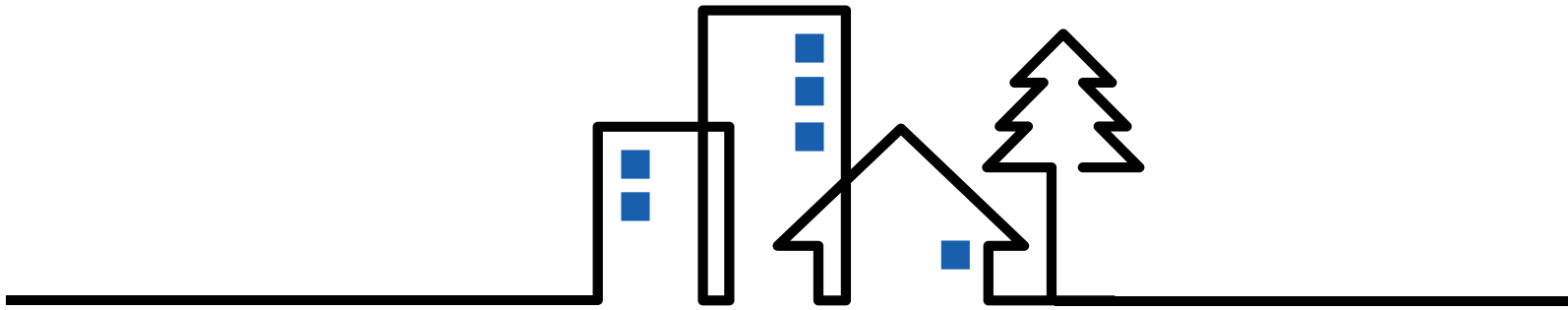




RESILIENCIA URBANA

**METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO
Y LEVANTAMIENTO PARA
LA CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS
HISTÓRICOS**

COLECTIVO DE AUTORES



RESILENCIA URBANA

METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO Y LEVANTAMIENTO PARA LA CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

COLECTIVO DE AUTORES



Con el apoyo financiero de la Federación de Rusia



EDICIONES **BOLOÑA**
PUBLICACIONES DE LA OFICINA DEL HISTORIADOR

La Habana, 2023

AUTORES

Taller de Diagnóstico y Levantamiento-Empresa RESTAURA
de la Oficina del Historiador de La Habana

Ing. Niurka Fernández Muñoz

Ing. Nayelis Sánchez Ruiz

Ing. Roberto Castellá Bello

Tec. Ángela Diomedes Almeyda Rodríguez

Tec. Edrey Berrio Alayo

Ing. Alberto Hernández Oroza

Lic. Rafael González Hernández

Ing. Patricia Braña Nuez

Lic. Alina Romeo Sáez

Lic. Betzaida Rodríguez Rosales

SUPERVISIÓN DE EMPRESA RESTAURA

Arq. Tatiana Fernández de los Santos, Directora General

Arq. Lohania Cruz González, Subdirectora

Lic. Pablo A. Riaño San Marful, Historiador y Director de Investigación y Desarrollo

REVISORES EXTERNOS

Dr. Ing. Abel Castañeda Valdés: Jefe del Laboratorio de Protección de Materiales.
Centro Nacional de Investigaciones Científicas, La Habana, Cuba

Dr. Lic. Sergio Raymant Arencibia Iglesias: Vicedecano de Investigación, Postgrado
y Colaboración Internacional. Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana

EQUIPO COORDINADOR DEL PNUD

Arq. Rosendo Mesías González

Ing. Liliana Pino Carballido

Lic. Dayana Kindelan Peñalver

Lic. Elvilayne Vidal Medina

DISEÑO: GEOESTUDIO

ISBN: 978-959-294-277-1

2023

Los puntos de vista que se expresan en esta publicación son de los autores y autoras y no reflejan necesariamente las opiniones de las Naciones Unidas, de la Federación de Rusia, ni del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I ESTRUCTURAS DE MADERA	5
CAPÍTULO II ESTRUCTURAS DE PIEDRA	35
CAPÍTULO III ESTRUCTURAS DE ACERO Y HORMIGÓN	63
CAPÍTULO IV ESTUDIOS BIOLÓGICOS A LAS EDIFICACIONES	101
CAPÍTULO V TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO	127
RESUMEN BIOGRÁFICO DE LOS AUTORES	151

INTRODUCCIÓN

La gestión integral de riesgos en zonas urbanas es especialmente compleja, en donde La Habana, como principal urbe de Cuba, presenta el mayor riesgo de derrumbes producto del precario estado constructivo de las edificaciones. En este contexto, resulta vital la preparación y desarrollo de capacidades de actores nacionales y locales para diseñar estrategias que promuevan un enfoque integral multi-amenazas, basados en la identificación de los principales riesgos que enfrenta la ciudad.

La capital presenta una elevada vulnerabilidad como resultado del precario estado técnico de las construcciones. Estudios realizados en este sentido demostraron que el 43% del fondo habitacional se califica de regular y mal estado técnico con riesgo de colapso parcial o total, a un ritmo promedio de 6 derrumbes diarios de distintas envergaduras. La mayoría de estas edificaciones se ubican en las urbes más antiguas y densamente habitadas. La población que se concentra en el área central es del orden de 600 mil personas, respecto a una población total de 2,131,480 habitantes. De ellos, el 22% de los habitantes tiene más de 60 años de edad, lo cual complejiza esta problemática.

Ante este desafío, se impulsa la voluntad política del Gobierno cubano de dar una atención priorizada al problema, mediante la aplicación de acciones preventivas basadas en la reubicación de los afectados en albergues y viviendas de tránsito, para evitar ante todo la pérdida de vidas humanas. El Gobierno de la capital se propone mejorar el fondo habitacional a través de diferentes programas basados en la aplicación de acciones de emergencia y rehabilitación. Sumado a estos esfuerzos se coordina un programa de intervención, a nivel de ciudad, para elevar la resiliencia urbana mediante el desarrollo de un proyecto de colaboración internacional.

El Proyecto de colaboración que gestiona el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con fondos de la Unión Europea, a través del Gobierno de La Habana, tiene el propósito de fortalecer las capacidades institucionales y comunitarias para manejar con efectividad múltiples peligros, en áreas de mayor exposición y vulnerabilidad de La Habana. Se incluye como resultado a alcanzar la formación y capacitación de un equipo multidisciplinario dedicado a la evaluación técnica del estado constructivo de las edificaciones.

El presente libro, desarrollado a partir de la experiencia de trabajo del Taller de Diagnóstico y Levantamiento, perteneciente a la Empresa Filial RESTAURA de la Oficina del Historiador de La Habana (OHCH), aborda a través de 6 capítulos, las metodologías generales, técnicas y equipamiento necesarios para realizar acciones de investigación de diagnóstico y levantamiento arquitectónico. En el mismo se abordan las temáticas relacionadas con los sistemas constructivos basados en madera, piedra, hormigón armado y acero; la importancia de las investigaciones biológicas al estudio patológico de las edificaciones para su conservación, y las metodologías para realizar levantamientos arquitectónicos a partir del empleo de herramientas modernas como escáner láser y fotogrametría digital.

Para el desarrollo del libro se seleccionó una amplia variedad de obras de elevado valor patrimonial de diferentes épocas y sistemas constructivos, como el Convento de Santa Clara de Asís, Palacio de los Capitanes Generales, Teatro Martí, Estatua del Cristo de La Habana, Catedral de La Habana, Torreón de Cojímar, Capitolio Nacional, Teatro Campoamor; entre otros. Estas obras escogidas han presentado a lo largo de su vida útil, diferentes patologías, las cuales son presentadas y debatidas en el texto. Se apoya la descripción con más de 200 fotografías históricas y actuales, entre las que se incluyen tanto vistas microscópicas de colonizaciones biológicas, como modelos en 3 dimensiones (3D) de techos y esculturas.

El contenido del libro es el resultado de un encomiable trabajo de diagnóstico, como resultado de la experiencia acumulada durante más de 2 décadas en el estudio y monitoreo sistemático a la mayoría de las edificaciones presentes en el Centro Histórico de La Habana. En el mismo se involucraron especialistas de diferentes ramas de la ingeniería Civil y Química, además de Arquitectura, Biología y Microbiología, con el apoyo de arquitectas, historiadores e investigadores de la Empresa RESTAURA.

Es la voluntad de los autores y autoras de esta complicación técnica, que sirva de referente para el trabajo de identificación de patologías en edificaciones, que contribuya a su conservación, teniendo en cuenta la importancia del proceso de restauración de aquellas de carácter histórico y patrimonial. Consideramos que las metodologías pueden ser aplicables y adaptables a cualquier contexto tanto de La Habana como del resto del país.

CAPÍTULO I

ESTRUCTURAS DE MADERA

AUTORES

NIURKA FERNÁNDEZ MUÑOZ, NAYELIS SÁNCHEZ RUIZ, ROBERTO CASTELLÁ BELLO

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la madera como material de construcción se remonta a los inicios de la civilización, con la creación de primitivos bohíos hechos con ramas de árboles. Con el paulatino desarrollo de herramientas y nuevas formas de concebir el mundo y los materiales disponibles, se construyeron majestuosas estructuras, algunas de ellas presentes hasta nuestros días, lo que ha permitido interpretar la historia y la cultura de los pueblos. Desde entonces la madera ha sido por excelencia uno de los materiales más codiciados debido a sus propiedades, disponibilidad y estética, empleándose como elemento para acabados o como materia prima principal. Por otra parte, la madera es predilecta en tema de desarrollo sostenible, de gran importancia en la actualidad, considerándose un factor clave para la sustentabilidad de las sociedades.

Según el enfoque de la construcción, la madera es entendida como el tronco y las ramas gruesas de los árboles. Este material es renovable y de origen natural, su procesamiento y producción demandan bajo consumo energético, no generan vapores químicos tóxicos y dejan menos residuos que la mayor parte del resto de los materiales constructivos, por lo que, en esos aspectos, la madera es más segura al manejo y menos agresiva al medio ambiente. Esta es resistente a la acción de gran cantidad de compuestos químicos y se comporta predeciblemente durante los incendios, a pesar de ser combustible, pues supone una pérdida de sección constante en el tiempo. Tiene una buena relación resistencia/peso, con el cual se logran ejecutar conexiones y empalmes fácilmente por su ligereza.

La adaptabilidad de la madera hace que se emplee de forma muy variada en la construcción. Permite adecuarse al entorno mediante una amplia diversidad de formas y texturas, lo que desde el punto de vista estructural, posibilita salvar grandes luces, de este modo, se ajusta a casi cualquier diseño y estilo. El uso de sistemas constructivos de madera reduce los tiempos de ejecución con respecto a otros materiales debido a que en ellos se realizan montajes limpios y en ausencia de agua. La funcionalidad y belleza de este material son insustituibles.

2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA EMPLEADA EN LA CONSTRUCCIÓN

Las propiedades de la madera son muy versátiles, dependen de la especie específica, de las condiciones ambientales y de otros factores como la permanencia de cargas, etc. Es un material no homogéneo, pues la composición de sus fibras y estructura no son uniformes en cada una de las diferentes fracciones. Asimismo, es un material anisotrópico debido a que las propiedades físicas y mecánicas difieren según la dirección de análisis en un punto determinado.

Las propiedades mecánicas de mayor importancia para la construcción son:

Resistencia a compresión: La resistencia que ofrece este material a esfuerzos de compresión paralela o transversal a la dirección de sus fibras se denomina resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión paralela a las fibras es mayor porque las fibras están ubicadas con su eje longitudinal en esa dirección que se aproxima a la orientación de las microfibras que forman la capa media de la pared celular, siendo esta donde las fibras tienen mayor espesor. La compresión paralela es importante para elementos como columnas y/o pies derechos, pilotes, etc. Cuando las cargas actúan transversalmente, las fibras se someten a esfuerzos perpendiculares a su eje y se comprimen las cavidades que existen en ellas. La resistencia a compresión transversal es importante en las tablas para pisos.

Resistencia a la tracción: La resistencia que ofrece la madera a esfuerzos de tracción se denomina resistencia a la tracción. Esta propiedad en la madera presenta valores elevados. Es un material idóneo para trabajar a tracción en la dirección de las fibras, solo se limita su empleo por ser difícil la transmisión de los esfuerzos entre piezas a través de las uniones. La rotura por tracción se considera frágil. Esta propiedad es importante para los elementos que conforman cerchas.

Resistencia al cortante: Se entiende como la capacidad para resistir los esfuerzos perpendiculares a las fibras longitudinales. El cizallamiento o esfuerzo por cortante se da cuando la pieza experimenta flexión. Es determinante en el cálculo de vigas, encofrados, cerchas, etc. La resistencia es de 3 a 4 veces mayor en la dirección perpendicular a las fibras y es mayor en la dirección radial que en la tangencial.

Resistencia a la flexión: Ocurren cuatro acciones simples debido a la flexión de la madera: compresión paralela a las fibras, tracción paralela a las fibras, cizallamiento horizontal y compresión normal a las fibras en las zonas de los puntos de apoyo. La rotura del elemento de madera flexionado sucede porque se forman fallas de compresión muy pequeñas en las fibras, a las que les siguen fallos generalizados por compresión, el eje neutro se desplaza a la zona de tracción y aumentan las deformaciones totales provocando el fallo por tracción.

Dureza: Es la resistencia del material a ser marcado, al rayado o al desgaste. Se expresa a través de la dificultad que ofrece la madera a ser trabajada o penetrada por otros cuerpos.

Conductividad térmica y eléctrica: La conductividad térmica mide la capacidad de calor que la madera es capaz de conducir y determina su velocidad de transmisión, constituyendo un factor de gran valor en aplicaciones que implican propagación de calor. En el material, esta propiedad es de 2 a 2,8 veces mayor en la dirección longitudinal que en la dirección radial o tangencial, siendo directamente proporcional al contenido de humedad y a la densidad.

Por su parte, la conductividad eléctrica es la propiedad de conducir la electricidad. La madera presenta valores de conductividad térmica y eléctrica que son bastante pequeños comparados con los del resto de los materiales. Por ende, debido a su porosidad, constituye un material aislante por excelencia y con su empleo se reduce la cantidad de energía necesaria para climatizar los espacios, fundamentalmente cuando se utiliza en ventanas, puertas o suelos.

3. PRINCIPALES TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS DE MADERA EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA HABANA

Durante el período colonial cubano, los forjados de madera fueron una de las soluciones más usadas para la construcción de los entresijos y cubiertas de las edificaciones, tanto religiosas, militares, como civiles en sus variadas modalidades y domésticas. El Centro Histórico de La Habana posee un valioso y extenso patrimonio de diversas tipologías constructivas de madera de Iberoamérica.

Los principales elementos de madera de las edificaciones históricas habaneras son dinteles y vigas, columnas y/o pies derechos, techos inclinados, techos y entresijos horizontales, escaleras, pisos y elementos de carpintería. Resaltan también las uniones con sus disímiles acoplamientos, empalmes y ensambles entre las piezas de madera.

3.1. DINTELES, VIGAS, COLUMNAS, ESCALERAS Y PISOS

Los dinteles (Figura 1), en su mayoría se conforman por una sola pieza. Pueden unirse por el lateral varias piezas de secciones menores. Por su parte, las vigas (Figura 2) tienen gran longitud por lo se pueden encontrar algunas constituidas por varias piezas empalmadas con secciones variadas.

Las columnas y/o pies derechos (Figura 3) pueden tener sección cuadrada, rectangular o circular, formada por una única pieza o por varias unidas a través de pernos. En el tope de estas, en la unión con las vigas que descansan en ellas, a veces se sitúan sopandas y tornapuntas para rigidizar la junta.

Las escaleras de madera son de tramos (Figura 4) o helicoidales (Figura 5). Las de tramos están constituidas por dos vigas inclinadas nombradas zancas, si los peldaños solo se apoyan, se denominan cremalleras y limones si se empotran. En las escaleras helicoidales existe una columna vertical denominada núcleo o nabo en la que se empotran los peldaños.

En los pisos de madera (Figura 6), sobre durmientes separados se ubican tablas machihembradas fijándolas a la tablazón, en ocasiones las tablas se cubren con otras de madera fina y se crean dibujos.



Fig. 1: Dintel de madera. Obra: Aula del museo Simón Bolívar



Fig. 2: Dintel de madera. Obra: Mi Casita Colonial



Fig. 3: Columnas de madera o pies derechos. Obra: Tienda La Muñeca Azul

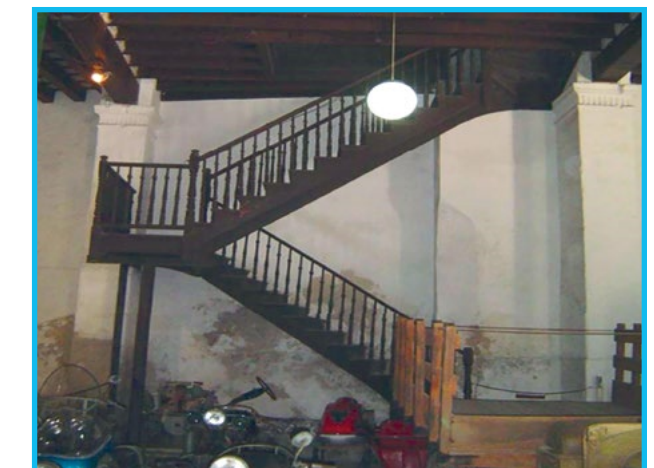


Fig. 4: Escalera de madera de tramos. Tomado de Liñán, C. R. et al. (2011)



Fig. 5: Escalera de madera helicoidal.
Restaurante La Mina

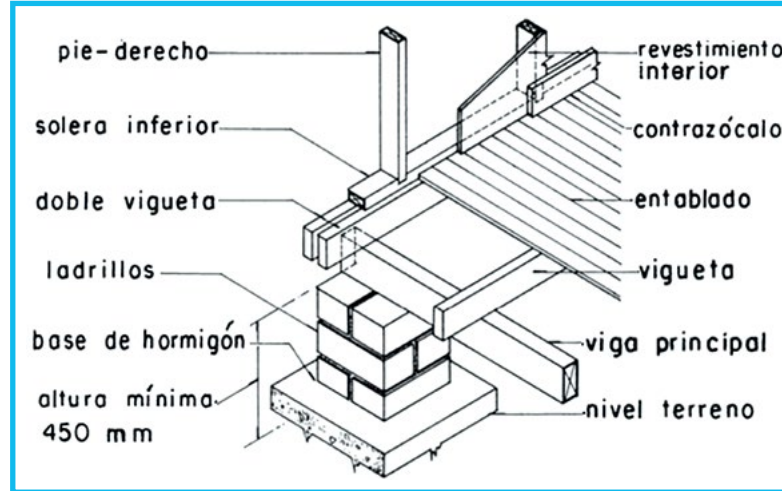


Fig. 6: Ejemplo de un piso de madera

3.2. TECHOS DE MADERA INCLINADOS

Se encuentran diversas tipologías, siendo de las más empleadas en la arquitectura colonial cubana.

