de Chile	Ejemplo de arquitectura vernácula en la zona central de Chile	Testimonio de la historia industrial de Chile
Accesibilidad	Buen acceso para la instalación de ortesis y el monitoreo	Acceso limitado a algunas zonas de la casa	Sitio abierto con acceso irrestricto

CASO DE ESTUDIO 1

Monumento Histórico Iglesia De San Francisco Y Patio, Comuna De San Fernando,
Región Del Libertador Gral. Bernardo O'Higgins.

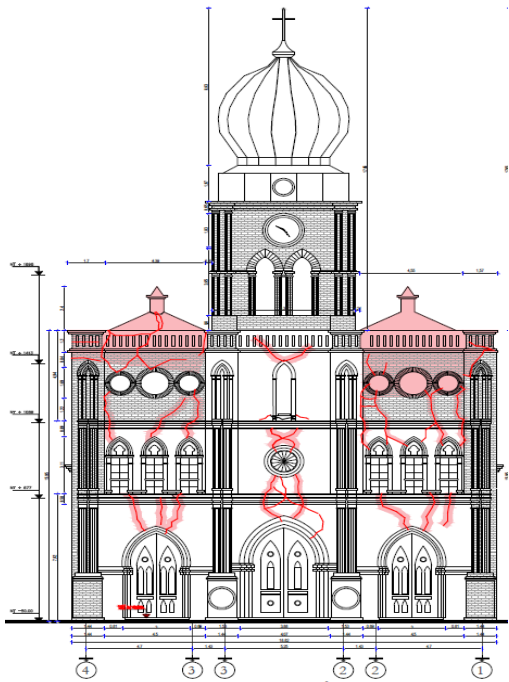
Los franciscanos concluyeron las obras del templo y convento, iniciadas por los jesuitas, en 1891. El templo tuvo modificaciones posteriores, hasta el diseño actual concluido en 1930, con fuerte influencia oriental. En 1970 los franciscanos dejan San Fernando entregando la iglesia y el convento al Obispado de Rancagua, su actual propietario.

El terremoto de 1985 afectó gravemente la iglesia y el claustro impidiendo su uso desde entonces. En octubre del 2008 se iniciaron las obras de restauración aprobadas por el Consejo de Monumentos Nacionales. Esos trabajos concluyeron en febrero de 2010, días antes del terremoto devastador del día 27, que nuevamente dejó estructuralmente dañado el templo, haciendo imposible su uso, además de ocasionar un peligro inminente por derrumbes.

La iglesia consta de tres naves, fue construida con muros de albañilería de ladrillos artesanales, pilares esbeltos de albañilería armada, techumbre de tijerales y vigas y cimientos de piedra. El proyecto ejecutado por la Dirección de Arquitectura del MOP entre el 2008 y 2010 intervino aquellos elementos que presentaban daños evidentes. Tras el terremoto del 2010, resultaron dañados precisamente aquellos elementos que no fueron reforzados en dicha intervención (ver figuras 56 y 57 en las próximas páginas). En la actualidad el edificio posee variadas patologías, como, por ejemplo: derrumbe en la coronación de la fachada principal, columna interior, grietas y desprendimientos, daños antrópicos y daños por agentes bióticos.



Figura 52. Fotografía de Iglesia de San Francisco. Comuna de San Fernando, Región de O'Higgins, Año 2022. Fuente: Elaboración propia. Cedita al Consejo de Monumentos Nacionales.



El edificio presenta varios daños producto del terremoto de febrero del 2010, como colapsos de elementos ornamentales de la fachada, grietas pasantes y fisuras en fachada, en muros de la nave y ábside y en la cúpula del ábside. Por otra parte, presenta un grave daño en todos los elementos de madera, especialmente en la estructura de techumbre y de piso, debido al ataque intensivo de insectos xilófagos. A lo anterior, se agrega que el edificio se encuentra periódicamente ocupado por personas en situación de calle, causando mayores daños ya que utilizan los desechos de madera para calefacción, además del riesgo de incendio que esto implica.

Figura 53. Esquema del levantamiento crítico de Iglesia de San Francisco, San Fernando. Fuente: SECPLA de San Fernando.

La

implementación de las ortesis en los casos de estudio incluyó las siguientes etapas:

A pesar de los daños generales sufridos por la iglesia de San Francisco en la comuna de San Fernando, este estudio se enfoca específicamente en uno de los pilares de albañilería de la nave central, tal y como se puede apreciar en la fotografía de la Figura 56 en la página subsiguiente donde se puede ver el daño en una de las columnas seleccionadas para el proyecto de estabilización estructural de la . Este elemento estructural resultó gravemente afectado durante el terremoto del 2010, perdiendo un cuarto de su sección transversal a la altura del cabezal.

Preparación de la superficie: Se preparó la superficie de la estructura patrimonial para la instalación de las ortesis, realizando tareas de limpieza, consolidación y reparación de daños. En la Casa Patronal de Lolol, se realizó una limpieza de los muros de adobe y se aplicaron tratamientos de consolidación para mejorar la cohesión del material antes de instalar las ortesis.

Instalación de las ortesis:

Se instalaron las ortesis en la estructura patrimonial, siguiendo las especificaciones de diseño y utilizando técnicas de fijación adecuadas por medio de presión entre la ortesis y el elemento dañado a reforzar.

Pruebas de resistencia y comportamiento: Se realizaron pruebas de resistencia y comportamiento en las ortesis instaladas para verificar su correcto funcionamiento. En todos los casos de estudio, se realizaron pruebas de carga para comprobar que las ortesis soportaban las tensiones esperadas.

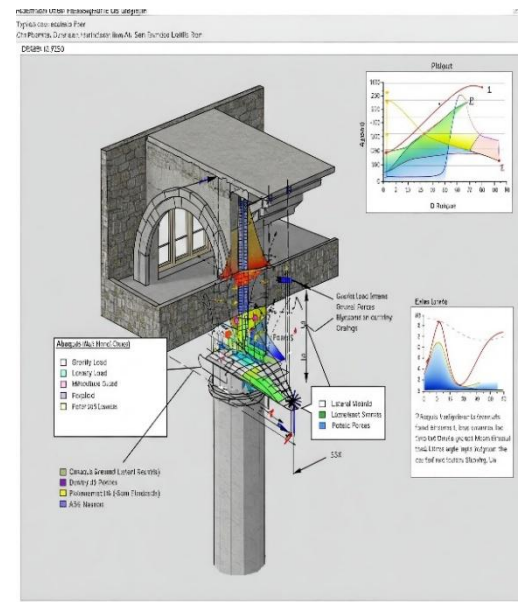


Figura 50. Imagen del análisis de desempeño estructural detallado de la zona dañada de la conexión arco y columna realizado con software avanzado Abaqus. Fuente: Elaboración Propia

Monitoreo y evaluación del desempeño de las ortesis

El monitoreo y la evaluación del desempeño de las ortesis se llevaron a cabo mediante:

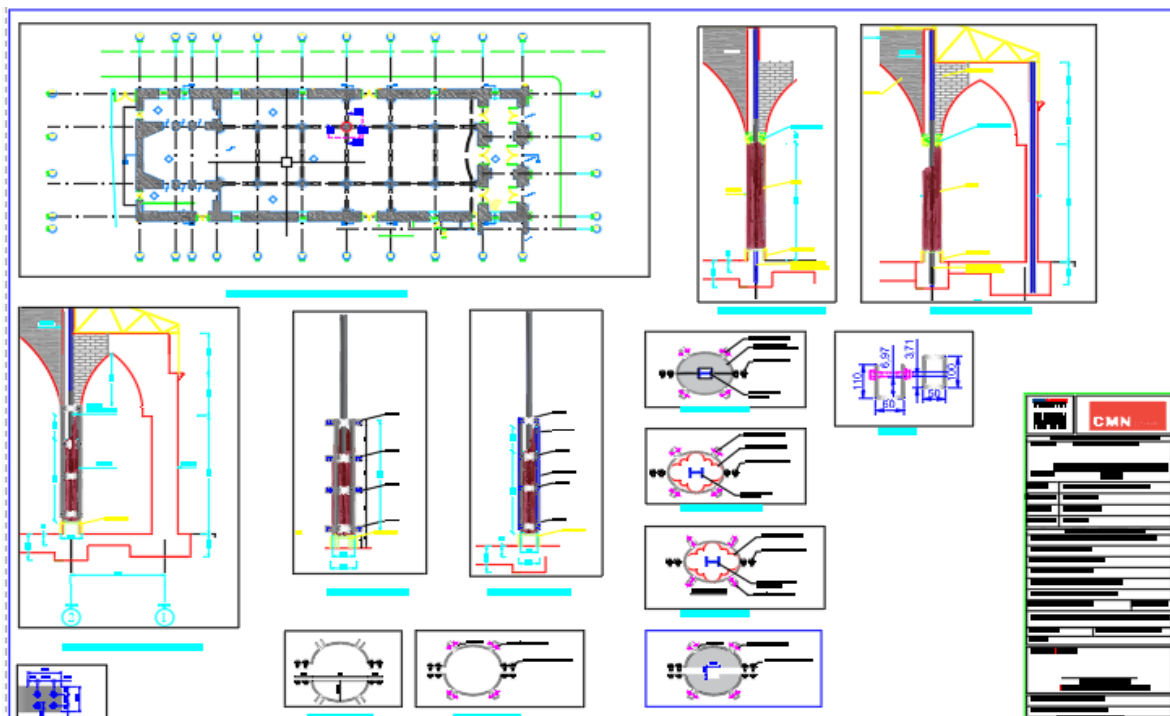


Figura 51.- Lámina de proyecto de estabilización de pilar fracturado de la Iglesia de San Francisco de San Fernando. Año 2021. / Fuente: Elaboración propia. Diseño cedido para la ejecución de la obra de estabilización por parte del área de patrimonio en riesgo del Consejo de Monumentos Nacionales (CMN).

Inspecciones visuales: Se realizaron inspecciones visuales periódicas cada tres meses para observar el estado de las ortesis y detectar posibles daños o deterioros. Se documentaron fotográficamente las ortesis y se registraron cualquier cambio en su apariencia o en la estructura patrimonial.

Mediciones instrumentales: Se utilizaron instrumentos de medición, como líneas laser y testigos de yesos fijados a los verticales de la ortesis.

Análisis de datos: Se analizaron los datos obtenidos de las inspecciones visuales y las mediciones instrumentales para evaluar la eficacia de las ortesis en la conservación de la estructura patrimonial. Se compararon los datos con los valores iniciales y se evaluaron las tendencias a lo largo del tiempo.

El periodo de monitoreo se extendió por 1 año. Durante este tiempo, se enfrentaron algunos desafíos, como varios sismos de mediana intensidad en la zona.

Análisis del impacto de las ortesis en la conservación de las estructuras

El análisis del impacto de las ortesis en la conservación de las estructuras incluyó la evaluación de:

Efectividad en la prevención de daños adicionales: Se evaluó la capacidad de las ortesis para prevenir el avance del deterioro y evitar la aparición de nuevos daños en la estructura patrimonial. En la Iglesia de San Francisco, se observó una reducción significativa en la propagación de las grietas en los muros después de la instalación de las ortesis.



Figura 56. Fotografía del daño en columna, Iglesia de San Francisco, San Fernando. Fuente: Elaboración propia realizada durante el levantamiento crítico

Impacto en la estética y el valor cultural de la estructura: Se analizó la integración visual de las ortesis en la estructura patrimonial y su impacto en la percepción del valor cultural del edificio.

Sostenibilidad de la intervención: Se evaluó la durabilidad de las ortesis, su impacto ambiental y su compatibilidad con los materiales de la estructura patrimonial.

Los resultados de la validación en casos de estudio permitieron confirmar la eficacia de las ortesis arquitectónicas como una herramienta innovadora para la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile.

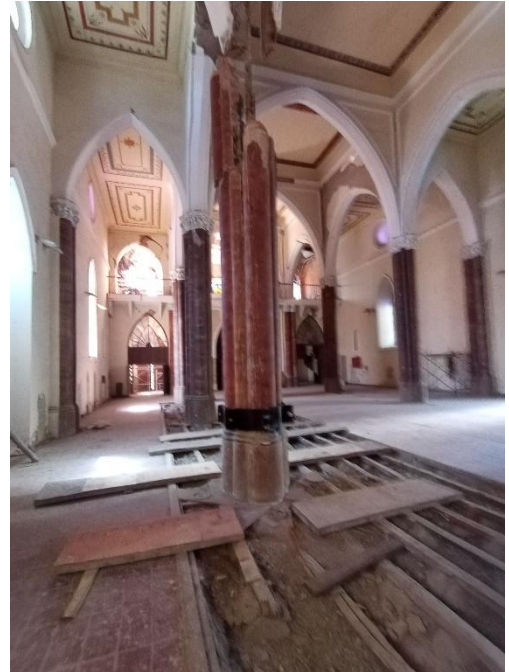


Figura 57. Fotografía de la **órtesis arquitectónica en su fase inicial**. Fuente: Elaboración propia, registro de la ejecución en terreno.-



Figura 52. Fotografía estructura ortetica de refuerzo pilar fracturado, año 2022 Fuente propia, fotografía

En la fotografía de la Figura 57 se muestra la fase inicial de montaje de la órtesis arquitectónica, con la instalación de una consola de arriostramiento. Este componente es clave para rigidizar la columna afectada en el proyecto de estabilización estructural. Luego en la fotografía de la Figura 58 se puede observar la configuración final del sistema ortésico implementado para la estabilización de la estructura patrimonial. Su diseño autoportante, sin apoyos directos al suelo, asegura una intervención expedita y limpia, exenta de los requerimientos de prospección arqueológica que exige el Consejo de Monumentos Nacionales. Fiel a los principios de mínima intervención, el sistema opera sin anclajes sobre el tejido dañado, restableciendo la continuidad del recorrido de cargas que fue interrumpido por el colapso inminente de las columnas tras

el sismo de 2010. Fuente propia, fotografía tomada por el autor como parte del registro de la intervención.

CASO DE ESTUDIO 2:



Figura 53. Fotografía de Chimeneas de Labrar, comuna de Freirina, Región de Atacama." Fuente: Centro de Documentación (Cedoc), Consejo de Monumentos Nacionales.

Chimeneas de Labrar

Las chimeneas analizadas, vestigios de una fundición de cobre del siglo XIX, representan un hito en la tecnología minera de la época, crucial para el desarrollo industrial de Chile.

Construidas originalmente en 1846, estas estructuras permitieron a Chile consolidarse como el principal productor de cobre a nivel mundial entre 1851 y 1880.

Desde el punto de vista técnico-constructivo, las chimeneas se

definen como estructuras tubulares de albañilería simple, reforzadas en sus esquinas por tensores metálicos. Su cimentación, basada en mampostería de piedra sin explorar, se encuentra bajo el nivel del suelo. Con una altura aproximada de 18 metros y una planta cuadrada de 2,0 metros de lado, estas estructuras presentan una esbeltez notable, con una relación 1:9. Las tres chimeneas comparten características constructivas similares, lo que sugiere una planificación y ejecución coherente en su edificación.

No obstante, el paso del tiempo ha dejado su huella. Actualmente, se observan daños significativos como deformaciones y desplomes evidentes, fisuras en la albañilería y la pérdida de elementos estructurales, comprometiendo su integridad. Estos deterioros son testimonio de la paralización de la fundición a finales del siglo XIX, debido al agotamiento de los yacimientos y la baja calidad del mineral, factores que llevaron al cese de operaciones y al abandono de estas emblemáticas estructuras



Levantamiento Crítico

Para comprender la fragilidad de las Chimeneas de Labrar, es imprescindible analizar su diseño y



Figura 54 Imagen N° 1.- Modelo 3D de las Chimeneas de Labrar, generado a partir de un vuelo fotogramétrico y 9 puntos de control terrestre (GCP)." Fuente: Centro de Documentación (Cedoc), Consejo de Monumentos Nacionales

materialidad. Son estructuras tubulares de **albañilería simple**, de sección cuadrada con 2.0 metros de lado y una imponente altura de aproximadamente 18 metros. Esta geometría da como resultado una **elevada razón de esbeltez de 1:9**. En ingeniería estructural, una esbeltez tan pronunciada es sinónimo de vulnerabilidad a fenómenos de inestabilidad geométrica, como el pandeo. Una estructura esbelta es



Figura 55 fotografía 1.- Registro fotográfico que detalla la configuración estructural de la Chimenea de Labrar. Año 2021./ Fuente: CEDOC-CMN

intrínsecamente susceptible a las cargas laterales (como las inducidas por el sismo o el viento) y es particularmente sensible a los **efectos de segundo orden**, donde las deformaciones iniciales son amplificadas por las cargas gravitacionales, creando un ciclo de retroalimentación que puede conducir al colapso. La **ausencia o pérdida de los tensores metálicos** originales, provocada por la obsolescencia de los materiales o por acciones de robo/vandalismo, tuvo un efecto devastador en la integridad de las chimeneas. Ver figura 61 y 62)

Estos tensores eran elementos cruciales para la resistencia a la tracción y el confinamiento de la albañilería. Su pérdida generó una cascada de fallos:

Pérdida de Estabilidad del Eje Vertical: La estructura perdió su capacidad para funcionar como albañilería reforzada, volviéndose frágil y susceptible a la inestabilidad geométrica.

Deformaciones Complejas: Esto resultó en la **pérdida de la verticalidad (pérdida de plomos)** y en la

inducción de deformaciones fuera del plano:

Curvatura: Se generó una pronunciada **curvatura en el eje vertical (flexión o pandeo)** de la estructura.

Torsión: Simultáneamente, se produjeron **rotaciones y torsiones localizadas** en distintos segmentos constructivos, lo que indica un comportamiento estructural extremadamente complejo.

En esencia, la estructura se transformó de un elemento dúctil a uno frágil, llevando a las chimeneas a un estado de **vulnerabilidad crítica y extrema**.

El diseño original, consciente de esta vulnerabilidad, incorporaba un sistema de refuerzo primario consistente en **tensores metálicos verticales dispuestos en las esquinas**. Estos tensores, anclados periódicamente al fuste de la chimenea mediante guías metálicas con orejetas, constituían el esqueleto resistente de la estructura. Su función era triple:



Figura 56 fotografía sistema de arriostramiento de las Chimeneas de Labrar.
Año 2021. / Fuente: CEDOC-CMN

Resistir Esfuerzos de Tracción: La albañilería de ladrillo tiene una excelente resistencia a la compresión, pero es extremadamente frágil y tiene una capacidad casi nula para soportar tracción. Durante un sismo o bajo la acción del viento, las caras de la chimenea se ven sometidas a ciclos de compresión y tracción. Los tensores estaban diseñados para absorber estas fuerzas de tracción.

Proporcionar Ductilidad: La ductilidad es la capacidad de un material o estructura para deformarse significativamente antes de fallar. La albañilería simple es un material frágil que falla de forma súbita y catastrófica. Los tensores de acero, al ser un material dúctil, debían conferir al conjunto la capacidad de disipar energía a través de la deformación, evitando un colapso frágil.

Garantizar el Confinamiento: Al estar anclados al cuerpo de la chimenea, los tensores ejercían un efecto de confinamiento sobre la albañilería, aumentando su resistencia a la compresión y su integridad general.

La eficacia de todo el sistema dependía, por tanto, de la integridad y la correcta interacción entre la albañilería y sus refuerzos metálicos.

Diagnóstico de Deformaciones Geométricas: La Evidencia del Modelo 3D

El diagnóstico moderno de estructuras patrimoniales ha sido revolucionado por las técnicas de levantamiento digital. El uso de un **modelo fotogramétrico 3D**, generado a partir de un vuelo con drones y georreferenciado con 9 puntos de control terrestre, ha permitido crear un "gemelo digital" de las chimeneas con una precisión milimétrica. A partir de este modelo se han extraído proyecciones ortogonales que han permitido una cuantificación precisa de las deformaciones.

Deformación Lateral Dominante: La Curvatura hacia el Sur

El hallazgo más crítico es la existencia de una **pronunciada curvatura del eje longitudinal de las chimeneas**, con una **inclinación predominante hacia el sur**. Esta no es una inclinación lineal y uniforme, sino una deformación por flexión (pandeo) que es máxima en el tercio superior. La magnitud de esta deformación es alarmante (ver figuras 63 y 64):

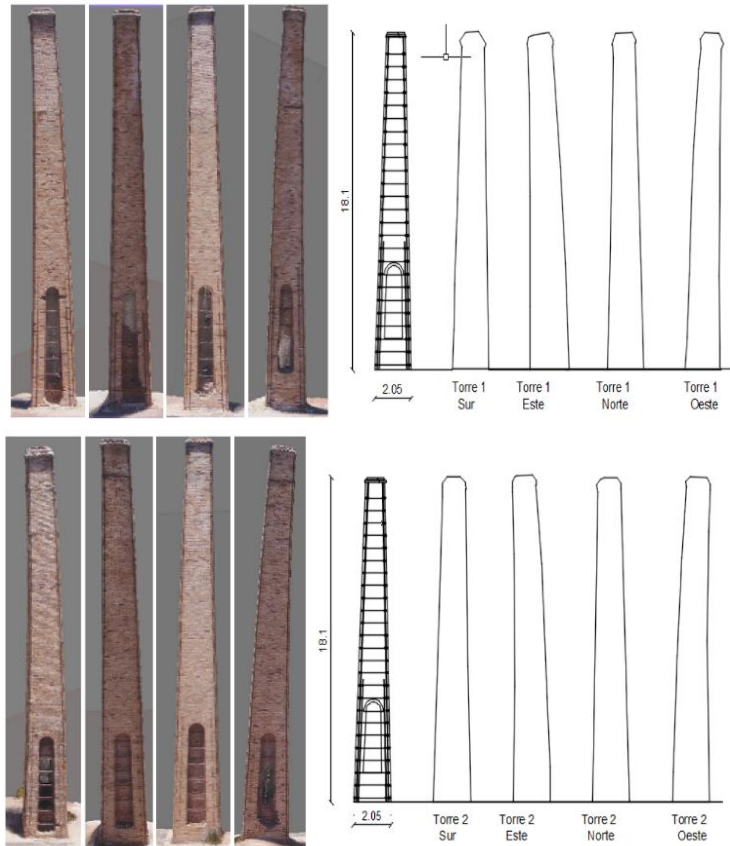


Figura 57 Imagen El diagrama presenta un análisis de deformaciones de las Chimeneas de Labrar, año 2021./ Fuente Elaboración propia del autor, como colaboración del estudio de bases para el "Proyecto de Estabilización de las Torres de las Chimeneas de Labrar"

Chimeneas N°2 y N°3: Desplazamiento lateral de 50 cm.

Un desplazamiento de medio metro en una estructura de 18 metros de altura tiene implicaciones devastadoras. Genera un **efecto P-Delta** masivo: el peso propio de la estructura (P), al actuar sobre el brazo de palanca creado por el desplazamiento lateral (Delta), induce un momento flector secundario que se suma a los momentos causados por las cargas externas. Este momento secundario aumenta la curvatura, lo que a su vez aumenta el desplazamiento Delta, creando un ciclo vicioso que acelera la inestabilidad y puede culminar en el colapso.

Deformaciones Secundarias: Inclinación y Torsión Localizada

El análisis revela también una **inclinación lineal en la dirección este-oeste**, aunque menos significativa que la curvatura principal. Más preocupante es la identificación de **deformaciones locales por torsión en el cuarto superior** de una de las chimeneas. Aunque a nivel global la torsión no es relevante, su presencia localizada indica un comportamiento estructural extremadamente complejo. La torsión genera esfuerzos de corte que son particularmente dañinos para la albañilería, y su combinación con la flexión biaxial crea

un estado de tensiones multiaxial que la estructura original no estaba diseñada para soportar.

Daños Estructurales y Patologías Materiales

El levantamiento crítico ha permitido crear un "mapa de daños" que complementa el análisis geométrico. Este catastro revela que la inestabilidad no es solo un problema de forma, sino también de fondo, con una degradación severa de los materiales.

Deterioro de la Albañilería y Separación de Juntas: Se observa una pérdida generalizada de material, concentrada en el tercio superior, zona de máxima deformación y exposición a los elementos. La **apertura de juntas (tendeles)** es una señal inequívoca de que la estructura ha experimentado movimientos relativos entre los ladrillos, perdiendo la traba y la monolitismo

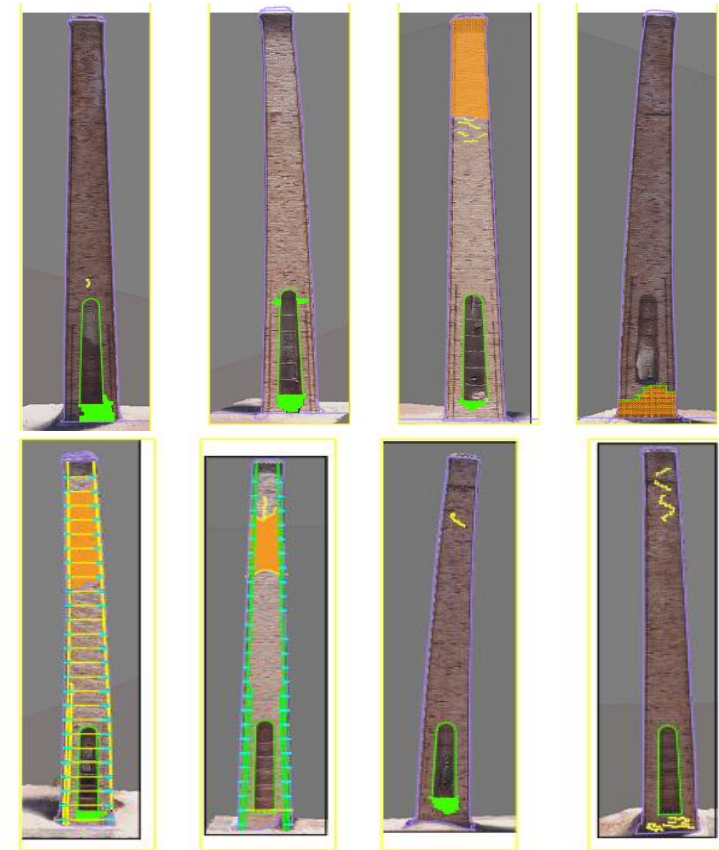


Figura 58 Imagen N° 2.- **Plano de Patologías y Deterioros de las Chimeneas 2 y 3** . año 2021/ Fuente Elaboración propia del autor, como colaboración del estudio de bases para el "Proyecto de Estabilización de las Torres de las Chimeneas de Labrar

esencial para el comportamiento de la albañilería.

Fisuración Múltiple como Evidencia de Esfuerzos: Los patrones de fisuración son como las "huellas dactilares" de los esfuerzos que ha soportado la estructura:

- **Fisuración Diagonal (en cruz):** Es la firma inconfundible de los esfuerzos de corte, probablemente inducidos por la torsión localizada o por la respuesta sísmica.
- **Fisuración en Arcos:** Los vanos de acceso son puntos de discontinuidad que concentran las tensiones. Las grietas que siguen la forma de los arcos indican que estas zonas han actuado como "fusibles estructurales", fallando para redistribuir los esfuerzos.
- **Fisuración Vertical:** Estas grietas longitudinales son consistentes con los esfuerzos de tracción generados

por la flexión en el plano norte-sur.

Fallos Críticos en el Sistema Tensor: El diagnóstico más grave es la **rotura o pérdida total de elementos del sistema de refuerzo metálico**. Este fallo es el "golpe de gracia" para la estructura. Al perder sus tensores, la chimenea ha dejado de funcionar como un elemento de albañilería reforzada para comportarse como una estructura de **albañilería simple**. Esto implica la pérdida total de su capacidad para resistir tracción y, fundamentalmente, la pérdida de su ductilidad. La estructura se ha vuelto frágil, propensa a un colapso súbito y sin aviso previo.

Síntesis y Diagnóstico de Vulnerabilidad Global

El diagnóstico final es inequívoco: las Chimeneas de Labrar se encuentran en una situación de **vulnerabilidad crítica y extrema**, resultado de una cascada de fallos interconectados:

Vulnerabilidad de Diseño: Su alta esbeltez las predispuso a la inestabilidad.