3.2.1. Techos a un agua

Presentan una sola vertiente con hilera, alero, dos hastiales y un muro elevado en la parte posterior. Están constituidos por vigas de madera que descansan en muros o indistintamente en elementos de madera, conocidos como solera, durmiente y viga de corredera, según sea el caso. Se coloca la tablazón sobre las vigas y encima de esta la cubierta de papel de techo, planchas onduladas de hierro galvanizado o fibrocemento, tejas francesas o criollas.

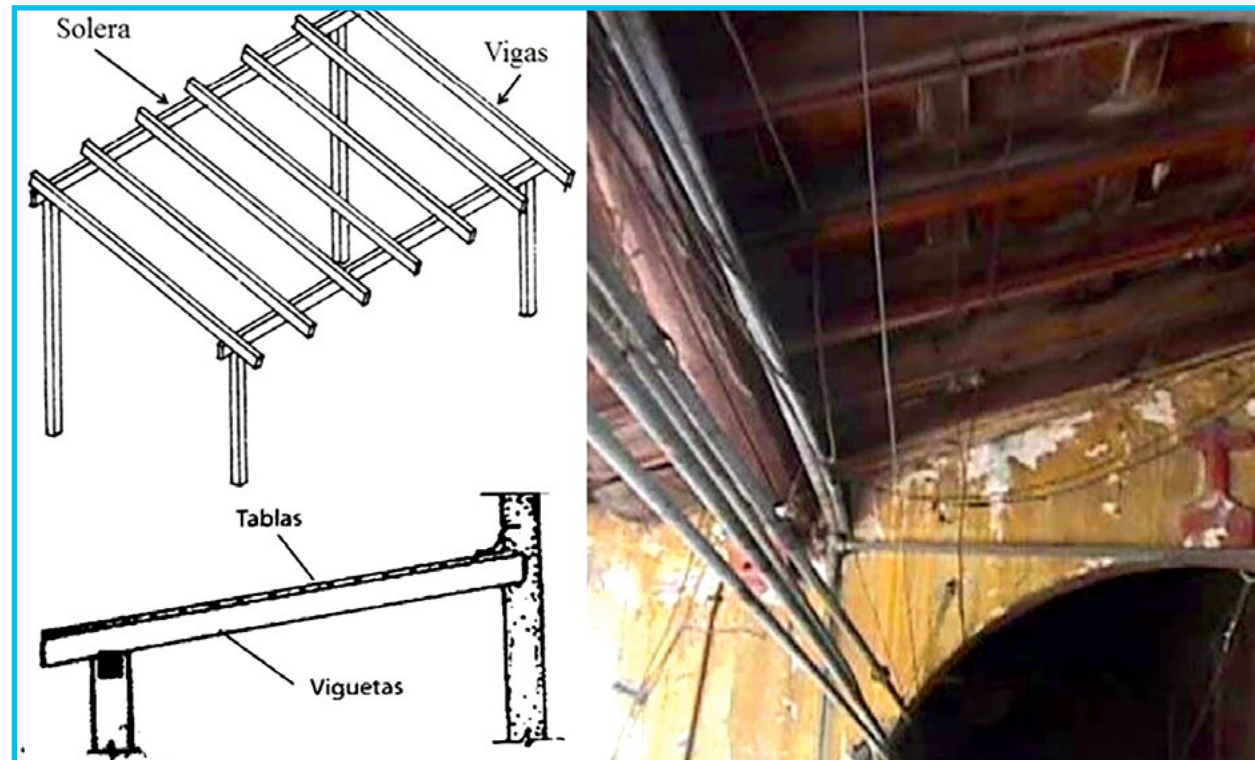
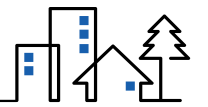


Fig. 7: Ejemplo de techo a un agua



3.2.2. Techos a dos aguas

Constituidos por armaduras trianguladas o cerchas. La solución más simple se forma por dos vigas inclinadas llamadas pares y una viga tirante. Para luces mayores se necesita combinar varios triángulos y se crean las cerchas. Sobre la solera descansan los pares y usualmente no se utilizan tirantes simples sino pareados. Los tapajuntas se colocan sobre los pares y encima de estos las tablas. Sobre las cerchas se ubican correas para arriostarlas entre sí, y tornapuntas que sirven de soporte para la tablazón y la cubierta. Estos techos presentan dos vertientes con igual pendiente (Figura 8).

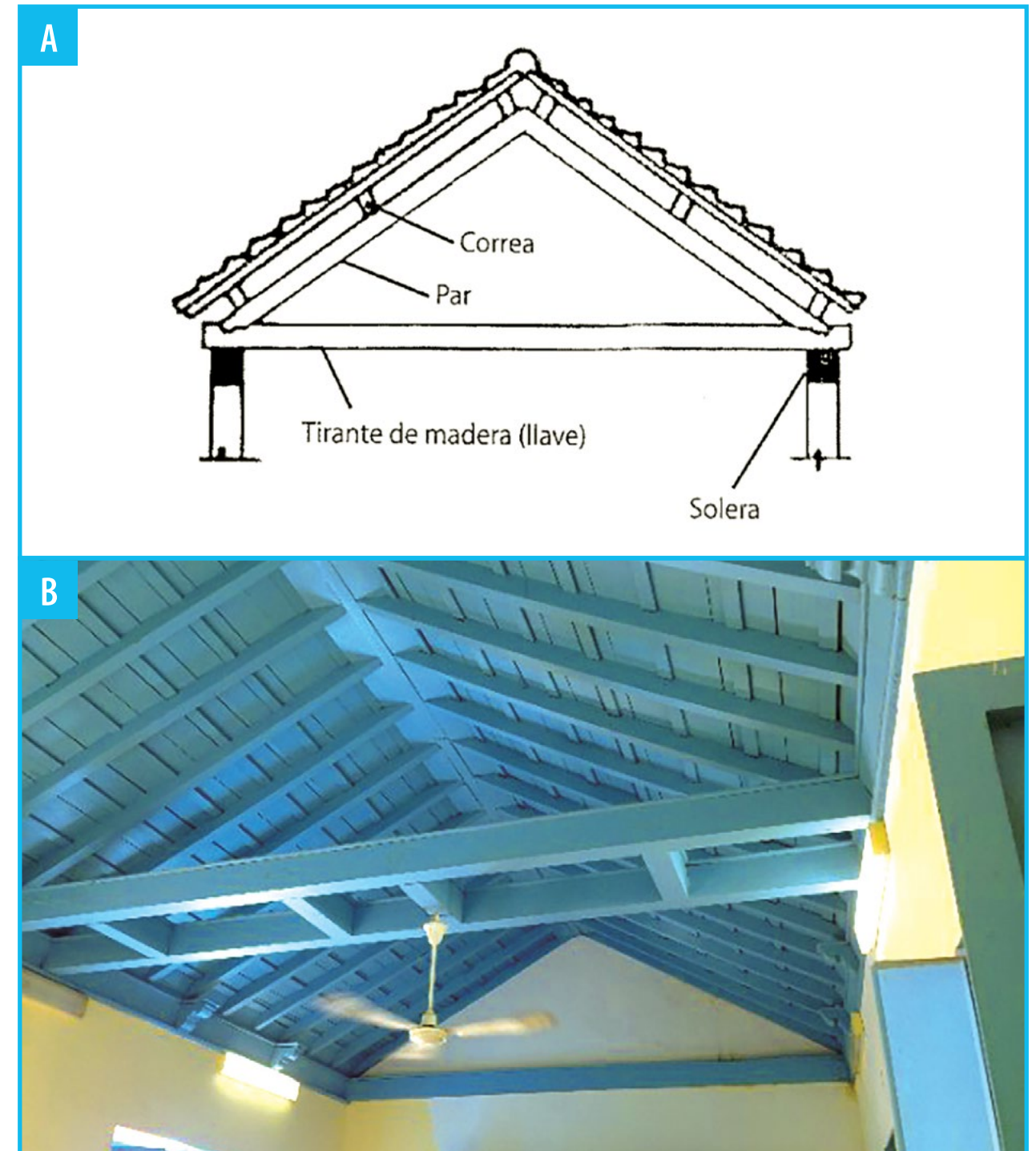


Fig. 8: Techo a dos aguas. A) Elementos componentes del entramado. B) Ejemplo de techo, Círculo Infantil Mi Casita Colonial

3.2.3. Techos de par e hilera, y par y nudillo

El sistema par e hilera se compone por los dos pares en sucesión de vigas inclinadas que se enlazan en su parte superior en la viga horizontal llamada hilera, con el propósito de evitar su desplazamiento lateral. Los pares o alfaridas establecen la pendiente de la cubierta en el exterior. Cuando las luces se incrementan es necesario colocar entre los pares, elementos intermedios llamados nudillos que ayuden a acortar la longitud libre de los pares, y así queda constituido el sistema par y nudillo (Figura 9).

Las armaduras creadas en estos techos descansan en los muros a través del estribo que está formado por un conjunto de elementos de madera en donde se encajan los pares y que evita el hundimiento de los mismos en los muros. El estribo es un marco horizontal, se traba transversalmente por los tirantes y en las esquinas por los cuadrales. Ellos neutralizan los empujes tangenciales que aplican los pares sobre la solera, de esta forma la totalidad del entramado de la cubierta transmite su peso verticalmente sobre los elementos que se apoyan en los muros funcionando de arquitrabe.

El estribo descansa sobre las solerillas, las que reparten la carga uniformemente a lo largo de los muros y a su vez aíslan la estructura de madera de la humedad que asciende por los muros. En grandes luces se emplean los tirantes para equilibrar los empujes inversamente proporcionales a su pendiente. Los tirantes usualmente se emplean pareados, uniéndose en el centro y en los extremos por ligaduras que son piezas cortas transversales.

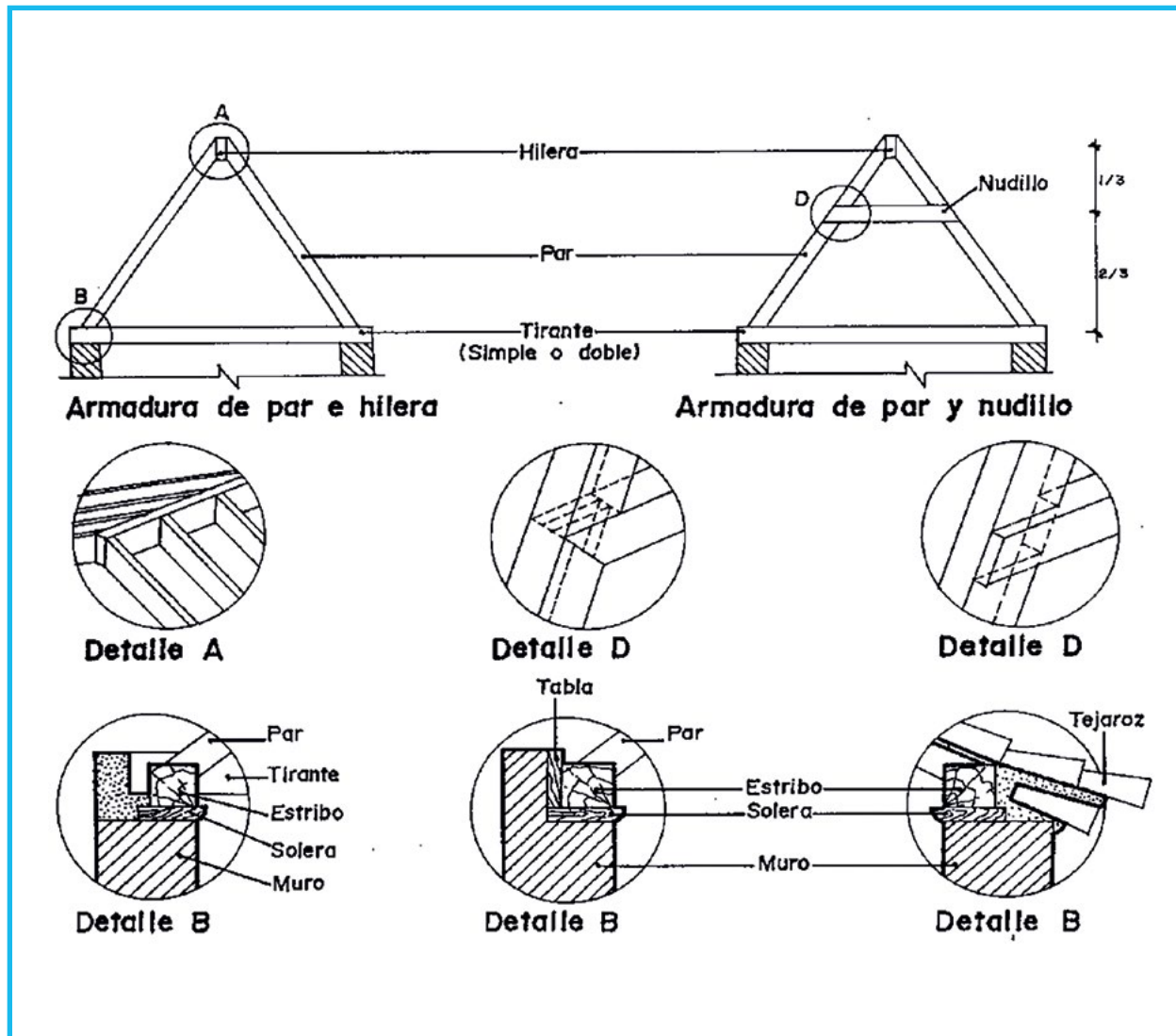
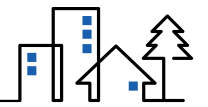


Fig. 9: Sistemas de techos inclinados de par e hilera - par y nudillo



3.2.4. Techos de cubierta con faldones

Se trata de techos construidos a cuatro aguas, los cuales constan de un alero continuo en todo el borde de la planta y con dos planos llamados faldones, que cortan las dos vertientes según las limatesas, las que concurren en el nudo del caballete. En esta solución se prescinden los hastiales (Figura 10).

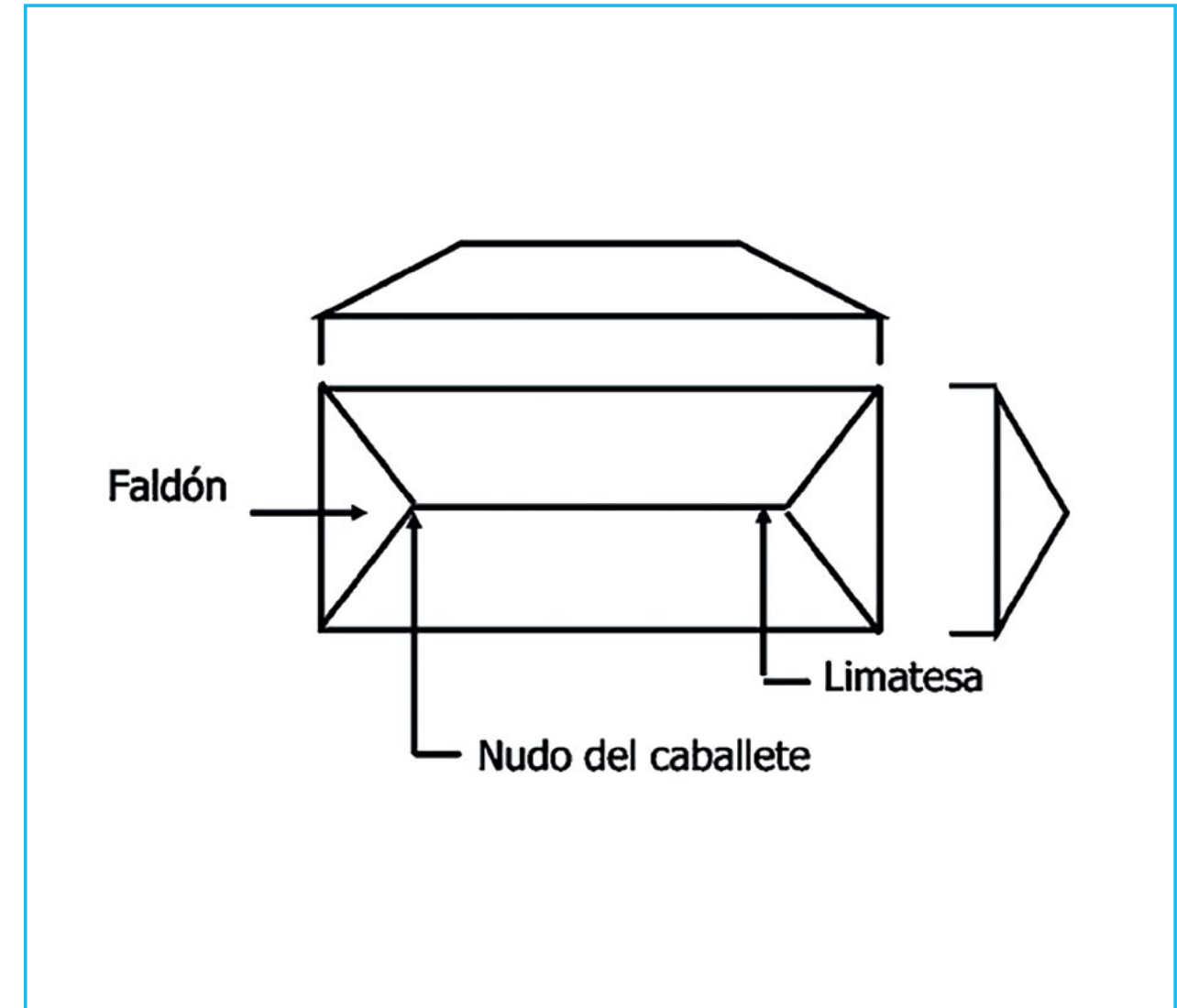


Fig. 10: Ejemplo de techo de cubierta con faldones

3.3. FORJADOS DE MADERA HORIZONTALES

3.3.1. Sistema de viga y tablazón de madera

Se conforma por vigas de madera que sostienen la tablazón del mismo material (Figura 11). Existen casos donde en las juntas entre tablas se colocan listones para cubrirlas, nombrados tapajuntas que evitan el paso del material de relleno, de un espesor considerable, que se vierte sobre la tablazón. Luego se coloca el piso o la impermeabilización, en caso de cubiertas, que generalmente se ha solucionado con soladura de losas de cerámica.

Tanto en este sistema como en el de viga y losa por tabla, que se describirá a continuación, se han encontrado dos tipos de vigas según la sección, vigas americanas que son más peraltadas con relaciones peralte/ancho dentro del rango 34, y vigas españolas que presentan secciones transversales cuadradas o con variación pequeña entre el peralte y el ancho. Investigaciones han comprobado que las vigas americanas se emplearon en las construcciones realizadas en los siglos XIX y XX.

3.3.2. Sistema de viga y losa por tabla

Esta solución es muy parecida a la del sistema anterior, teniendo la ventaja de que la tabla se sustituye por losas de piedra o de barro que se apoyan sobre las vigas y se mantiene el uso de los tapajuntas (Figura 12). Por su material constituyente, estas losas se afectan menos por la humedad y como no son muy grandes, el espaciamiento entre las vigas es un poco menor al del sistema viga y tabla.