Deformación Geométrica Severa: La curvatura de hasta 50 cm ha inducido un estado de esfuerzos insostenible, amplificado por los efectos P-Delta.

Falla del Sistema de Refuerzo: La pérdida de los tensores ha provocado una transformación fundamental en su comportamiento estructural, de dúctil a frágil.

Degradación Material: La pérdida de sección y la fisuración han debilitado la capacidad residual de la albañilería.

Como configuración general, las chimeneas corresponden a una estructura tubular con muros de albañilería simple reforzada con tensores metálicos en las esquinas, tienen una altura aproximada de 18m y una planta cuadrada de 2,0m por lado presentando una elevada razón de esbeltez 1:9 (imagen 12).

Simulación Numérica y Validación de la Ingeniería

Una vez diagnosticado el problema, el siguiente paso es validar las hipótesis y probar soluciones de manera virtual. La imagen que simula un análisis con el software Abaqus representa esta etapa crucial de Análisis por Elementos Finitos (FEA).

El Rol del Análisis por Elementos Finitos (FEA)

Abaqus es un software que permite dividir la compleja geometría de la chimenea en miles de pequeños elementos interconectados (una "malla"). Al aplicar las propiedades del material (resistencia, elasticidad) y las cargas actuantes (peso propio, viento, sismo), el programa calcula cómo se distribuyen los esfuerzos (tensiones) y las deformaciones en cada punto de la estructura. Los gradientes de color visualizan estos resultados: las zonas rojas indican altas concentraciones de esfuerzo, que son los puntos más probables de fallo. Este análisis permite confirmar que la combinación de inclinación, torsión y daño material está llevando a la chimenea a su límite de capacidad resistente.

Diseño y Optimización de la Solución de Refuerzo

La culminación del proceso es el diseño de una intervención. Las imágenes que muestran la chimenea con una estructura metálica externa ilustran la evolución de una solución conceptual innovadora, denominada análogamente como un "stent arquitectónico".

Concepto del "ortesis Stent para la arquitectura dañada Arquitectónico"

Inspirada en el dispositivo médico que refuerza las arterias, esta solución propone un exoesqueleto de acero que envuelve la chimenea sin ser excesivamente invasivo. Su función es doble:

Función de Arriostramiento: Proporciona la rigidez necesaria para corregir la inclinación y resistir la torsión, estabilizando la geometría global.

Función de Confinamiento: Aumenta la capacidad de la albañilería para resistir esfuerzos de compresión y cortante, evitando un fallo frágil.

Evolución y Optimización del Diseño

El diseño no fue inmediato, sino que se refinó a través de un proceso iterativo visible en las imágenes:

Se partió de un marco básico.

Se ajustó el anclaje a la base para respetar la estructura original.

La solución final y más optimizada es la que incorpora collarines horizontales adosados a la chimenea, conectados mediante tensores a la estructura externa. Este diseño es altamente eficiente porque permite una transferencia de carga directa desde la albañilería al refuerzo en múltiples puntos a lo largo de la altura, controlando eficazmente tanto la flexión como la torsión.

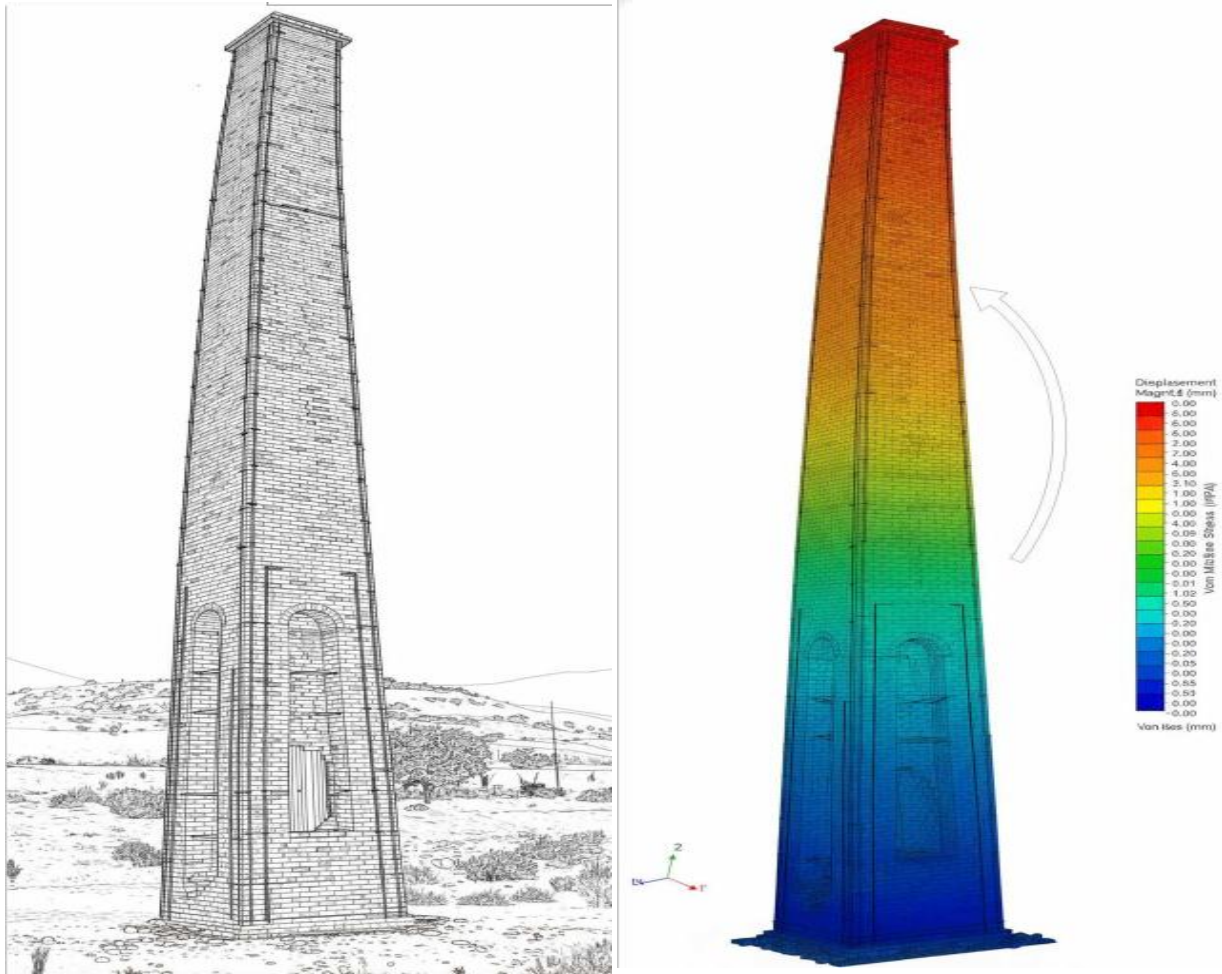


Figura 59 Imagen La imagen muestra una simulación de **Análisis por Elementos Finitos (FEA)**, de Chimeneas de Labrar año 2022. Fuente propia.

El diagnóstico estructural ha permitido identificar con precisión las **zonas de mayor concentración de esfuerzos y deformaciones** en las Chimeneas de Labrar. Estas áreas, destacadas mediante gradientes de color en la simulación (ver figura 65), representan los **puntos críticos** que comprometen la integridad estructural y presentan el más **alto riesgo de colapso**.

Basándose en este análisis crítico, se propone una **solución de estabilización de emergencia**.

Criterios de Diseño Prioritarios

El diseño de esta solución provisional prioriza las siguientes características:

- **Intervención mínimamente invasiva:** Debe ejecutarse con la menor alteración posible al monumento original.
- **Bajo costo:** Se busca una solución económicamente viable para una acción inmediata.
- **Rápida instalación:** Es vital su pronta implementación debido al avanzado estado de deterioro de la estructura.
- **Conservación de la materialidad original:** El diseño no debe alterar los materiales históricos del monumento.



Figura 60. Representación de propuesta CONCEPTUAL de solución para la desviación e inestabilidad estructural / Fuente propia: propuesta desarrollada por el autor por medio del uso de IA.

La **figura 61** presenta una **propuesta de solución meramente conceptual** para abordar la desviación e inestabilidad estructural de las Chimeneas de Labrar.

Esta idea, desarrollada por el autor mediante el uso de Inteligencia Artificial (IA) y no como un análisis de ingeniería validado, consiste en un sistema de refuerzo externo y ligero, conceptualizado como un **exoesqueleto de perfiles metálicos**.

El sistema, análogo a un *stent* utilizado en medicina para dar soporte y restaurar la funcionalidad de conductos vitales, funciona como un "**ortesis Stent arquitectónico**", cuyo objetivo sería estabilizar y corregir la inclinación de la torre.

Conclusiones

Este capítulo ha presentado los resultados de la investigación sobre la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Se ha demostrado que las ortesis arquitectónicas, diseñadas con base en principios biomecánicos, pueden ser una herramienta eficaz para la conservación de estructuras patrimoniales con diferentes tipos de deterioro.

Las pruebas de laboratorio, las simulaciones computacionales y las pruebas a escala real han permitido evaluar la resistencia, el comportamiento y la durabilidad de las ortesis. La validación en casos de estudio ha confirmado la eficacia de las ortesis en la prevención de daños adicionales, su integración visual en la estructura patrimonial y su sostenibilidad.

La investigación ha demostrado que la aplicación de la biomecánica en la conservación del patrimonio ofrece una serie de ventajas, como la posibilidad de diseñar intervenciones precisas y personalizadas, adaptadas a las necesidades específicas de cada estructura. Además, las ortesis arquitectónicas permiten una intervención mínimamente invasiva, que respeta la integridad y el valor cultural del patrimonio.

Sin embargo, también se han identificado algunos desafíos en la aplicación de este enfoque, como la necesidad de contar con profesionales capacitados en el diseño e instalación de ortesis, y la importancia de realizar un monitoreo continuo para asegurar su correcto funcionamiento a largo plazo.

Esta investigación abre nuevas posibilidades para la conservación del patrimonio arquitectónico, ofreciendo soluciones innovadoras que combinan la tecnología con el respeto por el valor histórico y cultural de las estructuras. Se sugiere que futuras investigaciones se centren en el desarrollo de nuevos materiales y diseños de ortesis, así como en la aplicación de la biomecánica a la conservación de otros tipos de estructuras patrimoniales, como sitios arqueológicos y monumentos históricos.

Capítulo V: Análisis de la viabilidad

Este capítulo se centra en el análisis de la viabilidad de la aplicación de ortesis biomecánicas en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile. Se abordará la viabilidad desde tres perspectivas: técnica, económica y social-ambiental, considerando el marco regulatorio chileno y las particularidades de las estructuras históricas del país.

5.1 Viabilidad técnica

La viabilidad técnica se refiere a la capacidad de fabricar e instalar las ortesis de manera efectiva y segura, considerando los recursos y la tecnología disponibles en Chile.

Fabricación de las ortesis

La fabricación de ortesis para la conservación del patrimonio arquitectónico requiere de un enfoque multidisciplinario que combine conocimientos de ingeniería estructural, biomecánica y ciencia de los materiales. La selección de materiales y técnicas de fabricación dependerá de las características específicas de la estructura a intervenir, las condiciones ambientales y los recursos disponibles.

Materiales:

- **Aceros:** Los aceros de alta resistencia son una opción común debido a su durabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad para soportar cargas elevadas. Se pueden utilizar diferentes tipos de acero, como acero inoxidable, acero al carbono y acero galvanizado, dependiendo de las necesidades específicas de la ortesis. El acero inoxidable, por ejemplo, es particularmente útil en ambientes marinos o con alta humedad debido a su resistencia a la corrosión.
- **Aleaciones de aluminio:** Las aleaciones de aluminio ofrecen una buena relación resistencia-peso, lo que las hace adecuadas para ortesis que requieren ser ligeras. Además, son resistentes a la corrosión y tienen una buena apariencia estética. Su maleabilidad permite la fabricación de ortesis con formas complejas.
- **Fibras de carbono:** Las fibras de carbono son materiales de alta resistencia y bajo peso, ideales para ortesis que requieren una alta rigidez y resistencia a la fatiga. Sin embargo, su costo puede ser elevado. Son especialmente útiles en estructuras que requieren refuerzo sin añadir mucho peso adicional.
- **Madera laminada:** La madera laminada es un material renovable y con buenas propiedades mecánicas. Puede ser una opción viable para ortesis en estructuras de madera o en casos donde se busca una integración estética con el entorno. Además, la madera laminada ofrece un buen comportamiento frente al fuego.

Técnicas de fabricación:

- **Corte y soldadura:** Estas técnicas son ampliamente utilizadas para la fabricación de ortesis metálicas. Permiten crear formas complejas y adaptarlas a las necesidades específicas de la estructura. La soldadura, en particular, permite unir diferentes piezas de metal para crear ortesis a medida.
- **Moldeo por inyección:** Esta técnica se utiliza para la fabricación de ortesis en materiales plásticos o compuestos. Permite producir piezas con alta precisión y en grandes cantidades. El moldeo por inyección

es ideal para la producción de ortesis estandarizadas.

- **Impresión 3D:** La impresión 3D es una tecnología emergente que permite fabricar ortesis con geometrías complejas y personalizadas. Ofrece una gran flexibilidad en el diseño y la producción. La impresión 3D facilita la creación de ortesis a medida para cada proyecto.

Ejemplos de ortesis en otros países:

- En Italia, se han utilizado ortesis de acero inoxidable para reforzar la Torre de Pisa, contrarrestando su inclinación.