Fig. 11: Ejemplo de techo de viga y tabla. Muralla No. 60



Fig. 12: Ejemplo de techo de viga y losa por tabla. Virtudes No. 609

4. METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO EN ESTRUCTURAS DE MADERA DE EDIFICACIONES HISTÓRICAS

Antes de la ejecución de una intervención constructiva o un proyecto de rehabilitación en una edificación se necesita previamente desarrollar el diagnóstico, cuyo alcance se define en dependencia del caso que sea objetivo de la investigación, y que abarca estudios que se realizan *in situ* en la obra, en laboratorios y en los gabinetes de trabajo. Los resultados aportan datos y particularidades sobre el edificio y su entorno, características y propiedades de los materiales de los elementos constructivos, deterioros o lesiones fundamentales, clasificación y descripción de los procesos patológicos asociados. Conjuntamente se definen los mecanismos de actuación y recomendaciones sobre los tratamientos a ejecutar para la rehabilitación de la edificación.

Siempre es interés del estudio diagnóstico, obtener resultados que permitan determinar las acciones apropiadas para lograr una reparación con calidad, donde se recuperen todos los elementos que sean posibles y se reutilicen aprovechando al máximo su capacidad resistente y prolongando así su vida útil. Para ello, siempre deben reflejarse en dicho estudio temas imprescindibles como las características estructurales de los elementos de la edificación, los daños asociados, sus causas y evolución, y los ensayos necesarios para establecer las propiedades de esos elementos. Son necesarios, además, los requerimientos técnicos para seleccionar los métodos a aplicar en sus sistemas de reforzamiento estructural y reparación en general.

Cuando ya está definido el objeto de estudio, ya sea una edificación en su totalidad, un simple local u otro tipo de obra (urbanística), como primera fase se realiza una inspección preliminar y una búsqueda basada en la recopilación de antecedentes. En una segunda fase, se realiza el levantamiento de deterioros o lesiones, se efectúan ensayos rápidos o generales y luego ensayos con procedimientos más complejos. Por último, en una tercera etapa se confeccionan las fichas técnicas (si son necesarias), los planos y el informe donde se refleja toda la información y sus resultados, en donde quedan formuladas las teorías y se ofrecen recomendaciones de las soluciones o tratamientos. En el caso de los elementos constructivos de edificaciones históricas a diagnosticar debe tenerse en cuenta que estas son maderas ya envejecidas, con años de explotación.

4.1. PRIMERA FASE: INSPECCIÓN PRELIMINAR Y RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

En esta etapa, el equipo encargado de desarrollar el estudio diagnóstico entra en contacto directo con la obra que es objeto de la investigación. Según las complejidades de la misma y el volumen total de información a recopilar, se planifican las tareas de las siguientes fases del trabajo. Seguidamente se trazan sus estrategias, se programan las visitas al inmueble y se registran los datos, de forma que puedan emplearse posteriormente. Se pueden tomar como punto de partida, croquis de planta que se elaboran en esta etapa como guía para los trabajos, tanto de levantamiento como de diagnóstico. En la actualidad con el uso de las nuevas tecnologías, puede emplearse el escáner láser con el propósito de realizar un levantamiento planimétrico, altimétrico y volumétrico de la obra, para de esta forma obtener una imagen real y a escala de la estructura a diagnosticar.

Por otra parte, en la consolidación estructural y en la restauración de los elementos de madera es imprescindible evaluar el deterioro que presentan y determinar las causas que lo provocaron, sin olvidar que estos pertenecen a un edificio. Este indudablemente, habrá contado con una evolución desde los orígenes de su construcción, tal como modificaciones, ampliaciones, reforzamientos estructurales, etc., durante su vida útil. Por lo que es necesario para diagnosticar los elementos constructivos de madera, desplegar una búsqueda y recopilación de los antecedentes de la edificación y su entorno ambiental, con la cual se obtienen datos generales sobre:

- Período de construcción
- Sistemas y detalles constructivos originales
- Evolución en cuanto a transformaciones realizadas: modificaciones, ampliaciones, reparaciones, cambios generales que sufrió la estructura
- Usos y régimen de explotación, así como los valores patrimoniales
- Criterios erróneos para reutilizar de la edificación que se hayan aplicado
- Movimientos estructurales que haya sufrido la edificación
- Características del entorno
- Identificación del Sector de Protección Ambiental en el que se ubica la obra según el Plan especial de desarrollo integral para el Centro Histórico de La Habana hecho por el grupo del Plan Maestro de la Oficina del Historiador.

Con el fin de obtener rasgos específicos de los elementos de madera a evaluar se investiga sobre:

- Características estructurales de los elementos de madera (*forjados, columnas y/o pies derechos, etc.*)
- Procesos de alteración a que estuvo expuesta la madera (*si fuese el caso*)
- Tratamientos previos aplicados a la madera protectores contra el ataque de hongos e insectos (*si fuese el caso*)
- Características generales de los soportes estructurales de los forjados de madera (*arcos, muros, columnas*) como su espesor, material componente, tipo de revestimiento, etc.

4.2. SEGUNDA FASE: LEVANTAMIENTO DE LESIONES Y REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Durante esta etapa se emplean técnicas para el diagnóstico que son directas en los elementos constructivos con resultados que permiten formular las hipótesis sobre los procesos patológicos observados, para posteriormente ofrecer un pronóstico. Este proceso puede iniciar a partir del análisis de los agentes degradantes que perjudican a los elementos de madera a través de una inspección organoléptica. Se procede con la realización de ensayos como medio de apoyo para el estudio de los procesos patológicos, siendo el objetivo de los mismos determinar la extensión y severidad de los daños.

Los procedimientos tienen el objetivo de caracterizar y evaluar el comportamiento de los materiales y los puntos más críticos, mediante la identificación de zonas vulnerables. Dentro de los más comunes se incluyen:

- Observación y defectación *in situ* del estado de conservación de los elementos que conforman el inmueble objeto de estudio: Se efectúa en obra una inspección organoléptica tomando los datos necesarios, en la que se detectan y documentan todas las lesiones presentes en los elementos de madera evaluados y se toman fotografías para apoyar gráficamente la información. En los elementos pétreos que sean necesarios, en el sistema de impermeabilización de la cubierta y en las instalaciones hidráulicas-sanitarias también se inspecciona registrándose los deterioros o las formas de alteración con el objetivo de encontrar las posibles causas de los daños en la madera (por humedad generalmente). Todos estos diferentes componentes se encuentran vinculados de una forma u otra y nunca se debe analizar la estructura de madera como un elemento aislado sino como parte del conjunto que conforma la edificación.
- Medición de las secciones geométricas que presentan los elementos estudiados: Generalmente se emplea la cinta métrica con la cual se logran obtener las escuadrías que se requieran según sea el propósito, como es el caso de las características de los apoyos, las luces y las secciones de los elementos constructivos. En el caso de los forjados de madera, usualmente se determinan las secciones transversales de las vigas que los conforman y el espaciamiento entre ellas. Las mediciones de la geometría se realizan por las caras lateral e inferior de las vigas. Los espaciamientos se miden tomando como referencia las caras interiores entre dos vigas consecutivas (Figura 13). Para realizar las mediciones en canes se utiliza el mismo procedimiento. Por otra parte, en la obtención de las escuadrías de otros elementos de madera como columnas y/o pies derechos, balaustres, entre otros, se recurre a procedimientos similares, cuyos esquemas de mediciones solo cambian porque son elementos verticales.

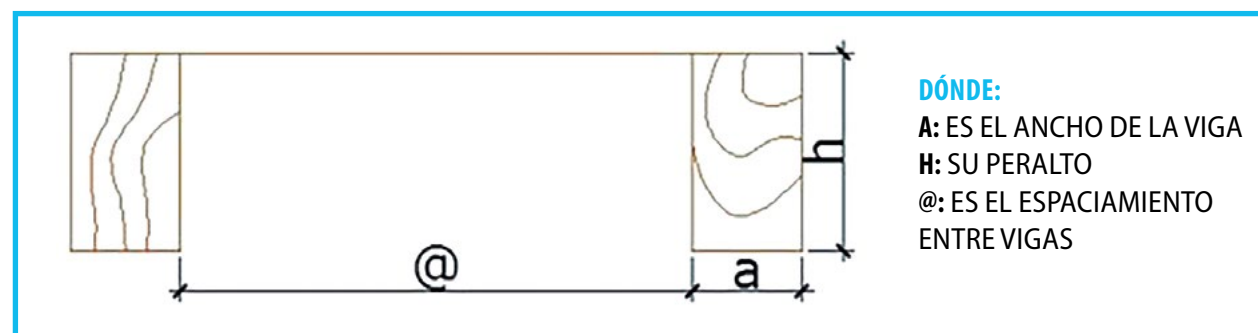


Fig. 13: Los espaciamientos se miden tomando como referencia las caras interiores entre dos vigas consecutivas

- Sondeo de los elementos de madera con el empleo del punzón graduado: Este ensayo se realiza con el objetivo de identificar los deterioros que presenten los elementos de madera evaluados y acotar con precisión la posición, extensión y profundidad de los mismos. De esta manera se logra obtener la información de la afectación, y, en consecuencia, se puede emitir la solución a ejecutar. En los elementos en buen estado y según la dureza específica de la madera, el punzón no penetra o lo hace superficialmente. Sin embargo, en los elementos desfibrados o podridos se obtienen valores superiores de penetración del punzón (Figura 14).



Fig. 14: Realización del sondeo de los elementos de madera con el punzón graduado

- Medición de parámetros ambientales (humedad relativa y temperatura): Los ensayos medioambientales se realizan *in situ* en obra con el objetivo de evaluar las condiciones climáticas que presentan las distintas áreas de estudio. Para esto se emplean termo-higrómetros (Figura 15), que ofrecen valores reales de humedad relativa (HR) y temperatura ambiental (T), medidos siempre en el momento del día en que se ejecutan los trabajos en la edificación. Los resultados de estas mediciones son empleados para el análisis de patrones y causas de deterioros. Condiciones climáticas de HR > 65 y temperatura entre 30-35 °C, son favorables para la proliferación de agentes biológicos degradadores de la madera. Las mediciones de los parámetros medioambientales en combinación con la medición de la humedad superficial del material maderable, permiten una correcta interpretación de los valores obtenidos, debido al equilibrio termodinámico con el medio al que está expuesta la madera.
- Medición de la humedad superficial: El ensayo de humedad superficial (HS) permite determinar el contenido de agua presente en los poros superficiales de los elementos constructivos que se evalúan. La aplicación de este ensayo en la madera brinda la posibilidad de determinar en cuánto esta ha sido afectada por el exceso de humedad, la que provoca su deterioro o degradación. Para la medición de HS en los elementos de madera se emplea el higrómetro de superficie (Figura 16). Este equipo expresa, como resultado cuantitativo, la lectura del contenido de humedad.



Fig. 15: Medición de los parámetros ambientales con el termo-higrómetro



Fig. 16: Medición de la humedad superficial de la madera con el higrómetro

- Identificación de fuentes de humedad mediante el uso de la termografía: Esta técnica se basa en los principios físicos de transmisión de calor, lo cual permite obtener a partir de la energía emitida por un objeto, la temperatura superficial del mismo en el rango de infrarrojos (Figura 17). Esta radiación es captada por la lente de Germanio del equipo y transformada en señales eléctricas para obtener las imágenes termográficas. Estos mapas térmicos se señalizan mediante colores que representan la temperatura de la superficie en ese punto, estableciéndose según un rango de valores las diferencias de temperaturas del objeto. Esta radiación, definida físicamente mediante la ley de Stefan Boltzmann, es proporcional a la temperatura del cuerpo y a las propiedades térmicas propias del material como la emisividad, que a su vez es función de la longitud de onda, de la temperatura y del ángulo de incidencia. Así, objetos que tengan la misma temperatura superficial pueden aparecer con distintas temperaturas si tienen distintas emisividades. En las ejecuciones de diagnóstico es usual enfocar la cámara hacia las zonas de empotramiento de los elementos de madera en los muros (Figura 18), como es el caso de las vigas de los forjados y de los pies derechos. Esto posibilita identificar zonas con acumulación de humedad ya sea debido a filtraciones o estancamiento de agua, y que puede conllevar al deterioro de los elementos estructurales de madera.



Fig. 17: Medición termográfica en galería de circulación del Convento de Santa Clara de Asís

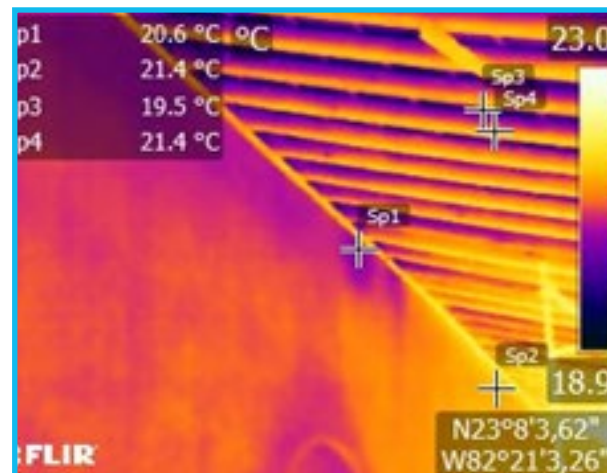


Fig. 18: Imagen termográfica en zona de apoyo de vigas donde se observa acumulación de humedad en el muro y la tablazón. Convento de Santa Clara de Asís

- Ensayos biológicos/microbiológicos: este tipo de estudios tiene como propósito el de identificar especies biológicas que, debido a la existencia de condiciones idóneas en la madera, proliferan y se alimentan de compuestos como la lignina, lo que conduce a la pérdida de propiedades y por tanto de su capacidad como elemento estructural.
- Determinación de la dureza de la madera mediante el ensayo de penetración: Se trata de una técnica no destructiva que tiene como objetivo la estimación de la densidad de la madera a partir de la penetración por impacto, de una varilla de acero (Figura 19).



Fig. 19: Ensayo de penetración en la madera con el Pilodyn 6J. Restaurante La Mina

La profundidad de penetración de la varilla es inversamente proporcional a la densidad o estado de conservación de la madera. Depende de la especie y de la humedad superficial que presente, puesto que su mayor o menor contenido afecta a las propiedades físicas del material. La técnica puede ser aplicada en dirección vertical y horizontal. La desventaja del método es que solamente se pueden obtener mediciones de las características superficiales del material, hasta 40 mm de profundidad y en un área determinada.

- Detección de desperfectos internos en los elementos de madera mediante el ensayo de resistografía: La resistografía es una técnica moderna que se aplica para detectar de forma puntual desperfectos en el interior de la madera y evaluar así su estado de conservación. Es utilizada tanto para árboles en pie como en madera seca. El equipo que se emplea es el resistógrafo (Figura 20), diseñado para perforar de forma no destructiva, el elemento de madera mediante una broca de acero de 3 mm de diámetro. En la medida en la que penetra en la madera, se registran las variaciones en la resistencia ofrecida por el material maderable. Los datos se descargan al software asociado al equipo, donde quedan grabados los incrementos o decrecimientos de la curva resistográfica (Figura 21) en función de la densidad y el estado de conservación de la madera analizada. Esto permite identificar con facilidad las zonas con cavidades, ablandamientos, deformaciones, entre otras lesiones propias de este material.

En la práctica usual, este ensayo se realiza en dirección diagonal en los cabezales de las vigas de madera o áreas de fogonadura, por ser zonas sin acceso dentro de los muros, siendo las más vulnerables debido a la acumulación de humedad. También se ejecuta en dirección vertical cuando lo que se quiere es analizar el estado de conservación de la zona próxima a la cara superior de las vigas, oculta por el forjado. El método resistográfico evalúa el estado puntual de una zona pequeña y no reporta información global del estado del elemento. Es por ello que nunca se aplica para validar un elemento, pero en cambio, sí para rechazarlo una vez identificado el daño interior.



Fig. 20: Resistografía en vigas de madera. Restaurante La Mina

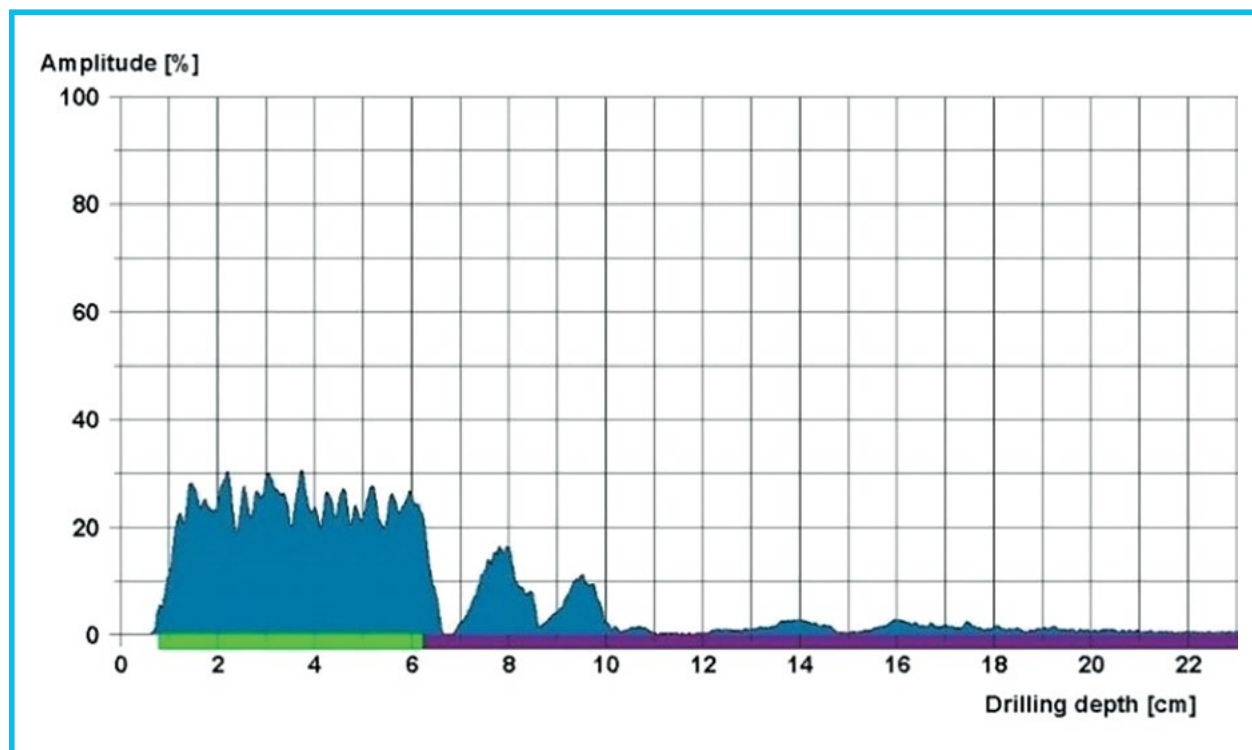
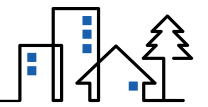


Fig. 21: Esquema de la curva resistográfica obtenida en una viga afectada

4.3. TERCERA FASE: ELABORACIÓN DEL INFORME: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, DIAGNÓSTICO, PRONÓSTICO, PROPUESTA DE SOLUCIONES. REGISTRO DEL CASO.