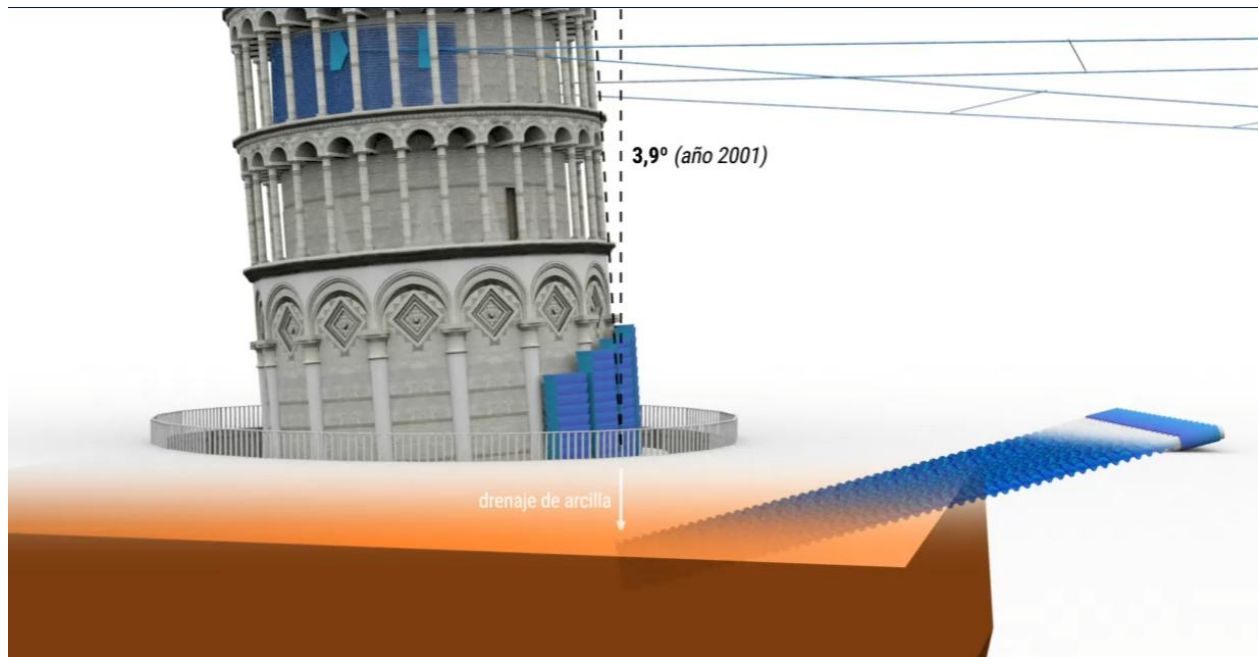


Figura 61. Imagen estructura del tipo ortética aplicada desde 1995 al 2001 para evitar colapso de torre de Pisa. Fuente: <https://stories.lavanguardia.com/historia-y-vida/20210616/40472/torre-pisa-frenar-caida>

- En Francia, se han empleado ortesis de fibra de carbono para la restauración de la Catedral de Notre Dame, reforzando las bóvedas dañadas por el incendio.
- En España, se han utilizado ortesis de madera laminada en la rehabilitación de estructuras históricas de madera, como en la restauración del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial.

Idoneidad de materiales y técnicas para estructuras históricas en Chile:

Chile posee una rica variedad de estructuras históricas construidas con diferentes materiales, como adobe, mampostería y madera. La elección de la ortesis adecuada dependerá del tipo de estructura y sus necesidades específicas:

- **Estructuras de adobe:** Para las estructuras de adobe, que son comunes en Chile, las ortesis de madera laminada pueden ser una opción adecuada debido a su compatibilidad con el material y su capacidad para adaptarse a los movimientos del adobe. También se pueden utilizar ortesis de acero, pero se debe tener cuidado en el diseño para evitar la concentración de tensiones en el adobe.

- **Estructuras de mampostería:** En estructuras de mampostería, como iglesias y edificios históricos, las ortesis de acero o fibra de carbono pueden ser más adecuadas debido a su alta resistencia y capacidad para soportar cargas. La elección dependerá de las necesidades específicas de la estructura y la disponibilidad de los materiales.
- **Estructuras de madera:** Para estructuras de madera, la madera laminada es una opción natural debido a su compatibilidad y estética. También se pueden utilizar ortesis metálicas, pero se debe considerar la protección contra la corrosión en el punto de contacto con la madera.

En el contexto sísmico de Chile, es crucial considerar la capacidad de las ortesis para resistir las fuerzas sísmicas. Las ortesis de acero y fibra de carbono, con su alta resistencia y ductilidad, son particularmente adecuadas para el refuerzo sísmico de estructuras históricas.

Instalación de las ortesis

La instalación de las ortesis es una etapa crítica que requiere de una planificación cuidadosa y la participación de profesionales especializados. Se deben considerar aspectos como la seguridad de los trabajadores, la protección del patrimonio y la minimización del impacto en el entorno. Métodos de instalación:

- **Anclajes mecánicos:** Los anclajes mecánicos, como pernos y tornillos, son una opción común para fijar las ortesis a la estructura. Se deben seleccionar anclajes adecuados al tipo de material de la estructura de refuerzo y a las cargas que deberá soportar la ortesis. Es importante considerar la resistencia a la corrosión de los elementos, especialmente en ambientes húmedos.
- **Adhesivos estructurales:** Los adhesivos estructurales son una alternativa a los anclajes mecánicos, especialmente en casos donde se busca minimizar la intervención en la estructura. Se deben utilizar adhesivos de alta resistencia y durabilidad, compatibles con los materiales de la ortesis y la estructura. Los adhesivos epoxi son una opción común debido a su alta resistencia y capacidad de adherencia a diferentes materiales.
- **Sistemas de tensado:** Los sistemas de tensado se utilizan para aplicar fuerzas controladas a las ortesis, lo que permite ajustar su posición y optimizar su funcionamiento. Estos sistemas son útiles en casos donde se requiere un control preciso de las fuerzas aplicadas por la ortesis.

Desafíos y limitaciones:

- **Acceso a la estructura:** En algunos casos, el acceso a la estructura puede ser limitado, lo que dificulta la instalación de las ortesis. Se pueden requerir andamios, plataformas elevadoras o técnicas de acceso por cuerdas. El acceso restringido puede aumentar el tiempo y el costo de la instalación.
- **Protección del patrimonio:** Durante la instalación, se deben tomar medidas para proteger la estructura de posibles daños. Se pueden utilizar protecciones acolchadas, lonas o pantallas para evitar impactos o rayaduras. Es fundamental proteger los elementos decorativos y las superficies frágiles de la estructura.
- **Condiciones ambientales:** Las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y el viento, pueden influir en la instalación de las ortesis. Se deben tomar medidas para garantizar la seguridad de

los trabajadores y la correcta fijación de las ortesis. Por ejemplo, la lluvia puede afectar la adherencia de los adhesivos estructurales.

Ejemplos de casos de estudio:

- En la Iglesia de San Francisco de Santiago, se utilizaron anclajes mecánicos para la instalación de ortesis de acero en la restauración de la torre, permitiendo reforzar la estructura sin alterar significativamente su apariencia.
- En el Palacio Cousiño de Valparaíso, se emplearon adhesivos estructurales para la fijación de ortesis de fibra de carbono en la consolidación de muros, minimizando la intervención en la estructura histórica.

Conclusión

La viabilidad técnica de la fabricación e instalación de ortesis biomecánicas en Chile es factible. Se cuenta con los materiales, la tecnología y los profesionales capacitados para llevar a cabo estos procesos. Sin embargo, es fundamental realizar una planificación detallada, considerando las características específicas de cada proyecto, los desafíos que puedan surgir durante la fabricación e instalación, y la idoneidad de los materiales y técnicas para el tipo de estructura histórica a intervenir.

5.2 Viabilidad económica

La viabilidad económica evalúa si la aplicación de ortesis biomecánicas es una solución económicamente viable en comparación con las técnicas tradicionales de intervención en el patrimonio arquitectónico.

Estimación de costos

La estimación de costos de las ortesis debe considerar todas las etapas del proceso, desde la fabricación hasta el mantenimiento.

Costos:

- **Costo de materiales:** El costo de los materiales varía según el tipo de material, la cantidad requerida y la disponibilidad en el mercado. El acero, por ejemplo, suele ser más económico que la fibra de carbono.
- **Costo de mano de obra:** Se debe considerar el costo de la mano de obra especializada para la fabricación e instalación de las ortesis, incluyendo ingenieros, técnicos, instaladores y operarios. La mano de obra especializada puede ser un factor importante en el costo total del proyecto.
- **Costo de tecnología:** Dependiendo de la técnica de fabricación utilizada, se pueden requerir equipos y software especializados, lo que implica un costo adicional. La impresión 3D, por ejemplo, puede requerir una inversión inicial en equipos.
- **Costo de equipos:** Se pueden requerir equipos como grúas, andamios y plataformas elevadoras para la instalación, lo que implica un costo de alquiler o compra. El costo de los equipos dependerá de la complejidad del proyecto y las condiciones de acceso a la estructura.
- **Costo de permisos:** Se deben obtener los permisos necesarios para la instalación de las ortesis, lo que

puede implicar un costo administrativo. Los costos de permisos varían según la normativa local y la magnitud del proyecto.

- **Costo de inspecciones:** Se deben realizar inspecciones periódicas para verificar el estado de las ortesis y detectar posibles daños o deterioros. Las inspecciones regulares son esenciales para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de las ortesis a largo plazo.
- **Costo de reparaciones:** En caso de que se detecten daños, se deben realizar reparaciones o reemplazos de las ortesis. El costo de las reparaciones dependerá del tipo de daño y la accesibilidad a la ortesis.
- **Costo de monitoreo:** Se pueden implementar sistemas de monitoreo para controlar el comportamiento de las ortesis y la estructura a largo plazo. El monitoreo continuo puede proporcionar información valiosa sobre el desempeño de las ortesis y la estabilidad de la estructura.

Ejemplos de presupuestos:

- La restauración de la Torre de Pisa, que incluyó la instalación de ortesis de acero, tuvo un costo aproximado de 27 millones de euros.
- La rehabilitación de la Catedral de Notre Dame, que empleó ortesis de fibra de carbono, se estima que tendrá un costo superior a los 850 millones de euros.

Comparación con técnicas tradicionales

Las técnicas tradicionales de intervención en el patrimonio arquitectónico, como el refuerzo con muros de contención, la inyección de morteros o la sustitución de elementos estructurales, también implican costos significativos.

Costos de las técnicas tradicionales:

- **Costo de materiales:** El costo de los materiales varía según la técnica utilizada y la cantidad requerida. Los morteros, por ejemplo, pueden tener un costo variable según su composición y propiedades.
- **Costo de mano de obra:** Se debe considerar el costo de la mano de obra especializada para la ejecución de las técnicas tradicionales. Algunas técnicas tradicionales requieren mano de obra altamente especializada, lo que puede aumentar los costos.
- **Costo de demolición y reconstrucción:** En algunos casos, se requiere demoler y reconstruir partes de la estructura, lo que implica un costo adicional. La demolición y reconstrucción pueden generar costos significativos en términos de mano de obra, materiales y gestión de residuos.

Comparación de costos:

La comparación de costos entre las ortesis biomecánicas y las técnicas tradicionales debe considerar la vida útil de cada solución, los costos de mantenimiento y el impacto en el valor patrimonial de la estructura. En algunos casos, las ortesis pueden ser más costosas en la etapa inicial, pero pueden ofrecer un mayor ahorro a largo plazo debido a su durabilidad y menor necesidad de mantenimiento. Además, las ortesis suelen ser menos invasivas que las técnicas tradicionales, lo que puede reducir el impacto en el valor patrimonial de la estructura.

Tabla 9.- Comparación de ventajas e impactos de las alternativas tradicionales de intervención versus la propuesta ortética

Técnica	Ventajas	Desventajas	Impacto en el Patrimonio
Ortesis biomecánicas	Mayor durabilidad, menor necesidad de mantenimiento, menor Invasividad	Mayor costo inicial, requiere mano de obra especializada	Menor impacto, preserva la autenticidad
Técnicas tradicionales	Menor costo inicial, técnicas conocidas	Menor durabilidad, mayor necesidad de mantenimiento, mayor Invasividad	Mayor impacto, puede alterar la originalidad

5.3 Viabilidad social y ambiental

La viabilidad social y ambiental analiza la aceptación de las ortesis por parte de la comunidad y su impacto en el medio ambiente.

Aceptación social

La conservación del patrimonio arquitectónico no solo implica aspectos técnicos y económicos, sino también sociales. La intervención en una estructura patrimonial puede generar diferentes reacciones en la comunidad, desde la aprobación hasta el rechazo.

Factores que influyen en la aceptación social:

- **Valor cultural e histórico:** La importancia cultural e histórica de la estructura influye en la percepción de la intervención. Las comunidades suelen ser más sensibles a las intervenciones en estructuras con un alto valor simbólico.
- **Estética:** La apariencia de las ortesis y su integración con la estructura pueden generar opiniones diversas. La visibilidad de las ortesis puede ser un factor de controversia, especialmente en edificios con un alto valor estético.
- **Participación ciudadana:** La participación de la comunidad en la toma de decisiones sobre la intervención puede aumentar la aceptación social. La inclusión de la comunidad en el proceso de diseño e implementación puede generar un mayor sentido de pertenencia y responsabilidad hacia el patrimonio.

Ejemplos de casos de estudio:

- La restauración de la Iglesia de San Francisco de Santiago, que incluyó la instalación de ortesis visibles, generó un debate sobre la estética de la intervención, ya que algunos consideraron que las ortesis afectaban la apariencia original del edificio.
- La consolidación del Palacio Cousiño de Valparaíso, con ortesis de fibra de carbono ocultas, tuvo una mayor aceptación social, ya que las ortesis no eran visibles y no alteraban la estética del edificio.

Estrategias para mejorar la aceptación social:

- **Comunicación transparente:** Informar a la comunidad sobre la necesidad de la intervención, las técnicas utilizadas y los beneficios esperados. Es importante explicar claramente los objetivos de la intervención y cómo las ortesis contribuyen a la conservación del patrimonio.
- **Difusión del conocimiento:** Realizar actividades de divulgación para explicar la importancia de la conservación del patrimonio y el rol de las ortesis. Se pueden organizar visitas guiadas, charlas o exposiciones para educar al público sobre las técnicas de conservación.
- **Participación ciudadana:** Incorporar a la comunidad en la toma de decisiones sobre la intervención, a través de consultas públicas, talleres o mesas de diálogo. La participación ciudadana permite incorporar las perspectivas y valores de la comunidad en el proyecto de conservación.