En esta última etapa se produce la documentación definitiva para entregar al cliente, de forma digital y escrita. Los especialistas encargados elaboran el informe final del estudio diagnóstico, así como los planos y fichas técnicas que hayan sido requeridas, las que se anexan a la documentación. Se vinculan además las imágenes tomadas durante todo el proceso y otros anexos referidos a algunos de los ensayos realizados.



4.3.1. Análisis de los resultados

Dentro del contenido del informe final del estudio de diagnóstico quedan correlacionados los procesos patológicos identificados y las características de los materiales analizados. Partiendo de los resultados logrados en la compilación de antecedentes, en el levantamiento de los daños presentes con su caracterización y en cada uno de los ensayos aplicados en obra y en laboratorio, se alcanza una interpretación integral de los datos. De esta manera se caracteriza el inmueble objeto de estudio y su entorno. Conjuntamente se presentan los análisis y conclusiones parciales de cada una de las técnicas empleadas en la investigación, siempre con el propósito fundamental de establecer las causas de los procesos patológicos y los mecanismos de alteración.

4.3.2. Diagnóstico y pronóstico

Durante el transcurso de la caracterización de los diferentes procesos patológicos, se determinan sus posibles causas, se distinguen las directas y las indirectas describiendo cada una y argumentando la relación que existe entre ellas. Para ello se van formulando hipótesis que se corroboran y comprueban posteriormente. De esta forma se emiten los criterios de diagnóstico con los que se identifican los deterioros y se evalúa la situación actual de los mismos. Se avizora su posible evolución, vigencia, periodicidad, derivación o transformación en otros daños, etc. Se efectúa una interpretación integral de los procesos patológicos.

4.3.3. Propuesta de soluciones

Sobre la base del diagnóstico realizado, sus observaciones, pronósticos y valoraciones técnicas del estado de conservación, se recomiendan los tratamientos más apropiados que deben ejecutarse para prevenir el progreso de los deterioros y para la correcta reparación de la obra estudiada. La propuesta de soluciones contiene las acciones e intervenciones constructivas destinadas a regresarle a los elementos de madera su función dentro de la edificación, sea esta estructural, ornamental u otra. Se asocian tanto a la causa de los procesos patológicos como a sus efectos, priorizándose en la totalidad de los casos la erradicación de las causas. Dentro de los procedimientos orientados a los especialistas de diseño estructural, se encuentran diversas técnicas, desde acciones simples y específicas para cada elemento constructivo o un conjunto de ellos, así como métodos de reforzamiento estructural más complejos. Se recomiendan simultáneamente, los materiales idóneos que deben ser usados en las reparaciones para que quede garantizada la compatibilidad entre estos y los que se encuentren puestos en obra. Se proponen soluciones que permiten recuperar el máximo de elementos posibles, sin que ello implique mantener alguno que no trabaje correctamente o con capacidad insuficiente que comprometa la función de la estructura de la que forma parte. Cuando no resulta conveniente orientar la reparación, en dependencia del caso, se aconsejan métodos referidos a la sustitución y la demolición, parciales o totales, de los elementos, forjados y aquellas estructuras que lo requieren.

4.3.4. Documentos vinculados que forman parte del informe final

Al informe final del estudio de diagnóstico realizado se anexan carpetas que contienen:

- Planos donde se reflejan observaciones de las etapas de la investigación. Los mismos muestran croquis con el levantamiento de lesiones en los elementos de madera y sus imágenes más representativas, los principales resultados de los ensayos aplicados y la propuesta de soluciones a los daños.
- Totalidad de las imágenes tomadas durante el estudio de diagnóstico, las cuales son constancia del estado de los elementos estudiados y pueden aprovecharse para efectuar comparaciones si se desea observar la evolución de las lesiones.
- Datos específicos de algunos ensayos que ofrecen un extenso número de resultados y se prefiere anexar todos estos de forma independiente. Tal es el caso de las imágenes editadas de la Termografía y las plantillas de observaciones de la Resistografía.
- Fichas técnicas de lesiones, cuando son requeridas, como contenido de soporte adicional.

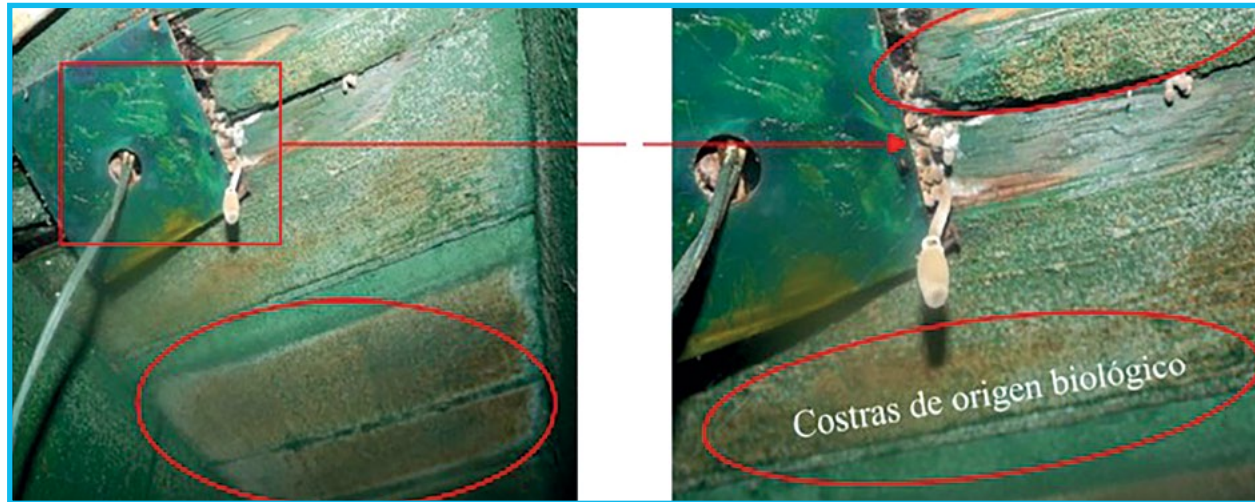
4.3.5. Registro del caso

Una vez elaborada la documentación total y definitiva del estudio diagnóstico, proceso dentro del cual además se digitaliza la misma, se procede a registrarla y archivarla en biblioteca. Esta documentación forma parte de la memoria de la obra para consultas futuras y referencias para estudios posteriores.

5. PRINCIPALES LESIONES QUE AFECTAN A LAS EDIFICACIONES DE MADERA DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA HABANA

5.1. DAÑOS DE ORIGEN BIÓTICO

Se relacionan con los organismos biológicos y factores asociados a ellos. Dentro de estos destacan los organismos xilófagos, los cuales se pueden clasificar en: hongos xilófagos, insectos de ciclo larvario, termitas, otros organismos y xilófagos marinos. Ocasionalmente se puede encontrar en obras, ejemplos de otros organismos biológicos como pátinas y costras degradantes de la madera (Figuras 22 y 23).



Figuras 22 y 23: Costras de origen biológico. Restaurante La Mina

5.1.1. Hongos xilófagos

Dentro de los hongos xilófagos se encuentran los hongos manchadores o cromógenos, y los hongos de la pudrición. Los hongos cromógenos se alimentan de las sustancias de reserva de la madera y producen degradaciones en la pared celular, por lo que no afectan las propiedades mecánicas. Su efecto es el cambio de coloración de la madera (Figura 24). Aunque no resultan peligrosos, por su mínima acción degradadora, son indicativos de un mayor riesgo porque crean las condiciones necesarias para los hongos de la pudrición. Los hongos de la pudrición son los que producen daños graves en la madera.

Se alimentan de los componentes de la pared celular y provocan la destrucción completa de esta. Su efecto es la pérdida de densidad y resistencia, acompañados de un cambio de coloración. Al secarse la pieza, el material residual tiende a agrietarse. La actividad de estos hongos favorece el ataque posterior de insectos xilófagos. De esta manera se desencadena una sucesión ecológica altamente perjudicial para la integridad de las estructuras de madera (Figuras 25, 26, 27, 28 y 29).



Fig. 24: Cambio de coloración en el forjado. Despacho Público, Palacio de los Capitanes Generales



Fig. 25: Hongos de pudrición parda. Palacio de los Condes de Jaruco



Fig. 26: Hongos de pudrición parda. Palacio de los Condes de Jaruco



Fig. 27: Hongos de pudrición blanca. Palacio de los Condes de Jaruco



Fig. 28: Hongos de pudrición blanca. Palacio de los Condes de Jaruco



Fig. 29: Hongos de pudrición blanca. Convento de Santa Clara de Asís

5.1.2. Insectos xilófagos

Los insectos xilófagos son de los agentes más desfavorables en las obras a inspeccionar. La falta de mantenimiento y la elevada humedad ambiental en la Isla durante casi todo el año provocan esta recurrente afectación. En los elementos de madera puesta en obra se destacan dos grupos fundamentales: los insectos de ciclo larvario (Figuras 30 y 31), los cuales se alimentan de la madera, creando galerías durante su etapa de larva, y las termitas, clasificadas en:

- Termitas subterráneas: Anidan en el subsuelo y la mayoría de las veces fuera del edificio atacado. Entran subterráneamente en los edificios donde pueden formar nidos secundarios. En la madera abren galerías paralelas a la dirección de las fibras, dejando una capa intacta que las oculta del exterior, de espesor de 1 a 2 mm (Figuras 32, 33, 34 y 35).
- Termitas de madera seca: Estas hacen sus nidos en la madera. Su desarrollo es muy lento. La señal típica de su ataque es la falta de aglomerados en las galerías que realizan (Figuras 36 A y B).

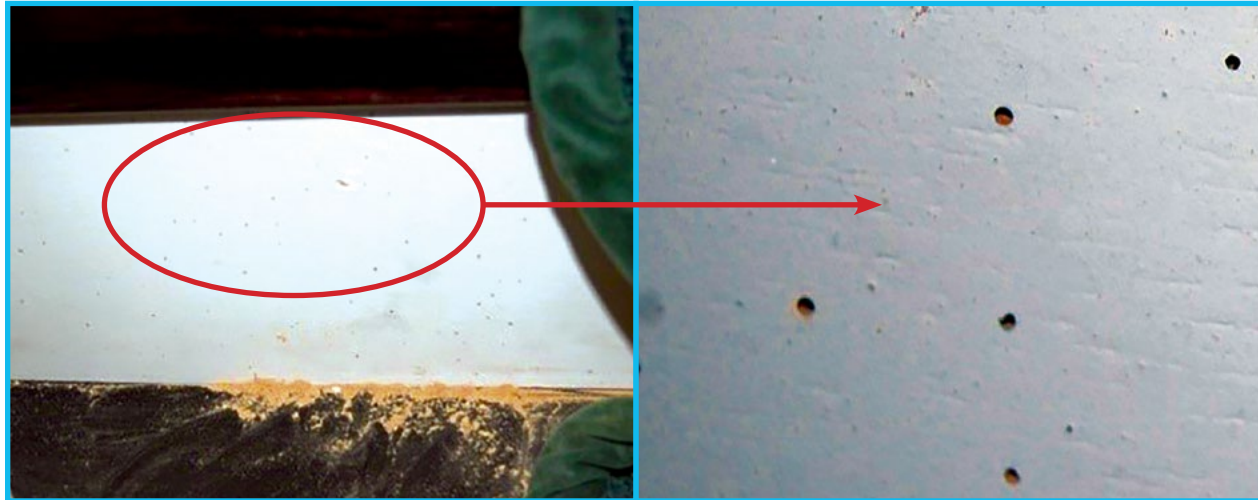


Fig. 30 y 31: Orificios en contrahuella provocado por insectos de ciclo larvario. Teatro Martí



Fig. 32, 33, 34, 35: Desfibramiento producto del ataque de termitas subterráneas. Convento de Santa Clara de Asís



Fig. 36 (A y B): Desfibramiento producto del ataque de termitas subterráneas, pie derecho. Convento de Santa Clara de Asís

5.1.3. Daños de origen estructural

Dentro de las distintas causas/procesos en los elementos de madera producto a lesiones estructurales, pueden ser identificadas las siguientes lesiones (Tabla 1).

TABLA 1: LESIONES EN ESTRUCTURAS DE MADERA

LESIÓN	SÍNTOMAS	LOCALIZACIÓN	CAUSA / EFECTO
Descensos en las cimentaciones (Figuras 37 y 38)	<ul style="list-style-type: none"> Grietas y fisuras en cerramientos colindantes Desniveles en estructura horizontal Desplomes de la estructura vertical Humedades por capilaridad en las partes bajas de la edificación manifestadas en los revestimientos 	<ul style="list-style-type: none"> Partes bajas de los muros Partes bajas de los pies derechos 	<ul style="list-style-type: none"> Asiento de la cimentación Erosiones de los elementos de la madera Pudrición del arranque del pie derecho
Desplomes	<ul style="list-style-type: none"> Pérdida de verticalidad Grietas de las obras de fábrica 	<ul style="list-style-type: none"> Superficies verticales Elementos lineales verticales 	<ul style="list-style-type: none"> Asientos previos Erosiones de los elementos de madera Pérdida de cohesión de atado entre piezas Fallo de anclajes o clavos de hierro fundido
Flechas y desniveles (Figuras 39 y 40)	<ul style="list-style-type: none"> Deformación de solados, con desnivel en los mismos Deformación de las piezas de madera, vertical o lateralmente 	<ul style="list-style-type: none"> Forjados Elementos lineales horizontales Pares y correas de cubierta 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionado insuficiente Aumento de la carga Fluencia de la estructura y cambios higrotérmicos
Alabeos y Pandeos	<ul style="list-style-type: none"> Falta de planicidad Grietas en tabiques y muros 	<ul style="list-style-type: none"> Elementos lineales verticales (pies derechos) Elementos superficiales verticales (muros) 	<ul style="list-style-type: none"> Falta de dimensionamiento Aumento de carga Erosión de la madera

LESIÓN	SÍNTOMAS	LOCALIZACIÓN	CAUSA / EFECTO
Grietas (Figuras 41 y 42)	<ul style="list-style-type: none"> Se manifiesta a través de grietas y fisuras 	<ul style="list-style-type: none"> Generalmente en uniones empotradas y zonas de vano donde los esfuerzos de flexión son mayores En madera maciza laminada, pueden producirse grietas por desgarro (acción de los pernos en uniones) En los elementos del forjado como pares, canes, estribos y correderas 	<ul style="list-style-type: none"> Deformación excesiva de la pieza hasta su rotura por carga excesiva Acciones mecánicas excesivas que llevan a los límites de capacidad mecánica de las piezas Entrada en carga de piezas tras la pérdida de la capacidad resistente gradual o no de las piezas colindantes
Sección insuficiente	<ul style="list-style-type: none"> Deformación excesiva de la pieza de madera Grietas Arcos de descarga, característicos en los tabiques y particiones colocados por encima 	<ul style="list-style-type: none"> Fundamentalmente en vigas (elementos horizontales, en forjados) En estructuras de cubierta En pilares y soportes exentos 	<ul style="list-style-type: none"> Deficiente dimensionamiento de las piezas por las cargas actuantes, o como consecuencia de un aumento de las mismas respecto de las condiciones iniciales de la estructura Deformación excesiva, incluso hasta su rotura por exceso de carga Se manifiestan como consecuencia de reordenamientos no planeados de la estructura Ataque de organismos xilófagos que reducen la sección de la pieza
Pudrición y pérdida del material (Figuras 43 y 44)	<ul style="list-style-type: none"> Giro de las piezas, descargas, colapso de las piezas Aparición de organismos xilófagos en el entorno de la unión 	<ul style="list-style-type: none"> Especialmente en zonas en contacto con el agua: arranque de la estructura en contacto con el suelo, encuentro de piezas de madera del forjado con los muros de cerramiento En zonas de apoyo en muros, tanto en la zona de cubierta de los forjados, como en fachadas y cerramientos internos 	<ul style="list-style-type: none"> Pudrición de soportes internos en los muros, uniones entre pies derechos y vigas de corredera Falta de ventilación de las piezas, unión con elementos metálicos que favorecen el puente térmico y por ende el aumento de la humedad en la unión

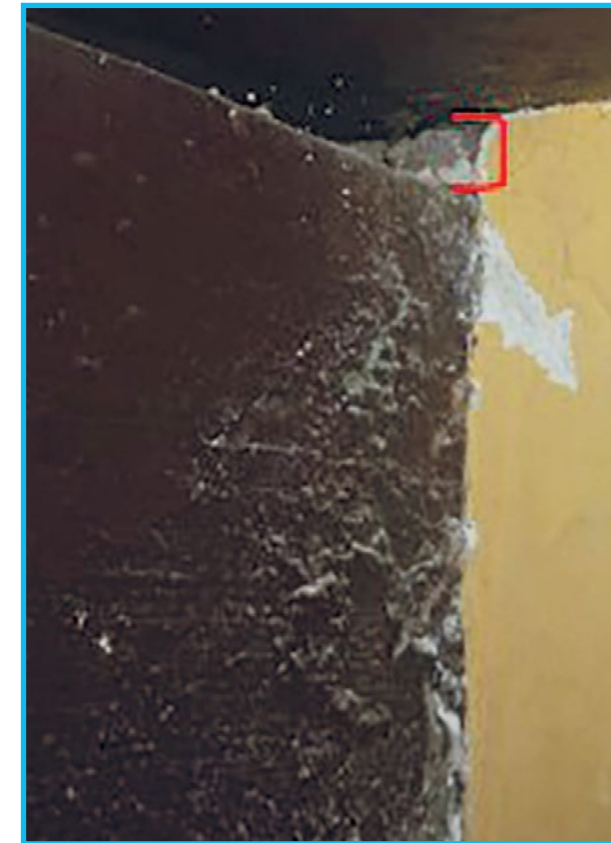
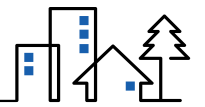


Fig. 37: Desplazamiento en viga con descenso de 3,5 cm. Restaurante La Mina



Fig. 38: Desplazamiento en viga con descenso de 6,0 cm. Restaurante La Mina



Fig. 39: Flechas en vigas. Restaurante La Mina



Fig. 40: Flechas en vigas. Restaurante La Mina



Fig. 41: Grieta transversal en correa. Empresa Tabacuba



Fig. 42: Grieta transversal en viga. Despacho Público, Palacio de los Capitanes Generales



Fig. 43: Pérdida de material en cabezal. Restaurant La Mina

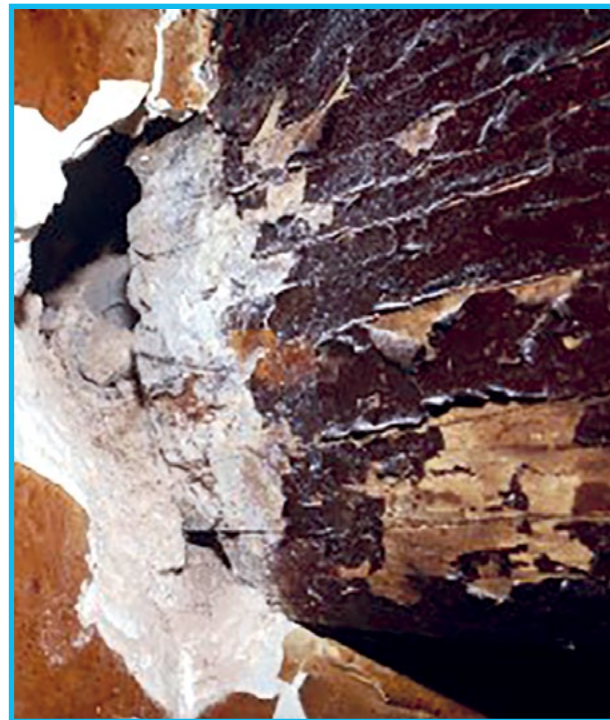


Fig. 44: Pérdida de material en cabezal. Restaurant La Mina

En ocasiones en las obras con forjado de madera, se localizan zonas húmedas con manchas de humedad cercanas a los cabezales de las vigas. En algunos casos el punzón no siempre penetra o lo hace escasos centímetros. Esto podría ser debido a que la parte podrida de la madera se encuentra en la zona empotrada y se haya punzado la parte dura que queda por fuera del muro.