Desafíos en el uso de ortesis visibles:

La aplicación de ortesis visibles en edificios históricos puede generar controversias en relación con la estética y el valor cultural de la estructura. Algunos argumentos en contra del uso de ortesis visibles incluyen:

- **Alteración de la imagen histórica:** Las ortesis visibles pueden modificar la percepción visual de la estructura, alterando su carácter original y su valor histórico.
- **Impacto en el valor estético:** La presencia de elementos modernos como las ortesis puede considerarse una intromisión visual que afecta la armonía y la belleza del edificio histórico.
- **Dificultad de integración:** En algunos casos, puede ser difícil integrar las ortesis de manera armónica con la arquitectura existente, generando un contraste visual que afecta la integridad estética del conjunto.

Es fundamental abordar estas preocupaciones a través de un diseño cuidadoso de las ortesis, buscando la mínima intervención visual y la integración con el contexto arquitectónico. La selección de materiales, el acabado superficial y la ubicación de las ortesis son factores clave para minimizar su impacto visual.

Impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental de las ortesis debe considerar todas las etapas de su ciclo de vida, desde la fabricación hasta su disposición final.

Fabricación:

- **Consumo de energía:** La fabricación de las ortesis requiere energía para la extracción de materias primas, el procesamiento de materiales y el transporte. La producción de acero, por ejemplo, consume una cantidad significativa de energía.
- **Generación de residuos:** La fabricación puede generar residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Es importante implementar sistemas de gestión de residuos para minimizar el impacto ambiental.
- **Emisión de gases de efecto invernadero:** La producción de algunos materiales, como el acero, puede generar emisiones de gases de efecto invernadero. Se deben buscar alternativas de materiales con menor huella de carbono.

Instalación:

- **Uso de maquinaria:** La instalación puede requerir el uso de maquinaria que consume combustible y genera emisiones. Se debe optimizar el uso de maquinaria y priorizar equipos con bajas emisiones.
- **Transporte de materiales:** El transporte de las ortesis y los materiales de instalación genera emisiones de gases de efecto invernadero. Se debe optimizar la logística de transporte para reducir las emisiones.
- **Generación de ruido:** La instalación puede generar ruido que afecta al entorno. Se deben implementar medidas de mitigación del ruido para minimizar las molestias a la comunidad.

Uso y mantenimiento:

- **Durabilidad:** Las ortesis deben ser duraderas para minimizar la necesidad de reemplazos. Una mayor durabilidad reduce la frecuencia de reemplazo y el impacto ambiental asociado.
- **Mantenimiento:** El mantenimiento de las ortesis debe ser mínimo para reducir el impacto ambiental. Se deben diseñar ortesis que requieran un mantenimiento mínimo y utilizar materiales resistentes a la corrosión y al deterioro.
- **Disposición final:** Se debe considerar la disposición final de las ortesis al final de su vida útil, buscando opciones de reciclaje o reutilización. El reciclaje de los materiales de las ortesis permite reducir el consumo de recursos naturales y la generación de residuos.

Medidas para minimizar el impacto ambiental:

- **Utilizar materiales reciclados o renovables:** Priorizar el uso de materiales con bajo impacto ambiental, como la madera laminada proveniente de bosques sustentables.
- **Optimizar el diseño:** Diseñar ortesis eficientes que minimicen el uso de materiales y energía. La optimización del diseño permite reducir el peso y el volumen de las ortesis, lo que a su vez reduce el consumo de materiales y energía en su fabricación y transporte.
- **Implementar prácticas de construcción sostenible:** Reducir el consumo de energía, la generación de residuos y las emisiones durante la instalación. Se pueden utilizar técnicas de construcción sostenible para minimizar el impacto ambiental de la instalación, como la gestión eficiente de residuos y el uso de energías renovables.
- **Monitorear el impacto ambiental:** Realizar un seguimiento del impacto ambiental de las ortesis durante su ciclo de vida. El monitoreo permite identificar posibles impactos ambientales y tomar medidas para

mitigarlos.

5.4 Marco regulatorio en Chile

La aplicación de ortesis biomecánicas en la conservación del patrimonio arquitectónico en Chile está sujeta a un marco regulatorio que busca proteger el valor cultural e histórico de las estructuras.

La Ley N° 17.288 de Monumentos Nacionales establece las normas para la declaración, protección e intervención de los monumentos nacionales. Cualquier intervención en un monumento nacional requiere la autorización del Consejo de Monumentos Nacionales (CMN), que evalúa el proyecto y su impacto en el valor patrimonial del bien.

El CMN ha emitido directrices para la intervención en monumentos nacionales, que incluyen consideraciones sobre la compatibilidad de los materiales, la reversibilidad de las intervenciones y la minimización del impacto visual. Estas directrices son un referente importante para la aplicación de ortesis biomecánicas en la conservación del patrimonio.

Además de la Ley de Monumentos Nacionales, existen otras normativas que pueden ser aplicables a la intervención en edificios históricos, como la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y las normativas municipales. Es fundamental revisar la normativa vigente y obtener los permisos necesarios antes de iniciar cualquier intervención en un edificio histórico.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Introducción al Capítulo

El presente capítulo consolida y expone las conclusiones generales derivadas de la investigación titulada «ESTRUCTURAS FERRATA. Órtesis Arquitectónicas: Soluciones biomecánicas no invasivas con estructuras metálicas para la conservación del patrimonio en riesgo de colapso». A lo largo del trabajo se ha articulado una transferencia epistemológica, metodológica y técnica desde la medicina ortopédica y la biomecánica hacia la ingeniería de conservación patrimonial.

A continuación, se detalla la validación de la hipótesis central, se analizan los aportes teóricos y prácticos deducidos del modelado computacional y la experimentación en terreno, se precisan las limitaciones identificadas durante el proceso, y se formulan recomendaciones técnicas y lineamientos futuros para transformar las prácticas de intervención estructural de emergencia en Chile.

6.1 Conclusiones Generales y Nuevo Paradigma Biomecánico

1. La Biomecánica como Paradigma de Intervención frente al Reduccionismo Estático

La investigación demuestra que la incorporación de la biomecánica a la conservación de monumentos no constituye una simple analogía estética ni un cambio retórico de nomenclatura. Frente a la objeción tradicional que concibe al edificio como un bloque pétreo rígido e inmóvil y al cuerpo humano como un ente dinámico y autorreparable, la física estructural contemporánea evidencia que las fábricas históricas (albañilería de ladrillo, adobe, piedra y carpintería tradicional) operan como **sistemas metaestables y dinámicos**. Ante sollicitaciones sísmicas, empujes eólicos y gradientes térmicos, los edificios tradicionales disipan energía mediante desplazamientos relativos, fricción y deformaciones controladas en sus juntas.

Asimismo, la ausencia de una capacidad biológica de autorreparación celular en los materiales inertes es precisamente el factor que legitima la necesidad de la **órtesis arquitectónica**. Mientras que una férula médica inmoviliza temporalmente un hueso para permitir su cicatrización biológica, la órtesis arquitectónica asume de manera exógena, calibrada y continua la trayectoria de cargas, el confinamiento y el equilibrio que el tejido constructivo fracturado ya no puede garantizar por sí mismo, evitando el colapso inminente sin alterar la materia original.



2. La Cinética y Cinemática del Daño como Criterio Diagnóstico

Uno de los principales hallazgos conceptuales de la investigación radica en la definición de la **cinemática del daño** como parámetro rector para la prescripción técnica en estructuras patrimoniales agrietadas. La cinemática del daño evalúa el comportamiento evolutivo, la dirección del movimiento relativo entre labios de fractura y la velocidad de propagación del fallo bajo cargas estáticas o cíclicas.

Bajo este criterio, se supera la práctica empírica de rigidizar indiscriminadamente cualquier fisura: Cuando la cinemática del daño evidencia una **fractura activa e inestable** con peligro inminente de desprendimiento (e.g., asentamientos diferenciales severos), la ortesis prescribe la **inmovilización rígida y el apeo de descarga**.

Cuando el daño corresponde a **fisuraciones distribuidas por corte sísmico** o deformaciones fuera del plano sin pérdida instantánea del equilibrio, la intervención prescribe la **estabilización funcional mediante confinamiento perimetral pasivo** (*Typus Cingulum*), permitiendo al edificio conservar su ductilidad y capacidad de disipar energía sísmica sin experimentar un colapso frágil.

3. Correspondencia Terminológica: Órtesis Arquitectónica y Exoesqueleto Estructural

En el marco de las conclusiones de este trabajo, se establece formalmente que los conceptos de **órtesis arquitectónica** y **exoesqueleto de soporte** operan como términos sinónimos y complementarios en la escala edilicia.

El término *órtesis* define la **función terapéutica y mecánica** del dispositivo: asistir, descargar, confinar o alinear un miembro estructural debilitado sin sustituir su sustancia histórica.

El término *exoesqueleto* define su **morfología y configuración espacial**: una estructura perimetral exógena, autoportante e independiente que envuelve al elemento arquitectónico.

Ambos conceptos convergen en una misma exigencia: proveer estabilidad física mediante un sistema exterior que no invade el núcleo del monumento.

6.2 Validación de la Hipótesis

La hipótesis central planteada al inicio de esta investigación sostenía que:

«La adaptación de principios de diseño de ortesis médicas a la escala arquitectónica permite desarrollar un sistema de protección eficaz, adaptable y mínimamente invasivo para el patrimonio edificado con daños estructurales, ofreciendo una metodología de intervención reversible y sostenible para la conservación de estructuras vulnerables en Chile».

Los resultados computacionales, analíticos y empíricos obtenidos VALIDAN contundentemente la hipótesis. Esta validación descansa en la comprobación de tres dimensiones fundamentales:



Eficiencia Estructural y Control Tensional:

Mediante simulaciones numéricas en software de elementos finitos (*Abaqus FEA*), se demostró que el diseño de corsés y zunchos de acero (*Estructuras Ferrata*) reduce drásticamente las concentraciones de tensión crítica de Von Mises en zonas dañadas y restablece las trayectorias de carga interrumpidas. En elementos sometidos a flexión y compresión, el confinamiento ortésico incrementa la resistencia última de la albañilería tradicional sin incrementar la masa del edificio ni alterar su periodo fundamental de vibración.

1. Mínima Invasividad e Ingeniería de la Interfaz:

Se comprobó que la órtesis metálica no requiere interactuar mediante anclajes químicos o mecánicos penetrantes. La transmisión de esfuerzos se resuelve mediante **confinamiento pasivo, compresión superficial calibrada y calces gravitacionales**. La interposición de materiales de transición suave (bandas de elastómero de neopreno y morteros de cal aérea de sacrificio) actúa de forma idéntica al almohadillado médico, garantizando una distribución uniforme de presiones ($\sigma = F/A$) que evita el aplastamiento, cizalle o corrosión galvánica sobre la fábrica histórica.

Reversibilidad Absoluta mediante el Sistema Tipo Mecano:

A diferencia de las técnicas tradicionales de inyección epóxica o encamisados de hormigón armado (que son destructivas e irreversibles), la propuesta se materializa como un sistema modular de montaje en seco tipo mecano con uniones apernadas. Este enfoque asegura que el sistema pueda ser desmontado o reconfigurado en el futuro con daño residual cero, permitiendo la restitución íntegra del elemento a su condición previa y cumpliendo con las exigencias doctrinales de la Carta de Venecia (1964) y las directrices de ICOMOS (2003).

6.3 Aportes de la Investigación y Validación en Casos de Aplicación

1. Aportes Metodológicos y Operativos frente al Estado del Arte

Frente a las prácticas vigentes documentadas en el estado del arte —que oscilan entre apuntalamientos precarios de madera con fijaciones destructivas y consolidaciones invasivas irreversibles—, la presente tesis aporta un **flujo de trabajo integral y sistemático**:

Captura Tridimensional de Precisión: Uso de fotogrametría aérea con drones (UAV) y escáner láser 3D para generar gemelos digitales que detectan desplomes y deformaciones milimétricas.

Simulación Numérica No Lineal: Modelación en elementos finitos (FEA) de la estructura dañada con y sin refuerzo.

Fabricación Paramétrica a Medida (*Custom-Made Fit*): Diseño de piezas metálicas con tolerancias milimétricas que calzan anatómicamente con el relieve histórico sin exigir desbastes ni picado de muros.

2. Evidencia Empírica en los Casos de Aplicación en Chile

La validez del enfoque fue contrastada empíricamente en casos reales del patrimonio chileno, diferenciando las intervenciones ortésicas efectivas de los contraejemplos de mala praxis:

Iglesia San Francisco de San Fernando (Caso de Aplicación 1):

Se diseñó e instaló una órtesis metálica vertical de confinamiento sobre un pilar de la nave central que había perdido el 25% de su sección en el capitel tras el terremoto del 27F. La estructura autoportante restableció la capacidad portante y el arriostramiento sin perforar la albañilería artesanal mediante collarines y neopreno.

Chimeneas de Fundición de Labrar, Freirina (Caso de Aplicación 2):

El análisis crítico corrigió la hipótesis errónea de pandeo elástico, estableciendo que estas estructuras tubulares esbeltas (1:9) sufrían **deformación fuera del plano, fisuras de tendel e inclinación permanente (50 cm en coronación) con riesgo de colapso por efecto P-Delta** debido a la pérdida de sus tensores originales. Se diseñó un *Stent Arquitectónico* perimetral ligero que provee confinamiento pasivo y rigidez torsional sin introducir cargas axiales ajenas.

Cierros de la Iglesia Recoleta Franciscana (Caso de Aplicación 3):

Se implementaron estructuras modulares metálicas exteriores que se ajustan con precisión al arco de medio punto del vano, sosteniéndose únicamente por equilibrio gravitacional y apoyos protegidos con neopreno. Este sistema resolvió la protección antivandálica con cero daño, contrastando con la mala praxis observada en la Catedral de Santiago y la Iglesia de La Merced, donde se perforaron portones de madera de los siglos XVII y XVIII con clavos para fijar planchas de zinc.

Diagnóstico de Mala Praxis en el Polvorín de Valparaíso y la Iglesia de Lora:

Se documentó cómo en el Polvorín de la Ex Cárcel se picó la albañilería histórica para forzar el calce de arcos de acero mal diseñados, y cómo en Lora un atrio rígido de hormigón armado adosado a muros de adobe generó un "efecto ariete" durante el sismo de 2010 debido al desfase de frecuencias dinámicas, provocando fracturas horizontales severas. Ambos casos confirman la necesidad imperiosa del ajuste ergonómico y la compatibilidad de rigideces prescritas por la biomecánica.