6. ACCIONES CONSTRUCTIVAS ESPECÍFICAS POR TIPO DE LESIONES FUNDAMENTALES

6.1. DECAPADO DE ELEMENTOS DESFIBRADOS

Se recomienda retirar con una espátula, trinchita o cepillo de carpintero toda la parte dañada de los bordes y caras de los elementos para luego recalcar sus secciones residuales. Cuando se detecta pudrición, se decapa hasta eliminar toda la madera afectada. Si el decapado alcanzara profundidades donde se vea comprometida la función estructural de la pieza, se pasaría entonces al reforzamiento o sustitución de la misma.

6.2. PÉRDIDA DE SECCIÓN

Las vigas que presentan pérdida de sección que no comprometen la estabilidad estructural del elemento, así como las astilladas, podrían ser reparadas colocándoles listones encolados de madera de especies similares a la existente o de lo contrario aplicar masillas, así mismo de ser necesario, aplicar métodos de reforzamiento estructural. En los elementos que posean aún una sección cuya capacidad puede aprovecharse, se puede reconstruir la misma con resinas epóxicas o engrudos de cola de carpintero y aserrín, para inyección de las cavidades y grietas.

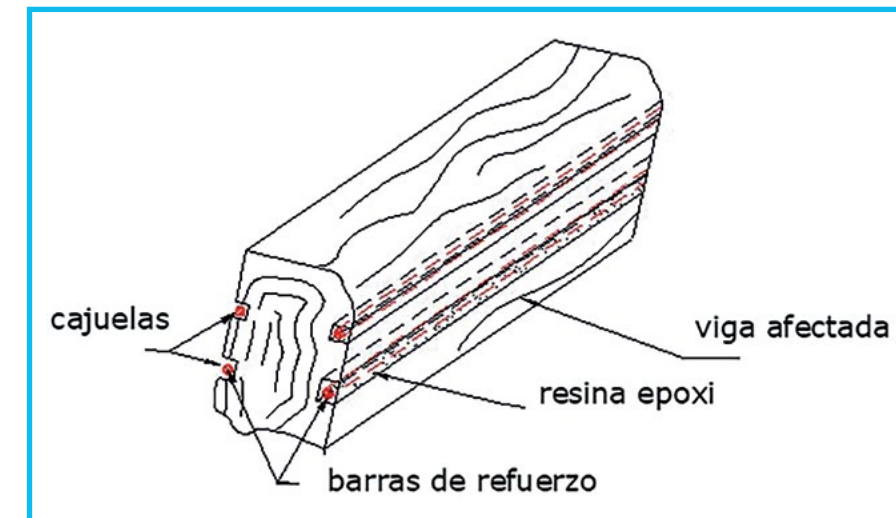


Fig. 45: Refuerzo de viga con barras y resina epóxica

Se podrán reforzar las vigas de forma adicional mediante la ejecución de cajas en las caras laterales y colocación de barras de acero, o fibras de vidrio o carbono con resinas. Asimismo, se pueden colocar prótesis de maderas de similar calidad para reponer las secciones perdidas, y de esta manera garantizar una correcta adherencia mediante el encolado con resinas (Figura 45).

6.3. PUDRICIÓN EN LA ZONA DE EMPOTRAMIENTO

En aquellas zonas donde hay afectaciones puntuales de las vigas, en la zona empotrada en el muro, se recomienda la reparación mediante alguna de las siguientes soluciones de reforzamiento:

6.3.1. Refuerzo del cabezal mediante elementos metálicos

Utilizando un casquillo metálico (Figura 46), que puede ser conformado con planchas, canales u otro elemento, atornillado o pegado con resina a la zona no afectada de forma que se garantice la transmisión de carga en la zona del apoyo. Empleando planchas de acero (Figura 47), calculadas previamente para resistir las solicitaciones actuantes y ancladas a la parte sana de la sección de la viga mediante la aplicación de resinas, o en su defecto pernos. A partir de la colocación en la zona del apoyo de un perfil metálico (Figura 48), que debe ser convenientemente sujeto a la viga ya sea mediante pernos, resinas u otro método que garantice una adecuada transmisión de cargas.

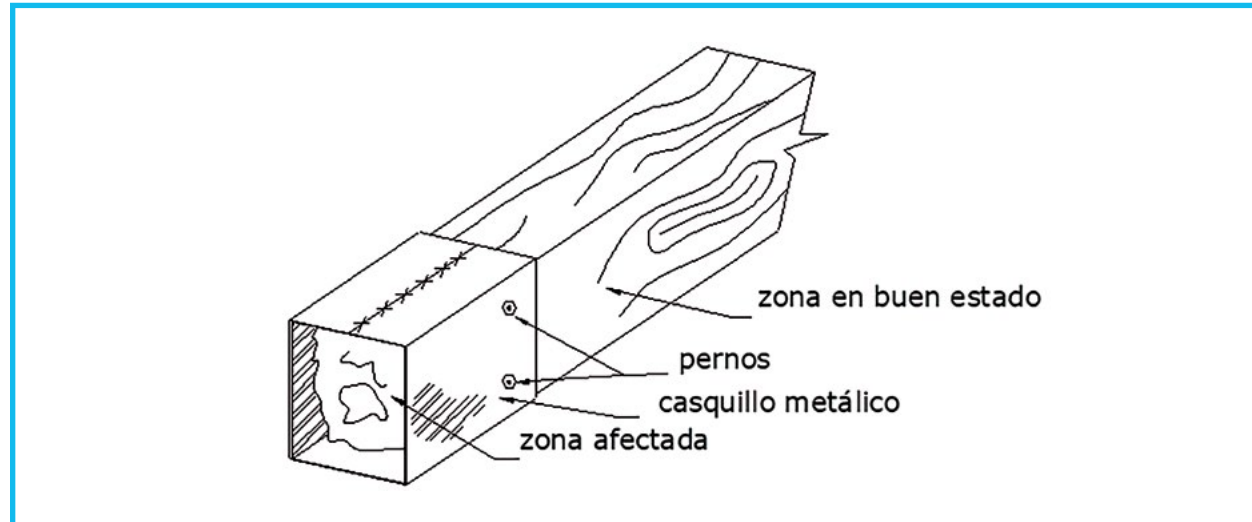


Fig. 46: Refuerzo del cabezal con casquillo metálico

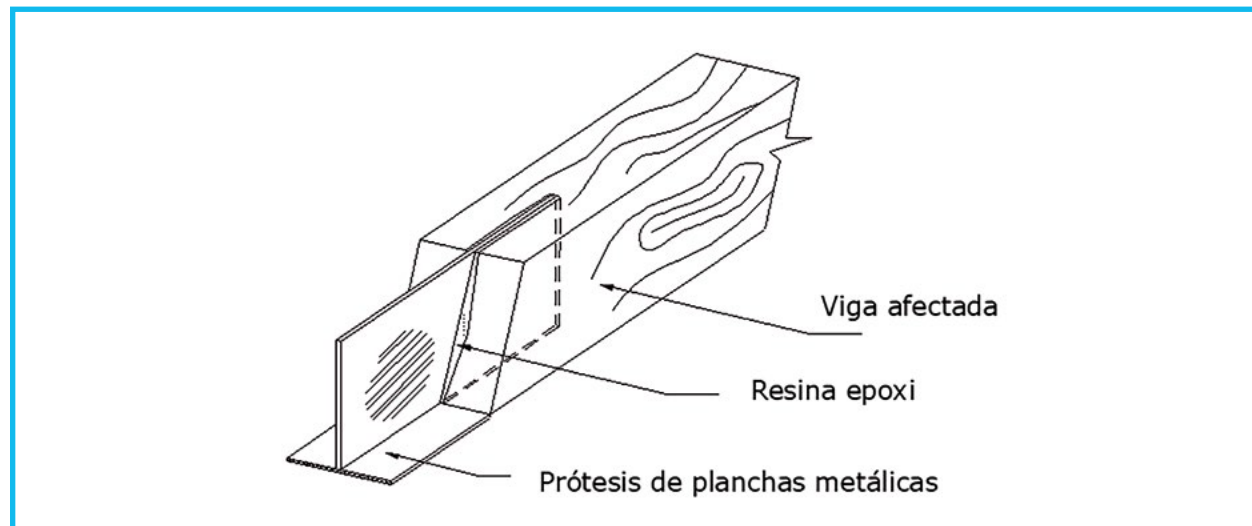


Fig. 47: Refuerzo del cabezal con prótesis de planchas metálicas

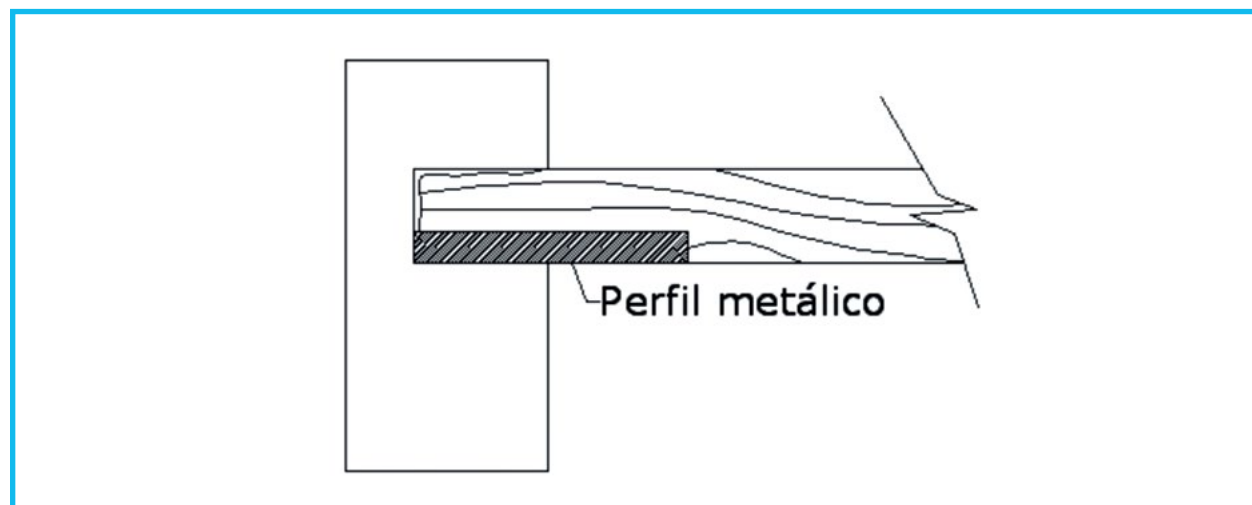


Fig. 48: Colocación de perfil en el apoyo

6.3.2. Refuerzo del cabezal mediante resina epóxica y varillas o barras de acero

Consiste en la reconstrucción mediante una formulación epoxídica de toda la zona afectada con previo corte de la misma. Primero se sana toda la zona afectada de pudrición y se practican perforaciones por la cabeza de las vigas, con un ángulo entre 40 y 30 grados, dejándolas completamente limpias de virutas y partículas. Luego se disponen varillas de fibra de vidrio (o acero corrugado) que quedan fijadas a la madera mediante un mortero de resinas epoxi (Figura 49 A y B).

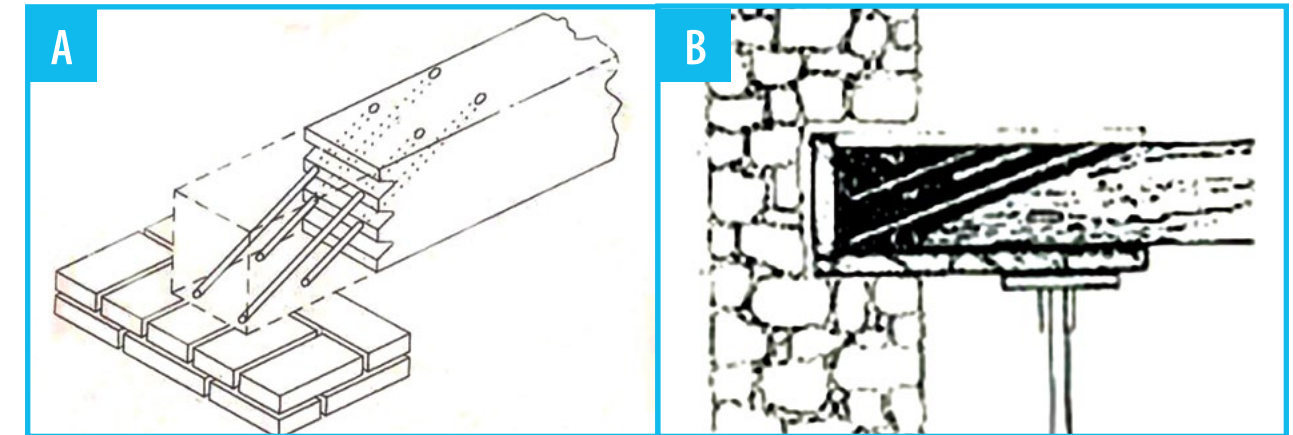


Fig. 49: Cabezal reforzado con resina epóxica y varillas o barras de acero

6.3.3. Refuerzo de un conjunto de cabezales de viga de madera mediante amadrinamiento con viga y ménsulas de madera o ménsulas de acero

Consiste en colocar una nueva viga de madera o acero próxima al muro de carga, de modo que apoye a las vigas afectadas en la zona del apoyo. Además, se colocan varias ménsulas de madera o de acero que se empotran en el muro, espaciadas según la magnitud de la carga que tengan que resistir. Esta solución se recomienda para zonas donde hay un elevado número de vigas con afectaciones en las cabezas. Para el refuerzo se pueden emplear vigas de madera o metálicas, mientras que las ménsulas se pueden ejecutar empleando perfiles metálicos, madera e incluso hormigón (Figura 50 A y B). El material a seleccionar dependerá de los requerimientos arquitectónicos de la obra. En caso que los muros transversales sean portantes, se puede prescindir de los canes y apoyar la viga en estos muros. En cualquiera de los casos debe tenerse en cuenta la ejecución de una pequeña losa de asiento para que apoyen las vigas y evitar las grietas en los muros por cargas concentradas (Figura 51).

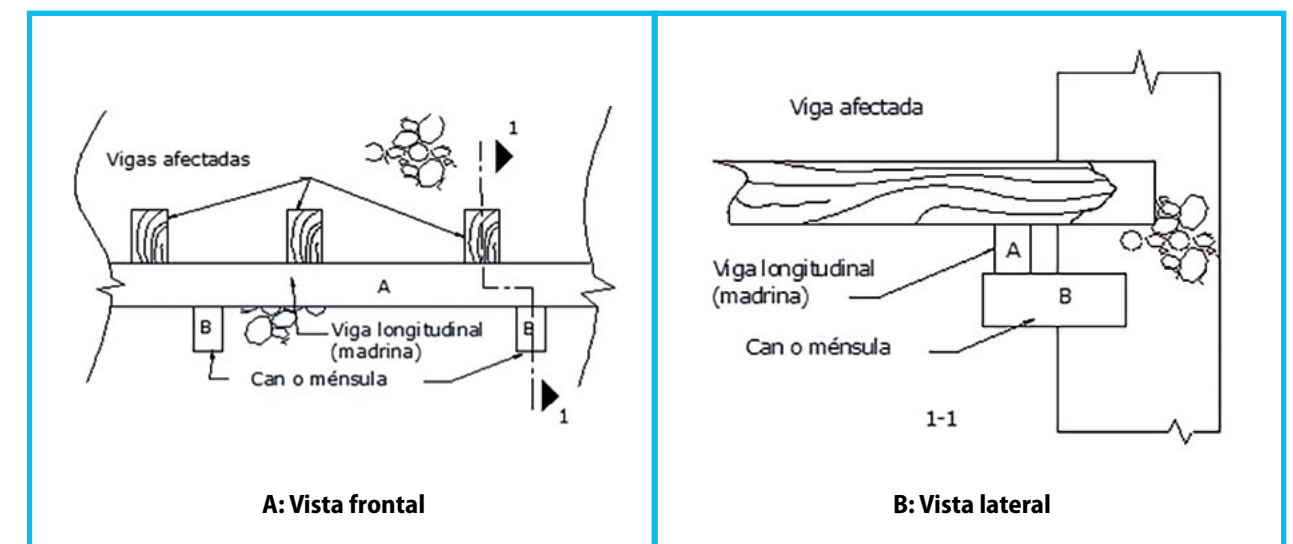


Fig. 50: Refuerzo de los cabezales mediante viga longitudinal

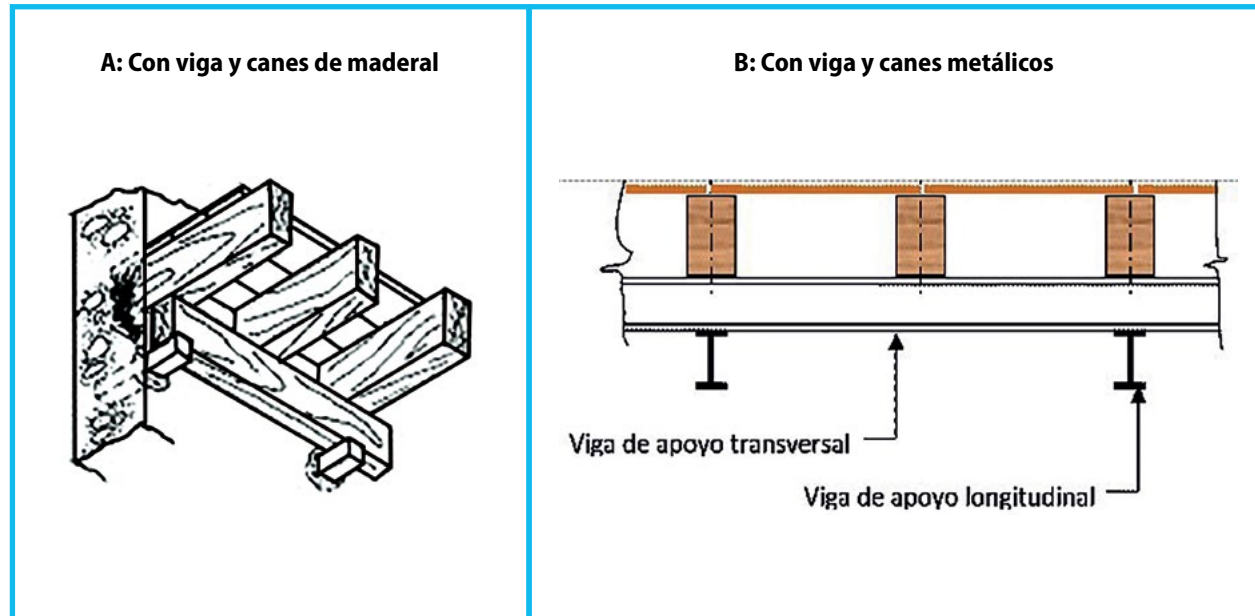


Fig. 51: Amadrinamiento de vigas de madera

6.3.4. Agrietamiento

Las vigas agrietadas se pueden inyectar con resinas compatibles con el material y que permitan restaurar el monolitismo de las piezas mediante una adecuada adherencia de los bordes de las grietas. En casos más críticos, se puede reforzar la viga de madera agrietada o partida en el sentido paralelo a la dirección de las fibras, mediante la colocación de una plancha de acero (o de madera dura), en la cara inferior adosada mediante pernos metálicos, que atraviesan la sección de la viga para resistir las solicitaciones de la pieza. Esta solución solo es posible donde se decida desmontar la tablazón, pues requiere acceso por la cara superior para atornillar los pernos (Figura 52).