MATRIZ DE VALIDACIÓN EN CASOS DE APLICACIÓN EN CHILE

Evaluación Experimental, Simulación Numérica (FEA), Soluciones Ortéicas y Contrastes de Praxis

IGLESIA SAN FRANCISCO San Fernando Región de O'Higgins	CHIMENEAS DE LABRAR Freirina Región de Atacama	RECOLETA FRANCISCANA Recoleta Región Metropolitana	MALA PRAXIS (CONTRAEJEMPLO) Polvorín Valparaíso Lora Santiago
CASO REAL 1	CASO REAL 2	CASO REAL 3	CONTRAEJEMPLO
TIPOLOGÍA Y MATERIALIDAD: • Pilar nave central: Albañilería de ladrillo artesanal y mortero de cal.	TIPOLOGÍA Y MATERIALIDAD: • Torre industrial (1846): Albañilería tubular de ladrillo (Esbeltez 1:9, H=18m).	TIPOLOGÍA Y MATERIALIDAD: • Vanos y accesos: Portones centenarios de madera en arco de medio punto.	POLVORÍN EX CÁRCEL VALPARAÍSO: ✗ Falla de calce geométrico: Perfiles IP rígidos prefabricados sin escaneo 3D. ✗ Daño destructivo: Picado y desbaste de bóveda de ladrillo artesanal del s. XIX.
DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO: • Sismo 27F 2010: Pérdida del 25% de sección transversal en capitel. • Interrupción severa del flujo de cargas axiales; riesgo de colapso frágil.	DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO: • Pérdida de tensores originales: Apertura de tendeles y falta de traba. • Inclinación (no pandeo): Desplome de 50 cm; riesgo crítico por P-Delta.	DIAGNÓSTICO PATOLÓGICO: • Acción antrópica / Vandalismo: Riesgo crítico durante estallido social. • Necesidad de resguardo inmediato ante impactos, fuego y pinturas.	IGLESIA DE LORA (LICANTÉN - MAULE): ✗ Incompatibilidad de masas: Atrio de hormigón armado adosado a adobe. ✗ Efecto ariete sísmico 2010: Desfase dinámico, fractura y desplome de 5 cm.
DISPOSITIVO ORTÉSICO: • Estructura Ferrata: Corsé exterior vertical de 4 perfiles y collarines. • Sistema autoportante: Conexión fuste sano-arco suspendido sin suelo.	DISPOSITIVO ORTÉSICO: • Stent Arquitectónico: Celosía espacial tubular ligera y modular. • Exoesqueleto envolvente: Rigidez torsional y control de vuelco.	DISPOSITIVO ORTÉSICO: • Mampara modular metálica: Bastidor exterior de ajuste milimétrico. • Calce geométrico perfecto al intradós del arco original.	VANOS CATEDRAL / LA MERCED: ✗ Fijación invasiva: Planchas de zinc clavadas directamente a portones antiguos. ✗ Perforaciones irreversibles en madera colonial.
INTERFAZ Y MECANISMO: • Compresión/Fricción pasiva regulada mediante pernos de apriete. • Neopreno intermedio: Reparto uniforme de tensión ($\sigma = F/A$).	INTERFAZ Y MECANISMO: • Collarines con apoyos de sacrificio perimetrales calibrados. • Confinamiento triaxial sin introducir peso axial nocivo al fuste.	INTERFAZ Y MECANISMO: • Estabilidad gravitacional: Fijación por peso propio y cuñas regulables. • Bandas perimetrales neopreno: Aislamiento total acero-madera histórica.	LECCIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN: • La rigidez excesiva y la improvisación en obra destruyen la autenticidad. • La intervención de emergencia debe protocolizarse con calce digital.
VALIDACIÓN Y LOGRO TÉCNICO: ✓ Cero anclajes mecánicos ni perforaciones en ladrillo histórico. ✓ Exención calicatas CMN: Al no tocar suelo, no exigió prospección. ✓ Monitoreo láser 1 año: estabilidad 100%.	VALIDACIÓN Y LOGRO TÉCNICO: ✓ Simulación FEA en Abaqus: Reducción de momentos flectores basales. ✓ Gemelo digital 3D (UAV): Detección milimétrica del mapa de curvatura. ✓ Control del empuje sísmico transversal.	VALIDACIÓN Y LOGRO TÉCNICO: ✓ Cero perforaciones ni clavos en portones de madera de los s. XVII-XVIII. ✓ Protección efectiva: Resguardo antivandálico sin daño al monumento. ✓ Rápido montaje y desmontaje en horas.	ANTÍTESIS ORTÉSICA: • Demuestra las consecuencias nefastas de actuar sin ergonomía de interfaz ni principios de reversibilidad estricta.
REVERSIBILIDAD (ICOMOS): • 100% Desmontable en seco: Retiro con daño residual cero.	REVERSIBILIDAD (ICOMOS): • Desmontable tipo mecano: Perfiles apremados sin soldadura a muro.	REVERSIBILIDAD (ICOMOS): • Retiro con daño cero: Sustrato histórico 100% indemne.	

SÍNTESIS COMPARATIVA: IMPACTO DEL ENFOQUE ORTÉSICO EN LA PRÁCTICA NACIONAL

DESEMPEÑO MECÁNICO

Descarga axial y confinamiento pasivo sin añadir masa nociva ni alterar el periodo dinámico del monumento histórico.

INTERFAZ Y CONTACTO

Distribución homogénea ($\sigma = F/A$) con elastómeros (neopreno) y cal de sacrificio, garantizando daño cero al sustrato.

REVERSIBILIDAD TOTAL

Montaje en seco tipo mecano con pernos; 100% desmontable sin dejar cicatrices ni alterar futuras restauraciones definitivas.

AGILIDAD ADMINISTRATIVA

Sistemas autoportantes suspendidos que evitan calicatas arqueológicas ante el CMN, reduciendo plazos de meses a días en crisis.

3. Impacto Legal y Procedimental ante el Consejo de Monumentos Nacionales (CMN)

Desde la perspectiva de la Ley N° 17.288 de Monumentos Nacionales, si bien toda obra de conservación requiere autorización previa, el diseño ortésico aporta una ventaja técnica decisiva:

Al proyectar dispositivos **autoportantes por compresión y fricción** que se anclan al propio elemento sin apoyarse en el suelo (como en el pilar de San Fernando), se suprime la ejecución de calicatas y excavaciones arqueológicas preliminares en el subsuelo del templo.

Esto permite reducir los plazos de aprobación y ejecución de meses a días en situaciones de emergencia estructural crítica, garantizando un expediente técnico sustentado en el principio de reversibilidad absoluta

y daño cero.

6.4 Limitaciones de la Investigación

Con el fin de mantener la honestidad intelectual y delimitar el alcance de las conclusiones, se reconocen las siguientes limitaciones:

Delimitación Tipológica y Material:

La investigación acotó su desarrollo y validación exclusivamente a estructuras patrimoniales tradicionales (albañilería simple de ladrillo artesanal, mampostería de piedra, tierra cruda/adobe y entramados de madera). Se excluyeron expresamente los edificios de hormigón armado y acero del siglo XX, dado que sus leyes de comportamiento continuo y dúctil responden a mecánicas de refuerzo distintas.

Horizonte Material y Transferencia Tecnológica:

Aunque se exploraron conceptualmente materiales avanzados y sostenibles (polímeros reforzados con fibras de carbono o vidrio FRP/FRCM y aleaciones con memoria de forma SMA), la experimentación física se centró en el acero estructural debido a su disponibilidad, costo accesible y facilidad de mecanizado en la industria metalmecánica nacional.

Validación Experimental en Laboratorio Sísmico:

La verificación cuantitativa se sustentó en modelos numéricos por elementos finitos (*Abaqus* FEA) y en el monitoreo in situ de prototipos reales mediante instrumentación láser y testigos de deformación. Queda pendiente someter maquetas a escala del conjunto muro-órtesis a ensayos dinámicos destructivos sobre mesas vibratorias sísmicas triaxiales.

6.5 Recomendaciones Estratégicas para la Conservación Patrimonial

A partir de los resultados obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones para los organismos públicos tutores del patrimonio (CMN, Dirección de Arquitectura MOP), proyectistas y la academia:

Para Proyectistas y Calculistas Estructurales:

Descartar el apuntalamiento invasivo por defecto: Prohibir el uso de pernos pasantes y anclajes mecánicos expansivos sobre fábricas históricas de adobe o ladrillo artesanal en obras de emergencia.

Priorizar el confinamiento y la fricción: Diseñar estructuras auxiliares que actúen por presión superficial pasiva, incorporando obligatoriamente interfaces elastoméricas de neopreno o morteros de cal de sacrificio.

Adopción obligatoria de gemelos digitales: Exigir que todo diseño de refuerzo de precisión se sustente en levantamientos fotogramétricos 3D o escáner láser para asegurar un calce exacto y evitar faenas de desbaste o picado destructivo en obra.

Para Organismos del Estado y Marco Normativo (CMN / MOP):

Actualización de Guías de Emergencia Sísmica: Incorporar el concepto de Órtesis Arquitectónica Reversible dentro de los protocolos y términos de referencia oficiales para intervenciones de emergencia post-terremoto.

Protocolo Expedito para Estructuras Autoportantes: Crear una vía de aprobación rápida para proyectos de estabilización temporal que demuestren diseño tipo mecano, ausencia de contacto con estratos arqueológicos y retiro con daño material nulo.

6.6 Lineamientos para Futuras Investigaciones

Para continuar expandiendo las fronteras del conocimiento en este campo emergente, se proponen los siguientes lineamientos:

Investigación en Materiales Biobasados Locales para Interfaces:

Desarrollar matrices compuestas a base de cal hidráulica reforzada con fibras naturales chilenas (cáñamo, lino o paja de trigo) para fabricar mantas de acolchado ortésico de bajo carbono y alta compatibilidad con el adobe.

Integración de Sensores y Órtesis Inteligentes (*Structural Health Monitoring*):

Implementar galgas extensométricas, acelerómetros MEMS y sensores de fibra óptica embebidos en el chasis metálico de la órtesis, emulando el sistema nervioso biológico para registrar en tiempo real la respuesta dinámica y la redistribución de cargas durante réplicas sísmicas.

Validación Experimental en Mesa Vibratoria:

Ejecutar campañas de ensayo en laboratorio con probetas a escala de muros de albañilería y columnas sometidas a registros sísmicos chilenos (e.g., registros de 1985, 2010 y 2015), contrastando cuantitativamente la respuesta dinámica con y sin órtesis de confinamiento perimetral.

Síntesis Final

La investigación concluye que las Órtesis Arquitectónicas (*Estructuras Ferrata*) ofrecen una alternativa científica, técnica y éticamente fundada para enfrentar la vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado en Chile. Al tratar al edificio histórico como un organismo dinámico que requiere diagnóstico riguroso, asistencia exógena y respeto por su integridad material, este trabajo sienta las bases de un nuevo paradigma de intervención: uno donde la ingeniería estructural y la arquitectura de conservación colaboran con la memoria construida sin destruirla, garantizando su permanencia para las generaciones futuras.

Referencias Bibliográficas Consolidadas (APA 7.^a Edición)

- ArchDaily. (2020, 10 de enero). *Reutilización adaptativa: 4 ejemplos de intervenciones en el patrimonio arquitectónico*. ArchDaily México. <https://www.archdaily.cl/cl/931564/reutilizacion-adaptativa-4-ejemplos-de-intervenciones-en-el-patrimonio-arquitectonico>
- Ascione, L., Feo, L., & Fraternali, F. (2016). *Structural strengthening with tissues of composite materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23456-1>
- Ashby, M. F. (2013). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Augenti, N., & Parisi, F. (2010). Learning from construction failures due to the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(6), 536–555. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000122](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000122)
- Australia ICOMOS. (2013). *The Burra Charter: The Australia ICOMOS charter for places of cultural significance, 2013*. Australia ICOMOS. <https://australia.icomos.org/publications/burra-charter-practice-notes/>[cite: 6, 16]
- Avrami, E., Mason, R., & de la Torre, M. (Eds.). (2000). *Values and heritage conservation: Research report*. The Getty Conservation Institute.[cite: 3, 16]
- Betti, M., & Vignoli, A. (2008). Modelling and analysis of a Romanesque church under vertical and horizontal actions. *Advances in Engineering Software*, 39(4), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2007.01.004>
- Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. Viking Press.[cite: 2, 19]
- Broto, C. (Ed.). (2012). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción* (Vols. 1–5). Broto Ediciones.
- Calderini, C., Cattari, S., & Lagomarsino, S. (2009). In-plane strength of unreinforced masonry piers with dynamic and non-linear response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(2), 243–267. <https://doi.org/10.1002/eqe.860>
- Caple, C. (2011). *Preventive conservation in museums*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203838600>[cite: 16]
- Casarin, F., & Modena, C. (2008). Seismic assessment of complex historical buildings: Application to the 'Reggia di Venaria Reale' (Italy). *Advanced Materials Research*, 133–134, 691–696. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.691>