Las vigas partidas o agrietadas en el sentido perpendicular a la dirección de las fibras, se pueden reforzar colocando un perfil de acero de sección canal (C) en la cara inferior que se adosará a la viga mediante pernos metálicos que atraviesan su sección, este tipo de refuerzo puede hacerse también con dos perfiles de acero de sección angular (L) colocados de forma similar a la descrita anteriormente (Figura 53).

Otra solución empleada es el engalletado de la viga agrietada, que no es más que el reforzamiento mediante la colocación de planchas metálicas por ambas caras laterales que se adosarán mediante pernos (Figura 54). Asimismo, se puede reforzar una viga agrietada mediante un fleje de acero que la rodea, y que se fijará con pernos metálicos. Este tipo de refuerzo se aplica cuando no es posible la intervención por la parte superior de la viga afectada (Figura 55).

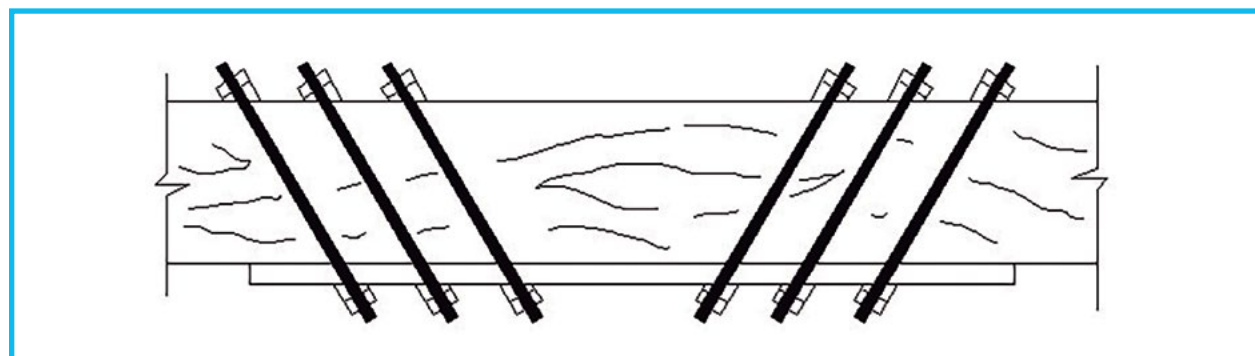


Fig. 52: Viga agrietada longitudinalmente reforzada con planchas atornilladas

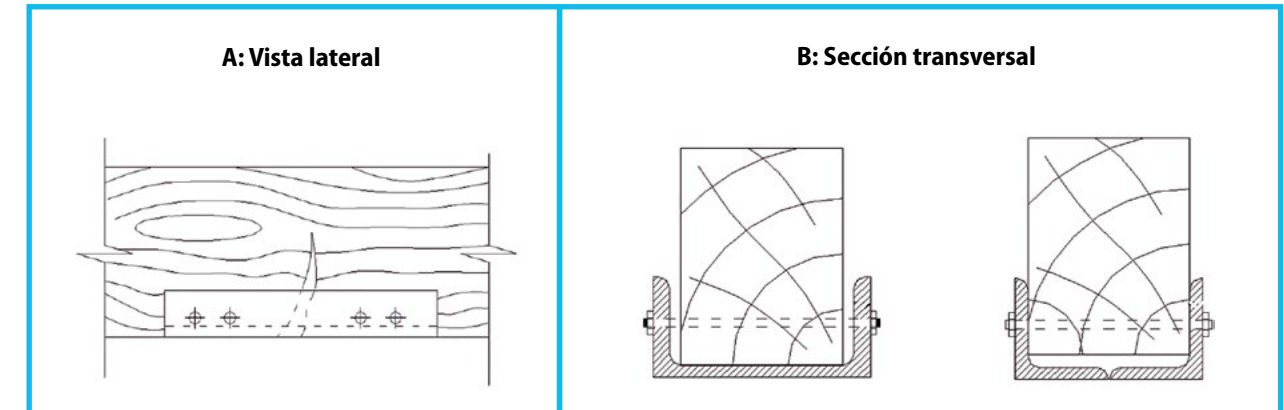


Fig. 53: Refuerzo de viga de madera agrietada verticalmente mediante perfil de acero C o L

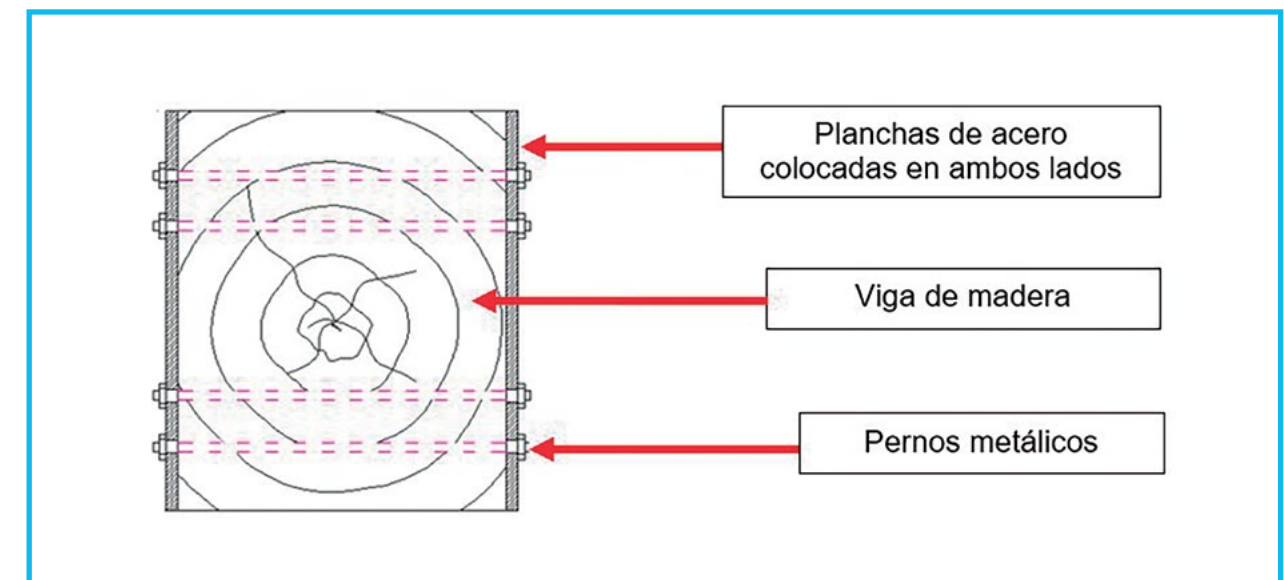


Fig. 54: Refuerzo de viga de madera agrietada mediante planchas laterales

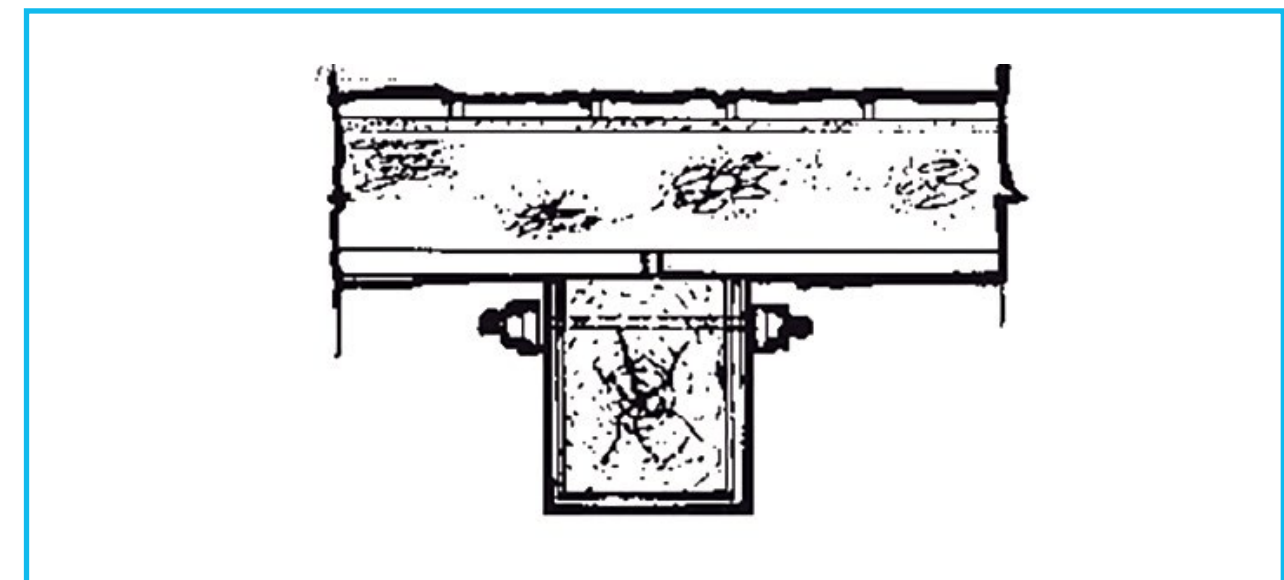


Fig. 55: Refuerzo mediante fleje metálico que rodea a la viga de madera agrietada y pernos

6.3.5. Afectaciones en los pies derechos

Para las lesiones de pérdida de sección, grietas y pudrición en las bases de los pies derechos se pueden realizar soluciones similares a las de las vigas, solo aplicándolas de forma tal que se ajusten a estos elementos verticales. Para el refuerzo de la base de los pies derechos se recomienda cortar la zona afectada hasta donde se aprecie madera sana, y posteriormente se completará el área con enzancamientos (Figura 56), para los cuales la madera a emplear debe ser de iguales características físico-mecánicas o superiores a la madera del elemento. Se puede igualmente reforzar en la zona del apoyo mediante resina epóxica y varillas o barras de acero (Figura 57), y mediante prótesis metálicas (Figura 58).

La zona en donde se colocará nuevamente el pie derecho, se deberá impermeabilizar y preparar debidamente antes de su sujeción. Debido a que los pies derechos a colocar estarán expuestos a condiciones cíclicas de humectación y secado, se deberán proteger con pintura, aplicada por todas las caras, para resguardarlos de la humedad.

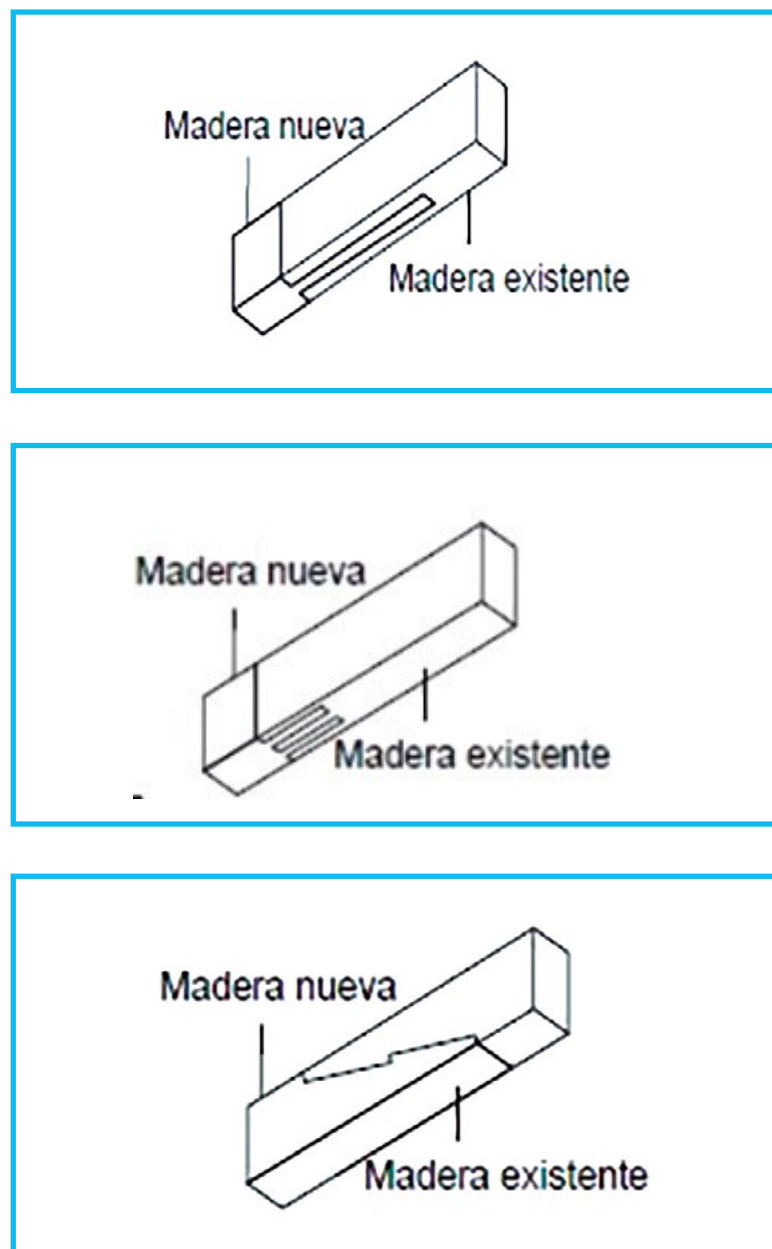


Fig. 56: Ejemplos de enzancamiento

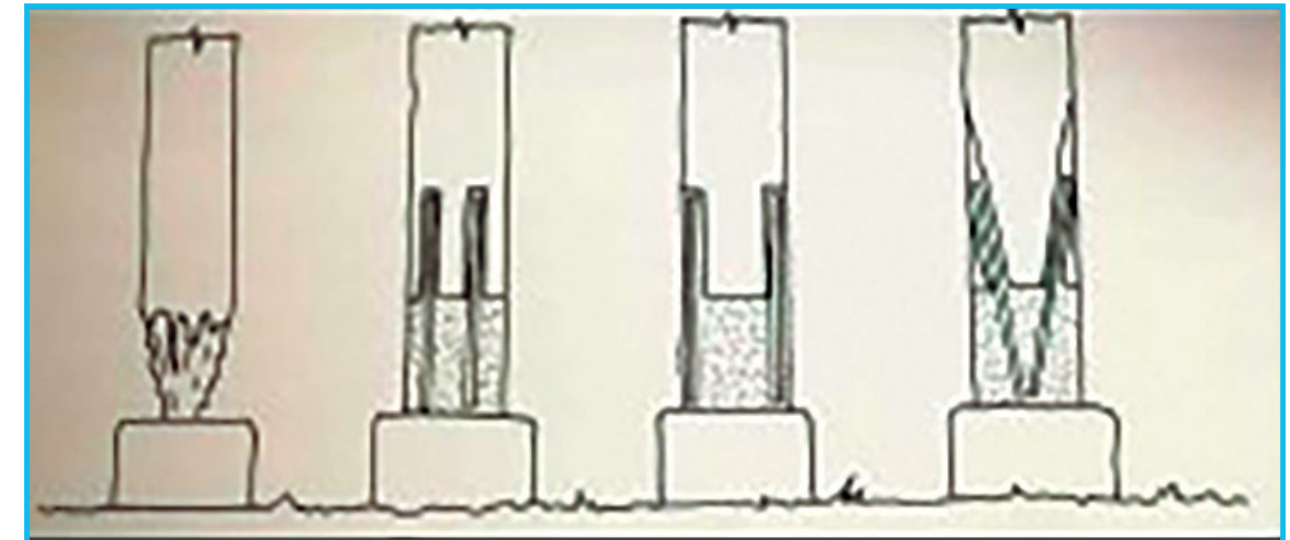


Fig. 57: Con resina epóxica y varillas

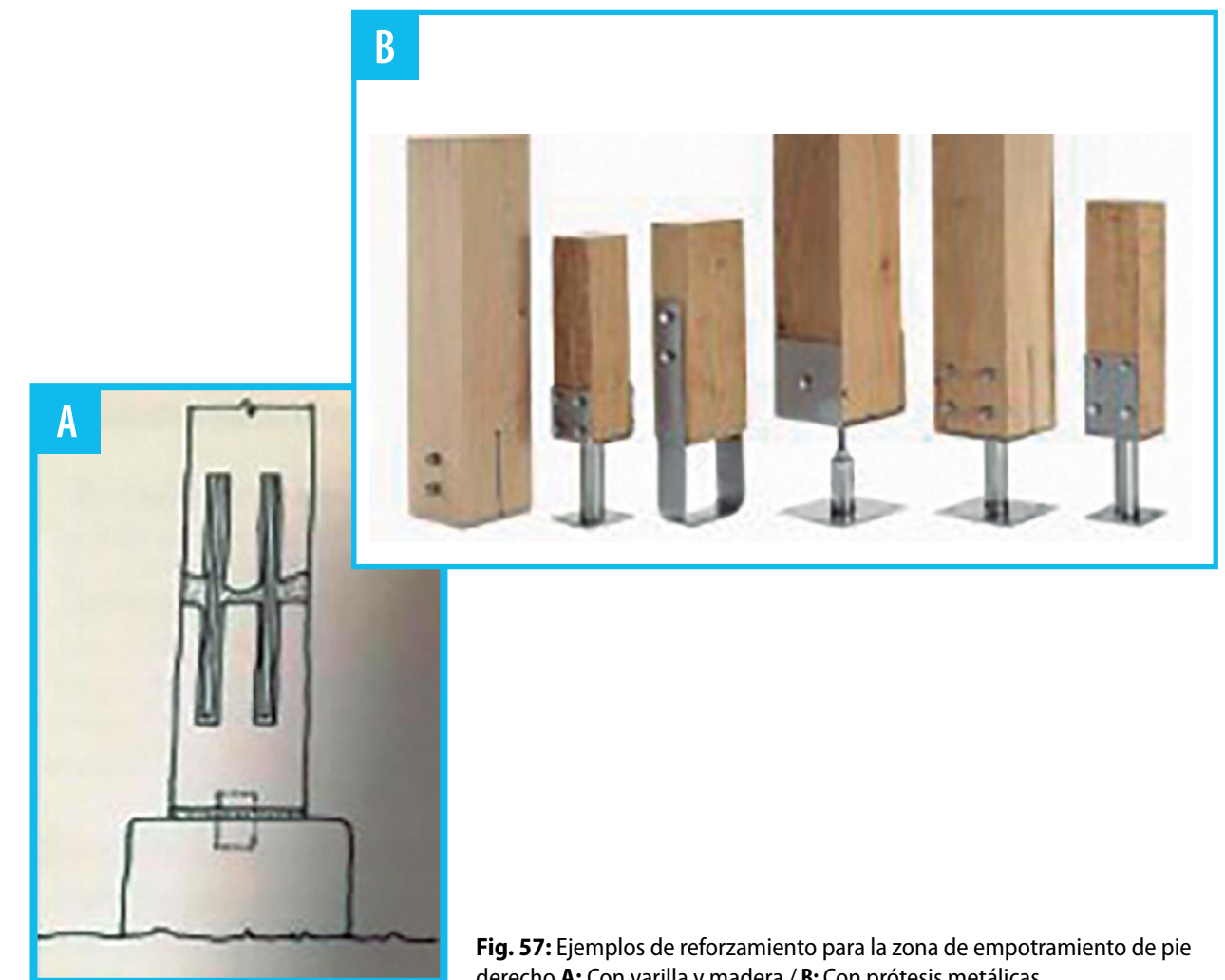


Fig. 57: Ejemplos de reforzamiento para la zona de empotramiento de pie derecho **A:** Con varilla y madera / **B:** Con prótesis metálicas.

6.3.6. Afectaciones en la tablazón

Si existen tramos del entablado afectados, se deben sustituir usando pedazos de tablas que serán introducidos entre las vigas adyacentes hasta ponerlas en contacto con el entablado original. Si este no se encuentra en malas condiciones, puede retirarse el tramo en mal estado y colocar la nueva tabla contra el relleno, sin producir golpes o vibraciones que puedan afectar y desprender el enrajonado. Se puede usar una capa ligera de mortero sobre la tabla, de modo que se comprima y se mezcle con el relleno al ajustar los nuevos tablonos. Para soportar las tablas se colocan listones que se fijan a las vigas por medio de tornillos o clavos. Esta solución en su conjunto se denomina engavetado de la tablazón (Figura 59).

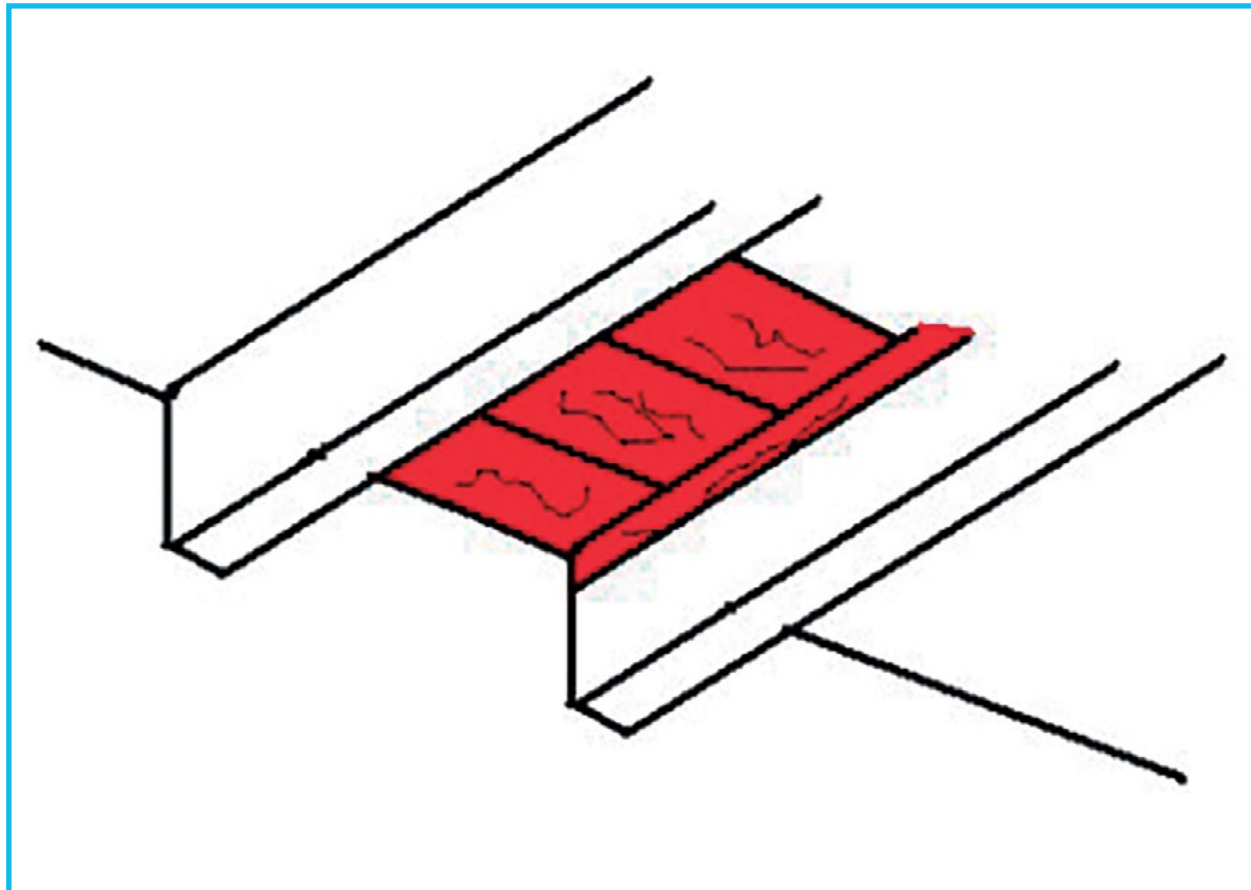


Fig. 59: Engavetado de la tablazón

7. BIBLIOGRAFÍA

- Tejera, P.; O. Álvarez (2013): *Conservación de Edificaciones*. Parte 1. Editorial Félix Varela. La Habana. Cuba. ISBN 978-959-07-1612-6 Parte 1. Capítulo 6: Patología y reparación de las estructuras de madera. Pág. 264, 265, 268-269.
- Cruz de León, José. *Preservación de la madera en el patrimonio histórico*. (Libro de conservación).
- Liñán, C. R.; J. M. Conde; P. R. D. Hita and F. P. Gálvez (2011), *Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz)*. *Informes de la Construcción*, 63 (521): 13-22. doi.: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.03231>
- Álvarez Rodríguez, Odalys. "Construcciones históricas de madera. Principales deterioros y técnicas de intervención". Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Conferencia.

- Palaia, L. (2014). Empleo del penetrómetro para madera para el diagnóstico de la madera en servicio en edificios antiguos. *Informes de la Construcción*.
- Álvarez Rodríguez, Odalys. "La madera en la construcción". Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Conferencia.
- Henry-Torriente, Pedro P.; García-Delgado, Juan M.; Sosa-Suárez, Carlos Juan; Ibáñez-Drake, Alberto. *Riesgo del cambio dimensional y valores de humedad recomendados para la madera utilizada en la construcción en Cuba*.
- Broto. *Enciclopedia de Patologías de la construcción*.
- Arriaga, Francisco; Peraza, Fernando; Esteban, Miguel; Bobadilla, Ignacio; García, Francisco (2002): *Intervención en estructuras de madera*.
- UNE 41805-8. *Diagnóstico de edificios. Estudio patológico de la estructura del edificio. Estructuras de madera*.
- Babé Ruano, Manuel. (2006): *Mantenimiento y Reconstrucción de Edificios*. Segunda edición. Editorial Félix Varela. Ciudad de La Habana. Cuba.
- Menéndez Menéndez, José. (1998): *Desperfectos en construcciones de ingeniería y de arquitectura. Diagnóstico. Reparaciones. Reconstrucciones. Resumen de 20 conferencias*. MICONS. Ciudad de La Habana. Cuba.
- Carreras, R. (2011). *La identificación de la madera en el Patrimonio Cultural mueble e inmueble*.
- Álvarez, O. (2009). *La madera en la Construcción. Características y formas de trabajo*. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Conferencia.
- Álvarez, O. (2017). *Estructuras de madera. Técnicas de intervención*. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". Conferencia.
- A. (2004). *Maderas de construcciones coloniales del Centro Histórico de La Habana Vieja*. Tesis.
- _____ (2000). "Los techos de armadura cubanos", en *Arquitectura y Urbanismo*, Vol. XXI, No. 4, Ciudad de La Habana.
- Chateloin Santiesteban, F. (1992): "El inventario: instrumento de trabajo para la rehabilitación de zonas urbanas de valor histórico cultural", en *Arquitectura y Urbanismo*, No. 3, Ciudad de La Habana.

CAPÍTULO II: ESTRUCTURAS DE PIEDRA

AUTORES

ÁNGELA DIOMEDES ALMEYDA RODRÍGUEZ, EDREY BERRIO ALAYO

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las patologías de la piedra es crucial para la conservación de los monumentos históricos. Debido a la gran diversidad de terminologías empleadas para describir la naturaleza de daños que puede sufrir este material, desde 1980 se han venido registrando y debatiendo entre diferentes ramas de especialidades, las formas en las que identificar y dar nombre a las patologías. En la actualidad este proceso ha evolucionado hasta el punto en que se necesita de grupos multidisciplinarios, para estudiar en totalidad las formas de intervención y conservación de estas estructuras.

Todo proceso de intervención sobre un objeto histórico debe iniciar con un estudio de diagnóstico cuya capacidad de observación, identificación e interpretación de las lesiones presentes, permita la creación de procesos de intervención que permitan la rehabilitación con la menor afectación posible sobre la piedra. De esta forma se logra preservar la forma e historia de la obra construida. Este proceso investigativo no solo logra acelerar los trabajos de proyección, sino que facilita la elaboración de las posteriores etapas de intervención en la obra. Desde una perspectiva económica, esta correcta investigación y planificación conlleva a una disminución de los costos de inversión. Un buen diagnóstico puede a su vez salvar o conservar los elementos más importantes de las edificaciones, sin que las mismas recesen totalmente sus funciones.

En las edificaciones y monumentos ubicados en el Centro Histórico de La Habana, es muy típico el uso de cantería de piedra caliza blanda y conchífera, así como el mármol en monumentos (Figura 60). En las primeras edificaciones erigidas en la primitiva Villa de San Cristóbal de La Habana, era usual el empleo de la roca caliza arrecifal extraída de las canteras de Guanabacoa, labradas y empleadas como material de construcción. Para finales del siglo *xvi* las construcciones de cal y canto se erigían con piedras irregulares unidas entre sí mediante una argamasa de arena, agua y cal (Figura 61).

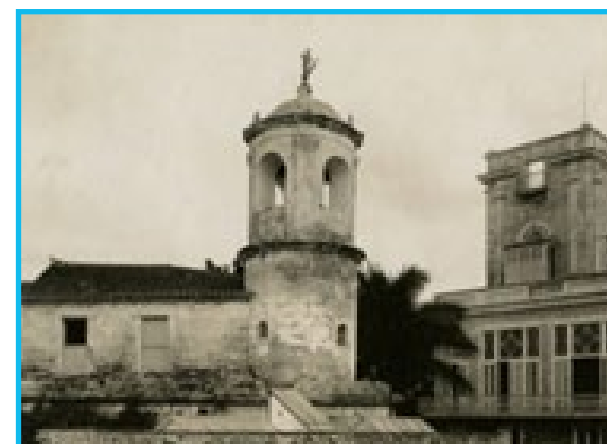


Fig. 60: Castillo de la Fuerza. Estructura militar de piedra. La Habana. Fuente: Centro de Documentación "Arq. Fernando Salinas", Restaura, OHCH.



Fig. 61: Fuente de Neptuno. Escultura de piedra y mármol. Paseo del Prado, La Habana. Fuente: Centro de Documentación "Arq. Fernando Salinas", Restaura, OHCH.

2. MATERIALES PÉTREOS. USO EN LA CONSTRUCCIÓN

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES PÉTREOS

Los materiales pétreos que se utilizan en la construcción se clasifican en naturales y artificiales. Los materiales pétreos naturales son los que provienen directamente de la naturaleza, dándole la forma adecuada para emplearlos. Los materiales pétreos artificiales se preparan con diferentes productos en estado polvo-riente o pastoso, las cuales se endurecen por procesos fisicoquímicos.

Los materiales pétreos naturales se denominan rocas. Están compuestas por asociación de minerales y clasificadas según su lugar de origen, composición química, composición mineralógica, estructura y yacimiento. Estos son el mármol, el granito, la pizarra, el yeso, entre otros. También pueden ser clasificados según los tamaños que se van a utilizar o la aplicación que se le va a dar. Cada uno de ellos cumple una función importante y singular en el área de la construcción.

La piedra caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio, uno de los más utilizados en la construcción. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican el color y el grado de coherencia de la roca.

El mármol está compuesto fundamentalmente por rocas calizas metamórficas constituidas en su mayoría por calcita cristalizada y minerales accesorios como mica, serpentina, grafito en los mármoles oscuros, y óxidos de hierro en el rojo, a lo que se debe los distintos colores.

Entre los materiales pétreos artificiales están el hormigón, la cerámica, el adobe, los morteros, la argamasa, obtenidos mediante un proceso de manufactura lográndose el mismo aspecto que los pétreos naturales, pero con algunas características mejoradas o controladas. Estos materiales son creados por el hombre y moldeados según su deseo. Para esto, se utilizan los aglomerantes, los cuales se combinan con arena, grava o cabezotes, en dependencia de su necesidad.

También se llama materiales pétreos industriales cuando son el resultado de un proceso industrializado de fabricación, tal es el caso del vidrio, los ladrillos y las tejas.

2.2. PROPIEDADES Y USO EN LA CONSTRUCCIÓN

Las propiedades de las piedras naturales están en dependencia de su composición mineralógica, su origen, tipo de yacimiento e historia geológica. Las propiedades que generalmente se les piden a las piedras naturales son:

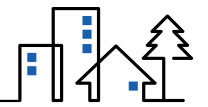
- Ser compacta y homogénea
- No presentar grietas, nódulos, restos orgánicos, etc.
- Resistir las cargas que han de soportar
- No deberán sufrir alteraciones por la acción de los agentes atmosféricos
- Ser resistentes al fuego
- Tener adherencia a los morteros
- Dejarse labrar

Los ensayos más empleados para conocer las características y propiedades de las piedras naturales, de acuerdo con el uso que se le va a dar en la construcción, son los siguientes: absorción de agua, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, resistencia al cortante, resistencia al desgaste, resistencia al choque, adherencia a los morteros, resistencia a los agentes atmosféricos, examen petrográfico, peso específico, porosidad, permeabilidad, dureza, resistencia al calor, resistencia al frío.

Las principales piedras naturales utilizadas en la construcción, de acuerdo con su clasificación geológica son las siguientes: granitos, basaltos, calizas, cuarcitas, areniscas, serpentina y mármoles.

Principales usos en la construcción de las piedras naturales:

- Muros: En este caso la piedra caliza es la más utilizada como, por ejemplo, la jaimanita.



- Pisos: El granito, el mármol y las calizas se utilizan principalmente para este fin. En el caso del granito se considera que es un material excelente para pisos por ser duro, resistente y duradero, aunque es muy costoso. El mármol es muy empleado en interiores por ser resistente al desgaste, y alcanzar gran brillo y pulimento, aunque es menos resistente a la intemperie que el granito, al volverse poroso por pérdida del pulimento. Por su parte la piedra caliza es menos resistente que el granito y mármol. Se emplea en exteriores, como por ejemplo en patios, jardines, o bordes de piscina por tener superficies pulidas y ser anti-resbalante.
- Decorativas: Se utiliza para enchapes de superficie, donde las más utilizadas en nuestro país son el mármol, el granito y las calizas. Los enchapes de mármol y de granito que vienen del taller a la obra, ya cortados y pulidos, se aplican en planchas adhiriéndose a la superficie del muro mediante el uso de mortero a base de cemento. Estos enchapes son costosos pero durables y con un apreciable acabado.

2.3. DETERIORO DE LOS MATERIALES PÉTREOS

Las piedras expuestas a la acción de agentes físicos, químicos y biológicos sufren distintas alteraciones. Esto se manifiesta a través de diferentes cambios de color, textura y aspecto, así como su composición mineralógica y química. El Consejo Internacional de Monumentos y Sitios (ICOMOS), define estas alteraciones en 5 grupos:

- Fracturas y deformación
- Desprendimiento o separación del material
- Deterioros provocados por pérdida del material
- Decoloración y depósito
- Colonización biológica

Seguidamente se describen estas manifestaciones con algunos ejemplos de lesiones identificadas en el Centro Histórico de La Habana:

2.3.1. Fracturas y deformación

- Fractura: Grieta que atraviesa completamente la pieza de piedra (Figuras 62 y 63).
- Grieta de estrella: Grieta que tiene forma de estrella.
- Microfisura: Fisuras con dimensión inferior a <math><0,1\text{ mm}</math>.
- Craquelado: Red de grietas menores.
- División: Fractura de una piedra entre dos planos de diferente resistencia como capas de arcilla/limo. La fractura puede ocurrir de forma vertical u horizontal. Por ejemplo, una columna puede dividirse en varias partes a lo largo de los planos de estratificación si la carga por encima es demasiado elevada.
- Deformación: Cambio en la forma sin pérdida de la integridad, que se manifiesta por torsiones, alabeos o pandeos. Esta forma de degradación afecta principalmente a placas de mármol (lápidas, placas de revestimiento).



Fig. 62: Grieta en muro exterior de piedra. Convento San Francisco de Asís



Fig. 63: Grieta en pieza de mármol. Cristo de La Habana

2.3.2. Desprendimiento o separación del material

- **Delaminación:** Consiste en un desprendimiento mediante varias capas o láminas orientadas en cualquier dirección con respecto a la superficie de la piedra.
- **Desintegración:** Se trata de un proceso de pérdida de material que se inicia generalmente en la superficie de la piedra y paulatinamente avanza hacia el interior hasta varios centímetros. Las formas más comunes de desintegración son: desprendimiento, desintegración granular, empolvamiento, azucaramiento y arenización (Figura 64).



Fig. 64: Desintegración granular del bloque de piedra. Convento San Francisco de Asís

2.3.3. Deterioros provocados por pérdida del material

- **Alveolización:** Formación de cavidades (alveolos) en la superficie de la piedra que pueden encontrarse interconectadas, y tener tamaño y aspecto variable con dimensiones desde centímetros hasta metros (Figura 65).
- **Erosión:** Pérdida de superficie original, dando lugar a formas suavizadas. También encontramos erosión diferencial que no es más que la pérdida de componentes de constituyentes de la matriz (Figura 66).
- **Daños mecánicos:** Daños mecánicos debidos al impacto de un proyectil (bala, metralla) o de una herramienta dura.
- **Incisiones:** Pérdida de material debida a la acción de una herramienta cortante.
- **Abrasión:** Erosión debida al rozamiento, frotamiento o impacto de partículas.