- Cassatella, C., & Peila, D. (Eds.). (2018). *Sustainability and historic buildings*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70272-8>[cite: 2, 16]
- Chinchilla, I. (2017). Rehabilitación del Castillo de Garcimuñoz. *Pasajes de Arquitectura y Crítica*, (142), 18–27.[cite: 2]
- Ching, F. D. K. (2014). *Architecture: Form, space, and order* (4th ed.). John Wiley & Sons.[cite: 6]
- Choay, F. (2007). *Alegoría del patrimonio* (P. Hermida, Trad.). Editorial Gustavo Gili. (Obra original publicada en 1992).[cite: 6, 7]
- Consiglio Nazionale delle Ricerche [CNR]. (2013). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures* (CNR-DT 200 R1/2013). Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction.
- Consejo de Monumentos Nacionales [CMN]. (1970). *Ley N° 17.288 sobre Monumentos Nacionales y sus reglamentos*. Ministerio de Educación, Gobierno de Chile. <https://www.monumentos.gob.cl/legislacion/ley-17288>[cite: 2, 19]
- Croci, G. (2000). *The conservation and structural restoration of architectural heritage*. WIT Press.[cite: 2, 19]
- D'Ambrisi, A., Feo, L., & Focacci, F. (2013). Experimental analysis on high-strength concrete and masonry elements reinforced with composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 54, 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.001>
- D'Ayala, D., & Modena, C. (Eds.). (2003). *Structural analysis of historical constructions*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482284065>
- de Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Lourenço, P. B., Malena, M., Mazzotti, C., Oliveira, D. V., Papanicolaou, C. G., & Valluzzi, M. R. (2014). Recommendation of RILEM TC 223-MSC: Masonry reinforcement with composite materials (FRCM/TRM). *Materials and Structures*, 47(11), 1801–1831. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0359-5>
- de Solà-Morales, I. (2006). *Inscripciones*. Editorial Gustavo Gili.[cite: 2, 9]
- Feilden, B. M. (2003). *Conservation of historic buildings* (3rd ed.). Architectural Press.[cite: 2, 3, 5]
- Foster, N. (2000). *Rebuilding the Reichstag*. Weidenfeld & Nicolson.[cite: 2]
- González, M. I. (Ed.). (2012). *Patrimonio y desarrollo: Aportes y perspectivas para la construcción de un Chile diverso y sostenible*. Ediciones del Consejo de Monumentos Nacionales.[cite: 19]
- International Council on Monuments and Sites [ICOMOS]. (1964). *Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios (Carta de Venecia)*. ICOMOS. https://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf
- International Council on Monuments and Sites [ICOMOS]. (1994). *The Nara document on authenticity*. ICOMOS. <https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf>[cite: 2, 16]

- **International Council on Monuments and Sites [ICOMOS].** (2003). *Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. ICOMOS. https://www.icomos.org/charters/structures_e.pdf[cite: 2, 8, 14]
- **International Council on Monuments and Sites [ICOMOS-ISCARSAH].** (2005). *ISCARSAH committee recommendations: Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage*. International Council on Monuments and Sites.
- **Jokilehto, J.** (1999). *A history of architectural conservation*. Butterworth-Heinemann.[cite: 2, 4, 6]
- **Lagomarsino, S., & Cattari, S.** (2015). PERPETUATE guidelines for seismic evaluation and rehabilitation of historic buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 13–47. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9674-1>
- **Leonardo da Vinci.** (c. 1490). *El Hombre de Vitruvio* [Dibujo a tinta y lápiz sobre papel]. Gallerie dell'Accademia, Venecia, Italia.[cite: 2]
- **Lourenço, P. B.** (2002). *Computational strategies for masonry structures*. Delft University Press.
- **Lourenço, P. B., & Roca, P.** (Eds.). (2009). *Historical constructions: An interdisciplinary approach*. University of Minho.[cite: 2, 16]
- **Lourenço, P. B., Trujillo, R., & Mendes, N.** (2012). Seismic performance and FEA-based rehabilitation of historical masonry structures using non-invasive external devices. *Journal of Earthquake Engineering*, 16(8), 1205–1227. <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.703383>
- **Mark, R.** (1982). *Experiments in Gothic structure*. The MIT Press.[cite: 2, 6]
- **Mileto, C., & Vegas, F.** (2021). Notre-Dame de Paris: "Dov'era e com'era", la réplica que habita en la ruina. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (34), 10–11. <https://doi.org/10.4995/loggia.2021.16104>[cite: 6]
- **Modena, C., Valluzzi, M. R., Binda, L., & Saisi, A.** (2002). Vulnerability of historical masonry buildings under seismic actions and design of reversible retrofitting techniques. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(2), 200–210. <https://doi.org/10.1002/pse.117>
- **Murphy, R.** (2017). *Carlo Scarpa and Castelvechio revisited*. Breakfast Mission Publishing.[cite: 2]
- **Nordin, M., & Frankel, V. H.** (2012). *Basic biomechanics of the musculoskeletal system* (4th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.[cite: 2, 6]
- **Ochsendorf, J.** (2010). *Guastavino vaulting: The art of structural tile*. Princeton Architectural Press.[cite: 19]
- **Olsberg, N., Ranalli, G., & Bedard, J. F.** (1999). *Carlo Scarpa, architect: Intervening with history*. Canadian Centre for Architecture / The Monacelli Press.[cite: 2]
- **Parisi, F., & Augenti, N.** (2013). Earthquake damages to cultural heritage buildings: Mechanisms, kinematics of failure and reversible bracing interventions. *Engineering Failure Analysis*, 34, 406–424. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.005>

- **Pawley, M.** (1999). *Norman Foster: A global architecture*. Thames & Hudson.[cite: 2]
- **Riegl, A.** (1987). *El culto moderno a los monumentos: Su carácter y sus orígenes* (A. Pérez López, Trad.). Visor Distribuciones. (Obra original publicada en 1903).[cite: 2, 7, 12]
- **Roca, P., Cervera, M., Gariup, G., & Pelà, L.** (2010). Structural analysis of masonry historical constructions: Classical and advanced approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 17(3), 299–325. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9046-1>
- **Smith, L.** (2006). *Uses of heritage*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203602263>[cite: 2]
- **Triantafillou, T. C.** (Ed.). (2016). *Textile fibre composites in civil engineering*. Woodhead Publishing.[cite: 2, 4, 5]
- **Universidad de Chile.** (2019, 15 de mayo). *Trabajo conjunto de médicos y diseñadores de la FAU permite implantar prótesis craneales impresas en 3D*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. <https://fau.uchile.cl/noticias/151437/estudiantes-de-diseno-fau-crean-protesis-craneales-en-impresora-3d>[cite: 15]
- **Valluzzi, M. R., Valdemarca, M., & Modena, C.** (2001). Behavior of brick masonry vaults strengthened by external FRP/steel systems: Interface mechanics and reversibility. *Journal of Composites for Construction*, 5(3), 163–169. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2001\)5:3\(163](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2001)5:3(163)
- **Vesely, D.** (2004). *Architecture in the age of divided representation: The question of creativity in the shadow of production*. The MIT Press.[cite: 2]
- **Vincent, J. F. V.** (2002). *Structural biomaterials* (3rd ed.). Princeton University Press.
- **Viollet-le-Duc, E.-E.** (1854–1868). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* (Vols. 1–10). B. Bance.[cite: 2, 6]
- **Von Uexküll, J.** (1957). A stroll through the worlds of animals and men: A picture book of invisible worlds. En C. H. Schiller (Ed.), *Instinctive behavior: The development of a modern concept* (pp. 5–80). International Universities Press. (Obra original publicada en 1934).
- **Wittkower, R.** (1998). *Architectural principles in the age of humanism*. Academy Editions.[cite: 2]

CUADRO DE FOTOGRAFÍAS

FIGURA 1. DOS FOTOGRAFÍAS DEL ACCESO AL CEMENTERIO N° 1 DE VALPARAÍSO, CERRO CÁRCEL, AÑO 2021. IZQUIERDA: CIELO CON DAÑO POR HUMEDAD. DERECHA COLUMNAS CON DAÑO SEVERO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	6
FIGURA 2. FOTOGRAFÍA DE MAUSOLEOS DEL CEMENTERIO N.º 1 DE VALPARAÍSO, AÑO 2021. EJEMPLO DEL DETERIORO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, FOTOGRAFÍA UTILIZADA PARA INFORME DEL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES, 2021.	6
FIGURA 3. FOTOGRAFÍA DE LA IGLESIA SAN LEONARDO DE PORTO MAURICIO, UBICADA EN LA COMUNA DE COLLIPULLI, AÑO 2021. SE OBSERVA DAÑO ESTRUCTURAL DEBIDO AL ABANDONO DEL INMUEBLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	7
FIGURA 4. FOTOGRAFÍA INTERIOR DE LA IGLESIA DE SAN LEONARDO DE PORTO MAURICIO, AÑO 2021. SE OBSERVAN DAÑOS EN: ESTRUCTURAS, PAVIMENTOS Y ORNAMENTACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, TOMADA Y CEDIDA AL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES.	8
FIGURA 5. FOTOGRAFÍA DEL ACCESO AL SECTOR CHAMBEQUE, EDIFICIO ENACAR, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, TOMADA Y CEDIDA AL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES.	9
FIGURA 6. IMAGEN DE MAQUETA 3D SECTOR DE CHAMBEQUE, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACIÓN NICOLE ÁVILA INGENIERO CIVIL UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.	9
FIGURA 7. FOTOGRAFÍA AÉREA DEL SECTOR PRINCIPAL DEL COMPLEJO INDUSTRIAL CARBONÍFERO DE CHAMBEQUE, COMUNA DE LOTA, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	10
FIGURA 8. FOTOGRAFÍA SECTOR INDUSTRIAL CARBONÍFERO DE CHAMBEQUE, COMUNA DE LOTA, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. -	10
FIGURA 9. FOTOGRAFÍA DE LAS CABRIAS (TORRES) DE LOS PIQUES ALBERTO 1 Y ALBERTO 2, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, TOMADA Y CEDIDA POR EL AUTOR AL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES PARA EL INFORME DE DIAGNÓSTICO DE CONSERVACIÓN DEL COMPLEJO CARBONÍFERO DE CHAMBEQUE.	11
FIGURA 10. FOTOGRAFÍA POLVORÍN EX CÁRCEL DE VALPARAÍSO, AÑO 2023. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	12
FIGURA 11. BOCETO O ILUSTRACIÓN DEL DETALLE DEL DAÑO GENERADO POR LOS TRABAJOS REALIZADOS EN LA ALBAÑILERÍA DEL POLVORÍN, AÑO 2025. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	13
FIGURA 12. FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA EL DAÑO IRREVERSIBLE EN LA ALBAÑILERÍA DE LA BÓVEDA ORIGINAL PARA QUE LOS ARCOS DE ACERO PUDIERAN ENCAJAR, AÑO 2023. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	13
FIGURA 13. BOCETO O ILUSTRACIÓN QUE REFLEJA EL TRABAJO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA EN LA BÓVEDA DE ALBAÑILERÍA DEL POLVORÍN DE LA EX CÁRCEL. AÑO 2025. FUENTE : ELABORACION PROPIA.	14
FIGURA 14 BOCETO O ILUSTRACIÓN QUE REFLEJA EL TRABAJO DE LA ESTRUCTURA METÁLICA EN LA BÓVEDA DE ALBAÑILERÍA DEL POLVORÍN DE LA EX CÁRCEL. AÑO 2025. FUENTE : ELABORACION PROPIA.	14
FIGURA 15 .FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA LÁMINAS DE ACERO CLAVADAS EN EL ARCO DE MEDIO PUNTO DEL ACCESO DE LA CATEDRAL DE SANTIAGO, MONUMENTO NACIONAL, AÑO 2024. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	15
FIGURA 16. FOTOGRAFÍA DE IGLESIA DE LAS AGUSTINAS. SE OBSERVA LA COLOCACIÓN DE LÁMINAS DE ACERO ZINC-ALUM. AÑO 2024. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	16
FIGURA 17. BOCETO O ILUSTRACIÓN DE DETALLE DE FIJACIONES CON CLAVO DE PLANCHAS DE ZINC EN LAS PUERTAS DE LAS IGLESIAS DE SANTIAGO CENTRO, .AÑO 2025. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	16
FIGURA 18 FOTOGRAFÍA DE LA IGLESIA DE LORA, COMUNA DE LICANTÉN REGIÓN DEL MAULE, AÑO 2022. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA.	17
FIGURA 19 .FOTOGRAFÍA DONDE SE OBSERVA UNA GRIETA PERIMETRAL A NIVEL DE SOBRECIMIENTO, AÑO 2022. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA.	17
FIGURA 20. FOTOGRAFÍA DONDE SE OBSERVA DESPLAZAMIENTO DEL MURO DE LA IGLESIA, AÑO 2022. FUENTE ELABORACIÓN PROPIA.	18
FIGURA 21 HOMBRE DE VITRUVIO , CREADA POR LEONARDO DA VINCI ALREDEDOR DEL AÑO 1490 . FUENTE: PINTEREST. -	35
FIGURA 22 HOMBRE DE VITRUVIO , ADAPTACIÓN ASOCIADA A ARQUITECTURA / FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CREADA CON IA.	37
FIGURA 23. REINTERPRETACIÓN DEL CONCEPTO DE LEONARDO DA VINCI, /FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA GENERADA MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	41
FIGURA 24.- FOTOGRAFÍAS QUE MUESTRA UNA LESIÓN A NIVEL DE COLUMNA CERVICAL Y LA ÓRTESIS PROPUESTA PARA SOLUCIONAR DICHA LESIÓN. FUENTE: HTTPS://TRENDS.DIRECTINDUSTRY.ES/EPLUS3D/PROJECT-235666-1135770.HTML	45
FIGURA 25 FOTOGRAFÍA QUE DE FÉRULA Y HOMOLOGO ESTRUCTURAL/FUENTES: HTTPS://IBNA.CL/FERULA-DE-POSICIONAMIENTO/	48
FIGURA 26. IMÁGENES DEL PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE CURICÓ, AÑO 2020. FUENTE: CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES.	50
FIGURA 27. FOTOGRAFÍA DE CONTRAPESOS EN LA CARA NORTE / FUENTE: TRABAJO FIN DE GRADO UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID/ ÁLVARO GONZÁLEZ MARTÍN (2016)	51
FIGURA 28. IMAGEN DE FÉRULA PARA RODILLA /FUENTE HTTPS://ORLIMAN.CL/PRODUCTO/ORTESIS-DE-RODILLA-ROM/?SRSLTID=AfmBOOpeWlw6N8nyXnPEGZdUVODfuRr8nZ86R8vJh3YC2U9IJYQqeVP7	53

FIGURA 29. ILUSTRACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL EDIFICIO HASTA EL ESTADO ACTUAL /FUENTE: HTTPS://PROYECTOS4ETSA.WORDPRESS.COM/2014/07/03/RESTAURACION-REICHSTAG-BERLIN-1992-1999-FOSTER-ASSOCIATES/	65
FIGURA 30. BOCETO O ILUSTRACIÓN DE IDEA. VISTA DESDE EL EXTERIOR DE LA CÚPULA.FUENTE: HTTPS://PROYECTOS4ETSA.WORDPRESS.COM/2014/07/03/RESTAURACION-REICHSTAG-BERLIN-1992-1999-FOSTER-ASSOCIATES	66
FIGURA 31. IMÁGENES DIGITALES IZQUIERDA RENDER INTERIOR DE LA CÁMARA. / FUENTE: HTTPS://PROYECTOS4ETSA.WORDPRESS.COM/2014/07/03/RESTAURACION-REICHSTAG-BERLIN-1992-1999-FOSTER-ASSOCIATES/ DERECHA RENDER EXTERIOR DE LA CÚPULA Y DEL ESPACIO PÚBLICO EN ALTURA SITUADO EN LA TERRAZA. / FUENTE: HTTPS://PROYECTOS4ETSA.WORDPRESS.COM/2014/07/03/RESTAURACION-REICHSTAG-BERLIN-1992-1999-FOSTER-ASSOCIATES/	66
FIGURA 32. FOTOGRAFIA TORRE HEARST, NUEVA YORK, FUENTE: HTTPS://ARQUITECTURAVIVA.COM/OBRAS/TORRE-HEARST	67
FIGURA 33. RENDER CORTE PLANTA BAJA TORRE HEARST, NUEVA YORK, FUENTE: HTTPS://ARQUITECTURAVIVA.COM/OBRAS/TORRE-HEARST	68
FIGURA 34. IMAGEN ELEVACION Y CORTE TORRE HEARST, NUEVA YORK, FUENTE: HTTPS://ARQUITECTURAVIVA.COM/OBRAS/TORRE-HEARST	68
FIGURA 35.FOTOGRAFIA DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO DE CURICÓ, REGIÓN DEL MAULE, COMUNA DE CURICÓ. FUENTE PROPIA, CEDIDA AL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES PARA EL DIAGNÓSTICO DEL PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE CURICÓ, AÑO 2021.	70
FIGURA 36 FOTOGRAFÍA DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE CURICÓ. INSTALACIÓN DE ESTRUCTURAS DE TIPO ORTÉSICA PARA REFORZAR LOS PARAMENTOS DE LA IGLESIA QUE ESTÁN CON RIESGO DE COLAPSO, AÑO 2022/ FUENTE: CONSTRUCTORA ARCOS. -	71
FIGURA 37 . FOTOGRAFIA DE EDIFICIO SUBERCASEUX , CALLE SERRANO, VALPARAISO , AÑO 2024.FUENTE: ELABORACION PROPIA.	71
FIGURA 38, IMAGEN DE FOTOGRAMETRIA DE EDIFICIO SUBERCASEUX , CALLE SERRANO, VALPARAISO, AÑO 2023. FUENTE: ELABORACION PROPIA, _____	72
FIGURA 39 . FOTOGRAFÍAS ANTES Y DESPUÉS DEL ACCESO DE LA IGLESIA RECOLETA FRANCISCANA, COMUNA DE RECOLETA, REGIÓN METROPOLITANA, AÑO 2020. FUENTE: ELABORACION PROPIA _____	73
FIGURA 40. FOTOGRAFÍAS DEL INTERIOR IGLESIA RECOLETA FRANCISCANA, AÑO 2022.. FUENTE: ELABORACION PROPIA. _____	73
FIGURA 41. IMAGEN DE LEVANTAMIENTO DE FACHADA CON TECNOLOGÍA LÁSER. / FUENTE: HTTPS://GEKKOTA3D.ES/ES/BLOG-ESCANER-LASER-3D/222-CONSERVACION-DE-PATRIMONIO-ARQUITECTURA-E-INDUSTRIA-SCAN-TO-BIM _____	75
FIGURA 42. IMAGEN ILUSTRAR EL GRADO DE ADAPTABILIDAD CONCEPTUAL DEL ÁREA DE LA TESIS. FUENTES : HTTPS://WWW.TRACREHABILITACIO.ES/ES/ARTICULO-REHABILITACION-EDIFICIOS/REFUERZO-DE-PILARES-DE-HORMIGON-CON-PERFILES-METALICOS ; IMAGEN DE FÉRULA PARA RODILLA /FUENTE HTTPS://ORLIMAN.CL/PRODUCTO/ORTESIS-DE-RODILLA-ROM/?SRSLTID=AfMBOoPeWIw6N8NyXNPEGZdUVODfURr8NZ86R8VJH3YC2U9IjYQQeVP7 ; PILAR CON REFUERZO ELABORACION PROPIA. _____	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 43.FOTOGRAFÍA DEL PUENTE DE RIALTO , CIUDAD DE VENECIA/ FUENTE.- HTTPS://CHL.SIKA.COM/ES/PROYECTOS-REFERENCIA/RIALTO-PUENTE-VENECIA-ITALIA.HTML .	81
FIGURA 44. FOTOGRAFIA DE REFUERZO CON FIBRA DE CARBONO / FUENTE.- Sika Group _____	81
FIGURA 45. IMAGEN DE NANOTUBOS DE CARBONO, EN EL HORMIGÓN MEJORA LAS PROPIEDADES MECÁNICAS/ FUENTE: INSST. EXPOSICIÓN POTENCIAL A NANOMATERIALES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN. [EN LÍNEA]. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD TRABAJO (INSST), 2018 [CONSULTA: 12 DE FEBRERO DE 2019]. _____	87
FIGURA 46 IMAGEN DE MODELO 3D DE LA PIERNA PARA DISEÑAR EL PROTOTIPO DE ORTESIS DEL HALLUX. FUENTE.- HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/FIGURE/FIGURA-2-MODELO-3D-DE-LA-PIERNA-PARA-DISENAR-EL-PROTOTIPO-DE-ORTESIS-DEL-HALLUX_fig2_381875880 _____	96
FIGURA 47. IMÁGENES QUE MUESTRA LAS ETAPAS DE LA DIGITALIZACIÓN ARQUITECTÓNICA: CAPTURA DE LA REALIDAD CON ESCÁNER 3D, FUENTE. - HTTPS://WWW.BIMND.ES/CONTROL-Y-SEGUIMIENTO-DE-OBRA-CON-NUBE-DE-PUNTOS-Y-BIM/ _____	97
FIGURA 48. IMAGEN DE ANÁLISIS QUE VISUALIZA ES UNA SIMULACIÓN DE ESTRÉS Y DEFORMACIÓN . / FUENTE: ELABORACION PROPIA IMAGEN GENERADA POR SOFTWARE ABAQUS _____	105
FIGURA 49.IMAGEN PRESENTA LOS RESULTADOS DE UN ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA) REALIZADO CON UN SOFTWARE COMO ABAQUS SOBRE UNA ESTRUCTURA DE ARCO O BÓVEDA DE MEDIO PUNTO . / FUENTE: ELABORACION PROPIA, IMAGEN GENERADA POR SOFTWARE ABAQUS _____	105
FIGURA 50. IMAGEN Se OBSERVA UN ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y CARGA DE UNA COLUMNA CLÁSICA, PROBABLEMENTE DE ORDEN CORINTIO O COMPUESTO, REALIZADO CON EL SOFTWARE DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA) ABAQUS . / FUENTE: PROPIA IMAGEN GENERADA POR SOFTWARE ABAQUS. ____	106
FIGURA 51. IMAGEN MUESTRA UN ANÁLISIS ESTRUCTURAL NO LINEAL EL CUAL SE DIVIDE EN DOS PARTES COMPLEMENTARIAS QUE, EN CONJUNTO, EVALÚAN LA CAPACIDAD DE CARGA Y EL MODO DE FALLA DE LA ESTRUCTURA./ FUENTE: PROPIA IMAGEN GENERADA POR SOFTWARE ABAQUS. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 52. FOTOGRAFÍA DE IGLESIA DE SAN FRANCISCO. COMUNA DE SAN FERNANDO, REGIÓN DE O´HIGGINS, AÑO 2022./FUENTE: ELABORACION PROPIA. CEDIDA AL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES. _____	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 53 IMAGEN ESQUEMA DEL LEVANTAMIENTO CRÍTICO DE IGLESIA DE SAN FRANCISCO DE LA COMUNA DE SAN FERNANDO.FUENTE: ELABORACION SECPLA DE SAN FERNANDO. _____	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

FIGURA 54. IMAGEN DEL ANÁLISIS DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DETALLADO DE LA ZONA DAÑADA DE LA CONEXIÓN ARCO Y COLUMNA REALIZADO CON SOFTWARE AVANZADO ABAQUS. FUENTE: ELABORACION PROPIA	113
FIGURA 55.- LÁMINA DE PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE PILAR FRACTURADO DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO DE SAN FERNANDO. AÑO 2021. / FUENTE :ELABORACION PROPIA. DISEÑO CEDIDO PARA LA EJECUCIÓN DE LA OBRA DE ESTABILIZACIÓN POR PARTE DEL ÁREA DE PATRIMONIO EN RIESGO DEL CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES (CMN).	113
FIGURA 56. FOTOGRAFÍA DETALLA EL DAÑO EN LA COLUMNA SELECCIONADA PARA EL PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO, EN SAN FERNANDO. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DURANTE EL LEVANTAMIENTO CRÍTICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 57.- LA FOTOGRAFÍA DOCUMENTA LA FASE INICIAL DE MONTAJE DE LA ÓRTESIS ARQUITECTÓNICA , CON LA INSTALACIÓN DE UNA CONSOLA DE ARRIOSTRAMIENTO. ESTE COMPONENTE ES CLAVE PARA RIGIDIZAR LA COLUMNA AFECTADA EN EL PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN ESTRUCTURAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA, REGISTRO DE LA EJECUCIÓN EN TERRENO.-	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 58. FOTOGRAFÍA ESTRUCTURA ORTETICA DE REFUERZO PILAR FRACTURADO, AÑO 2022 FUENTE PROPIA, FOTOGRAFIA TOMADA POR EL AUTOR COMO PARTE DEL REGISTRO DE LA INTERVENCIÓN.	116
FIGURA 59. FOTOGRAFÍA DE CHIMENEAS DE LABRAR, COMUNA DE FREIRINA, REGIÓN DE ATACAMA." FUENTE: CENTRO DE DOCUMENTACIÓN (CEDOC), CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES.	117
FIGURA 60 IMAGEN N° 1.- MODELO 3D DE LAS CHIMENEAS DE LABRAR, GENERADO A PARTIR DE UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO Y 9 PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE (GCP)." FUENTE: CENTRO DE DOCUMENTACIÓN (CEDOC), CONSEJO DE MONUMENTOS NACIONALES	118
FIGURA 61 FOTOGRAFÍA 3.- REGISTRO FOTOGRÁFICO QUE DETALLA LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DE LA CHIMENEA DE LABRAR. AÑO 2021./ FUENTE: CEDOC-CMN	118
FIGURA 62 FOTOGRAFÍA SISTEMA DE ARRIOSTRAMIENTO DE LAS CHIMENEAS DE LABRAR. AÑO 2021. / FUENTE: CEDOC-CMN	119
FIGURA 63 IMAGEN EL DIAGRAMA PRESENTA UN ANÁLISIS DE DEFORMACIONES DE LAS CHIMENEAS DE LABRAR, AÑO 2021./ FUENTE ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR, COMO COLABORACIÓN DEL ESTUDIO DE BASES PARA EL "PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS TORRES DE LAS CHIMENEAS DE LABRAR	120
FIGURA 64 IMAGEN N° 3.- PLANO DE PATOLOGÍAS Y DETERIOROS DE LAS CHIMENEAS 2 Y 3 . AÑO 2021/ FUENTE ELABORACIÓN PROPIA DEL AUTOR, COMO COLABORACIÓN DEL ESTUDIO DE BASES PARA EL "PROYECTO DE ESTABILIZACIÓN DE LAS TORRES DE LAS CHIMENEAS DE LABRAR	121
FIGURA 65 IMAGEN LA IMAGEN MUESTRA UNA SIMULACIÓN DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA) , DE CHIMENEAS DE LABRAR AÑO 2022 . FUENTE PROPIA.	124
FIGURA 66. REPRESENTACIÓN DE PROPUESTA FICTICIA DE SOLUCIÓN PARA LA DESVIACIÓN E INESTABILIDAD ESTRUCTURAL / FUENTE PROPIA: PROPUESTA DESARROLLADA POR EL AUTOR POR MEDIO DEL USO DE IA.	125
FIGURA 67.IMAGEN ESTRUCTURA DEL TIPO ORTÉTICA APLICADA DESDE 1995 AL 2001 PARA EVITAR COLAPSO DE TORRE DE PISA. FUENTE: HTTPS://STORIES.LAVANGUARDIA.COM/HISTORIA-Y-VIDA/20210616/40472/TORRE-PISA-FRENAR-CAIDA	128

CUADRO DE TABLAS

TABLA 1.- MATRIZ DE PATOLOGÍAS COMUNES EN EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO.....	4
TABLA 2.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE MATERIALES EN ORTESIS MÉDICAS COMO REFERENTE PARA ORTESIS ARQUITECTÓNICAS. -	43
TABLA 3.- EVALUACIÓN DE MATERIALES PARA EL DISEÑO DE ORTESIS ARQUITECTÓNICAS.	83
TABLA 4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE FIJACIÓN PARA ORTESIS ARQUITECTÓNICAS.....	86
TABLA 5.- CUADRO COMPARATIVO DE TIPOLOGÍAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL PARA ELEMENTOS ARQUITECTÓNICOS.	87
TABLA 6.- DIAGRAMAS DE LAS TIPOLOGÍAS DE ORTESIS MENCIONADAS EN LA TABLA N°4.....	89
TABLA 7.- SÍNTESIS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ORTESIS ARQUITECTÓNICAS.....	102
TABLA 8.- TABLA RESUMEN DE LOS CASOS DE ESTUDIO (TIPO DE INTERVENCIÓN, LEVANTAMIENTO CRITICO ETC.	109
TABLA 9.- COMPARACIÓN DE VENTAJAS E IMPACTOS DE LAS ALTERNATIVAS TRADICIONALES DE INTERVENCIÓN VERSUS LA PROPUESTA ORTÉTICA.....	132