Fig. 65: Alveolización en muro de fachada Palacio del Segundo Cabo



Fig. 66: Erosión en columna. Plaza de La Catedral

2.3.4. Decoloración y depósito

- **Costras:** Es la acumulación mediante la formación de una capa sobre toda la superficie del material de forma coherente. Una costra puede incluir depósitos exógenos en combinación con materia derivada de la propia piedra. Las costras mantienen, frecuentemente, un color oscuro (costra negra) aunque también se encuentran costras de colores claros. Las costras pueden tener un espesor homogéneo, siguiendo la superficie de la piedra, o un espesor irregular dificultando la lectura de los detalles superficiales. Existen dos tipos de costras:
 - » **Costra negra (Figura 67):** Son las que se desarrollan generalmente en zonas abrigadas de la escorrentía directa en ambientes urbanos, suelen estar firmemente adheridas al sustrato y se componen, en gran medida, de partículas atmosféricas atrapadas en una matriz de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
 - » **Costra salina (Figura 68):** Costra compuesta de sales solubles, que se desarrolla en presencia de altos contenidos salinos y por sucesivos ciclos de humedad-sequedad.
- **Depósito:** Acumulación de material exogénico de espesor variable. Algunos ejemplos de depósitos son: salpicaduras de pintura o mortero, aerosoles marinos, partículas atmosféricas tales como hollín o polvo, restos de productos o materiales utilizados en restauración tales como apósitos de pasta de celulosa, restos de abrasivos utilizados en la limpieza, etc. Igualmente, los excrementos de pájaros y murciélagos también son considerados como depósitos.
- **Alteración cromática:** Modificación del color de la piedra en uno de los tres parámetros de color: tono, luminosidad y saturación.
- **Eflorescencia:** Acumulación cristalina, pulverulenta y generalmente blanquizca sobre la superficie. Las eflorescencias suelen ser poco cohesivas y normalmente se componen de sales solubles. Una eflorescencia es el resultado de la evaporación del agua cargada de sales disueltas, alojada en los poros de la piedra.
- **Incrustación:** Capa superficial endurecida, compacta y firmemente adherida al sustrato. La morfología de la superficie y su color, normalmente, son diferentes de los de la piedra. Las incrustaciones aparecen, generalmente, firmemente adheridas a la superficie de la piedra. Al retirar una incrustación, también se retira parte de la piedra adherida.
- **Películas:** Recubrimiento o capa muy fina, generalmente de naturaleza orgánica, y homogénea, siguiendo la superficie de la piedra. Estas pueden ser opacas o translúcidas, incapaces de penetrar en el sustrato, aunque pueden provocar cambios en las propiedades de la superficie de la piedra (aspecto, color, permeabilidad).
- **Pátinas:** Modificación cromática del material como resultado de agentes naturales o artificiales que, en la mayor parte de los casos, no se acompaña de un deterioro superficial visible. Por lavado a la intemperie puede llegar a constituir una veladura.
- **Ensuciamiento:** Depósito de una capa muy fina de partículas exógenas (hollín) dando una apariencia sucia a la superficie de la piedra. Con el incremento de la adhesión y cohesión, existe una transición entre el ennegrecimiento o ensuciamiento, y la costra. El ennegrecimiento puede originarse por la acción de contaminantes atmosféricos (productos industriales, domésticos o emisiones del tráfico).

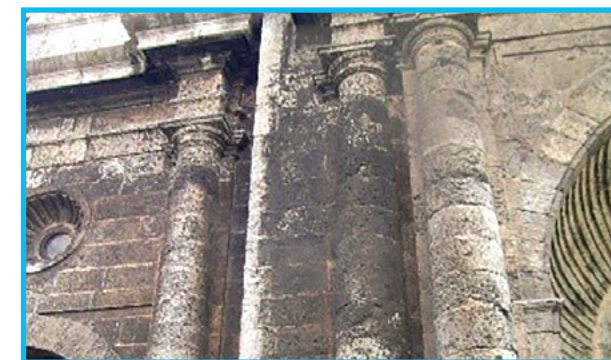


Fig. 67: Presencia de pátinas en las columnas. Convento San Francisco de Asís



Fig. 68: Costra depositada en la superficie. Palacio del Segundo Cabo

2.3.5. Colonización biológica

- Colonización de la piedra por plantas y microorganismos tales como bacterias, cianobacterias, algas, hongos y líquen (este último es una simbiosis de los dos anteriores). La colonización biológica también incluye influencias por otros organismos, tales como nidos de animales sobre y dentro de la piedra (Figuras 69 y 70).



Fig. 69: Presencia de plantas en fachada. Torreón de Cojímar



Fig. 70: Colonización biológica en muros de cubierta. Convento San Francisco de Asís

2.4. OTROS AGENTES Y MECANISMOS DE ALTERACIÓN

Otro aspecto a tener en cuenta es la contaminación atmosférica, que contribuye significativamente al deterioro del inmueble, debido al flujo creciente de vehículos automotores, la cercanía con los centros industriales y el transporte marítimo. Con las emanaciones de la combustión del dióxido de carbono, se transportan por el aire el hollín y los elementos gaseosos, tales como los anhídridos sulfurosos, nitrosos y carbónicos. La deposición (mediante vía húmeda o seca) de sustancias sólidas sobre los muros a través del aire, forma una costra porosa que condensa y retiene los gases y la humedad del aire. Los agentes que contribuyen en menor o mayor medida a la alteración en las piedras, tanto en edificaciones como en monumentos, así como las formas de los deterioros son: el agua, los contaminantes atmosféricos, las sales solubles y los organismos vivos.

2.4.1. Acción del agua

Interviene en cualquier forma de alteración en la piedra, tanto física, química o biológica, actuando también en la transportación de las sales solubles, los contaminantes atmosféricos y los organismos vivos. Este proceso eleva significativamente su papel en el proceso de degradación.

En los edificios o monumentos de piedra, la humedad se manifiesta en tres formas de alteración en dependencia de su procedencia: condensación, absorción o filtración y ascensión capilar. El contenido de agua retenido en la piedra dependerá del grado de porosidad que está presente. Seguidamente se describen los fenómenos antes mencionados:

- **Humedad por condensación:** Es un fenómeno que se produce al condensar el vapor de agua contenido en el aire, al entrar en contacto con una superficie más fría al alcanzar la temperatura de rocío, lo que conlleva a la deposición de gotas de agua, las cuales se agrupan formando núcleos húmedos. Este fenómeno no solo se produce en la superficie del material, sino también en los intersticios. Los lugares más comunes donde este fenómeno sucede son en los encuentros entre techos/pared, esquinas, columnas/pared, carpintería/pared.
- **Humedad por filtración:** Se caracteriza por la infiltración del agua exterior a través de los elementos, producto de un defecto de la edificación o de otra naturaleza. Como por ejemplo desde la cubierta, defectos del material por no existir control de calidad, defectos de ejecución, mano de obra no especializada,

tratamientos incorrectos a los materiales no tradicionales, envejecimiento del material, mala solución en puntos vulnerables. Esta humedad aparece en forma de chorro, de goteras, o de manchas.

- **Humedad por absorción:** El agua pasa a través de los intersticios microscópicos, ayudada por la tensión superficial. Se puede agrupar en humedad por absorción lateral, descendente y ascendente, tomando como criterio de clasificación la dirección predominante que sigue el agua y la ubicación del foco húmedo. Los muros de fachadas son los más afectados por la humedad de absorción lateral, en ellos el agua se introduce en la estructura ayudada por la acción del viento.
- **Humedad por ascensión capilar:** Se trata de un proceso de ascensión de agua a través de los poros del material debido al contacto con un medio húmedo y favorecido por la tensión superficial. Como consecuencia el agua va ganando altura hasta equilibrarse con las condiciones ambientales del medio en que se encuentre el elemento afectado.

El exceso de agua dentro de las piedras genera tensiones internas en las paredes de los huecos, donde llegan a provocar fisuras o grietas hasta su fractura. La valoración del comportamiento hídrico se realiza a través de un estudio de diagnóstico evaluando fundamentalmente la capilaridad o la absorción de agua por diferentes métodos, aunque lo más usual es el control o evaluación de varias propiedades simultáneamente.

A continuación, se observan varios ejemplos de lesiones en piedra debido al elevado contenido de humedad (Figuras 71, 72, 73 y 74).



Fig. 71: Humedad por capilaridad con eflorescencias y biopelículas de coloración verde. Convento San Francisco de Asís



Fig. 72: Desprendimiento de la piedra por acción del agua. Catedral de La Habana



Fig. 73: Humedad por condensación en el techo y muro. Clínica estomatológica de La Habana Vieja

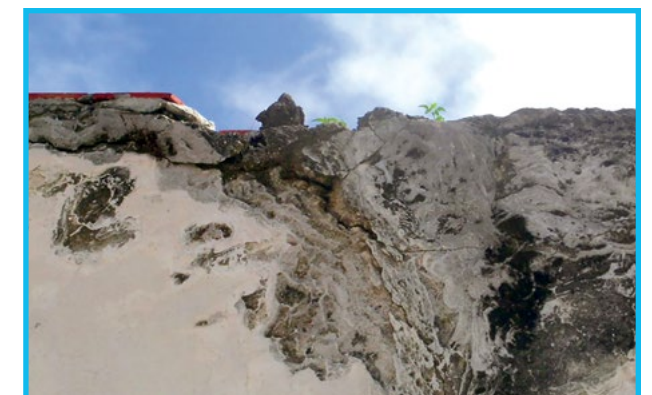


Fig. 74: Fractura de la piedra debido a la humedad por filtración desde la cubierta. Convento San Francisco de Asís

2.4.2. Efecto de los contaminantes atmosféricos

Las edificaciones de La Habana Vieja están enclavadas en diferentes entornos, clasificados según su ubicación. Aquellas más próximas a la franja costera norte, se encuentran en un medio urbano-costero, mientras que las presentes hacia el este, están en un entorno urbano-industrial. Las piedras reaccionan ante los efectos contaminantes atmosféricos en dependencia de la naturaleza del contaminante, el nivel de exposición y la concentración. En cualquier caso, estas reacciones conllevan paulatinamente a la degradación del material, dando lugar a diversas formas de alteración como son las eflorescencias, las pátinas y las costras (Figuras 75 y 76).



Fig. 75: Deposition of particles under cornices. Convento de San Francisco de Asís

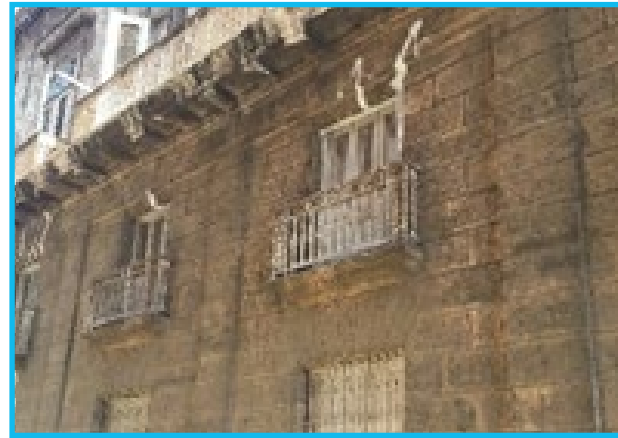


Fig. 76: Darkening of the facade due to deposition of atmospheric pollutants. Palacio Aldama

2.4.3. Sales solubles

Las sales ocasionan daños físicos y químicos en las piedras cuando cristalizan en su interior. El grado de perjuicio es variable y depende no solo de las sales, sino también de las variaciones de temperatura y humedad ambiental. Estos cambios controlan la disolución y precipitación dentro o fuera del material, que, al precipitar dentro del poro, produce tensiones por empuje, lo que conlleva a creación de fisuras o desprendimiento de material. La procedencia de estas sales puede ser variable, ya sea mediante deposición superficial por aerosol marino, morteros contaminados o el suelo. Los tipos de sales más frecuentes en las edificaciones son las de cloruro, nitratos y sulfatos (Figura 77).



Fig. 77: Presence of soluble salts in the stone. Palacio del Segundo Cabo

2.4.4. Organismos vivos

Se trata de organismos que se asientan en la piedra y participan en la alteración química, física y biológica. Esto conlleva a mecanismos de degradación de la piedra, manifestados generalmente en forma de erosión como resultado de la acidificación del material biológico depositado. Las manifestaciones más comunes son en forma de pátinas negras, crecimiento de musgos (organismos fotoautótrofos) y películas microbianas verdes y negras, que se desarrollan en el material pétreo cuando las condiciones ambientales son favorables. Estas formas de deterioro biológico son:

- Bacterias: Pueden provocar exfoliaciones, eflorescencias, manchas por cambio de coloración, etc.
- Hongos, líquenes y algas: Crecen en zonas húmedas, forman biopelículas de variados colores y costras.
- Musgos: Forman una capa de materia orgánica que retiene humedad.
- Plantas superiores: Se refiere al crecimiento de árboles, arbustos, hierbas, helechos, etc., capaces de crecer sobre el substrato, provocar grietas y retener humedad.
- Animales: Las excretas de aves (palomas, gorriones) y murciélagos se transforman en ácidos (úricos, fosfóricos y nítricos) durante su proceso de degradación y reaccionan con la piedra, lo que conlleva a la disolución de la misma (Figura 78).



Fig. 78: Presence of soluble salts in the stone. Palacio del Segundo Cabo

3. METODOLOGÍAS DE DIAGNÓSTICO PARA LA CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PIEDRA

3.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO DE DIAGNÓSTICO

Todo proceso de investigación de una obra, requiere de etapas previas dedicadas a la búsqueda bibliográfica de toda la información histórica y arquitectónica existente. Esto posibilita adquirir un conocimiento de las posibles modificaciones e intervenciones sucedidas en la estructura a lo largo de su vida de servicio, lo cual será una herramienta vital para entender las fuentes de deterioro y patologías presentes como resultado de esas alteraciones. Sobre la base de la inspección preliminar que se les realiza a los inmuebles y obras monumentales, se visualiza el estado de conservación general que presentan. En los registros de lesiones se recomienda la toma del mayor número de fotografías posibles a fin de registrar la mayor cantidad de información.

Durante la valoración se deberán registrar y detallar los puntos más críticos de deterioro, y otras lesiones que por su envergadura pueden afectar la capacidad portante o la conservación del material en estudio. Se realizan además ensayos físicos, químicos o biológicos a los materiales y elementos constructivos existentes que sirven de soporte a la interpretación científico-técnica de las patologías en cuestión.

Existen en la actualidad diferentes metodologías para iniciar un estudio de diagnóstico. Seguidamente se presenta una propuesta metodológica para la intervención investigativa (Figura 79):

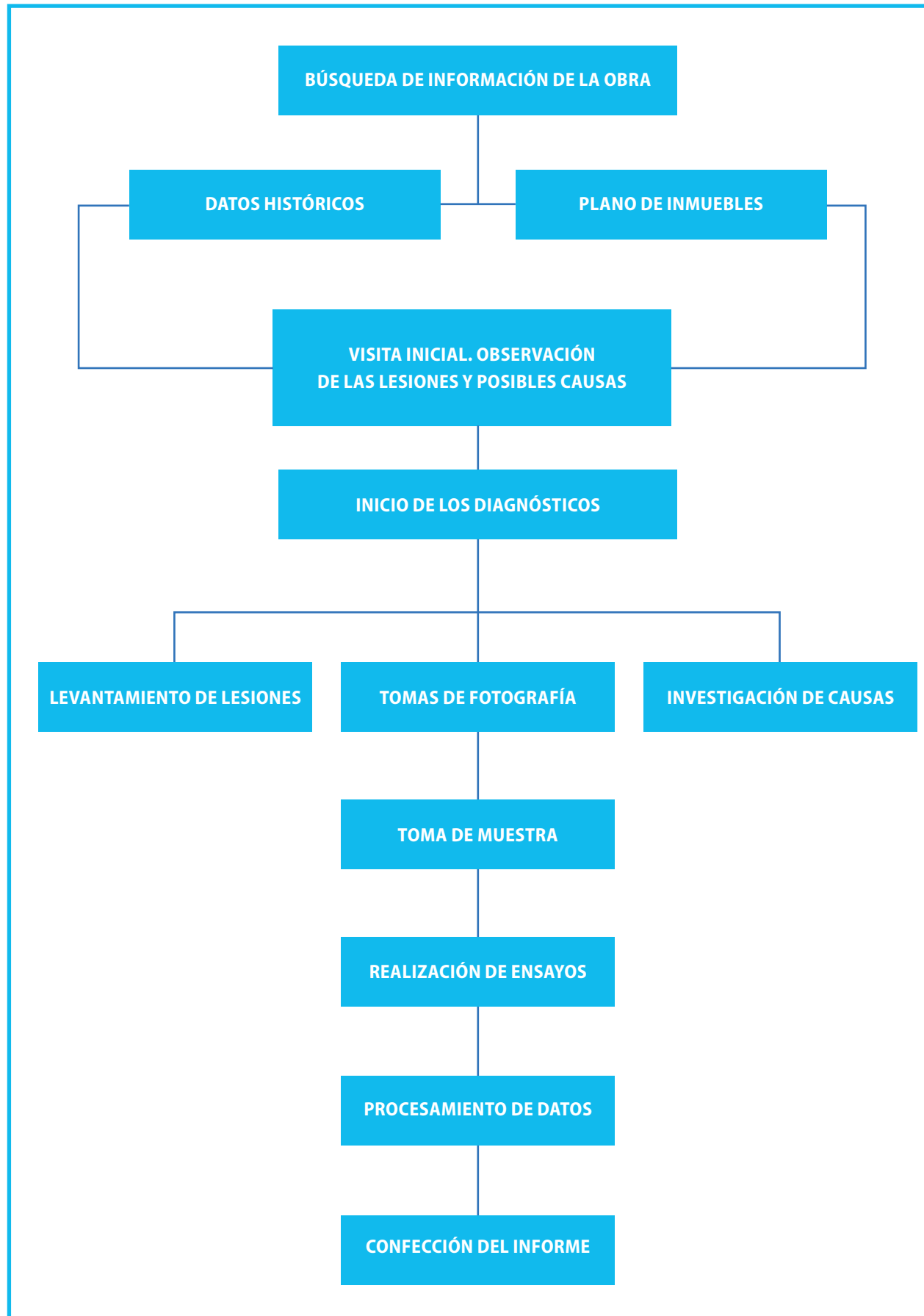


Fig. 79: Diagrama de flujo metodológico para realizar el diagnóstico de una obra

3.2. EJEMPLOS DE DIFERENTES FORMAS DE ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICOS EN OBRAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA HABANA

3.2.1. Malecón No. 111



Fig. 80: Presencia de sales solubles en la piedra. Malecón 111

- Datos de la obra: Edificio ubicado en Malecón No. 111 entre Genio y Crespo. Fue construido en 1904 y actualmente presenta grado de protección II. Su estructura está constituida por muros de carga donde la primera línea de fachada está compuesta por columnas de piedras de cantería de caliza.
- Datos del entorno: En la información aportada por el Plan Especial de Rehabilitación del Malecón de La Habana, se refleja que el segmento correspondiente a la zona de estudio, se caracteriza como terraza baja plana con cota promedio de 3.00 m sobre el nivel del mar, aunque la zona de la Punta y Prado se haya por debajo de esta cota. Como afectaciones principales se encuentran las penetraciones del mar como resultado de los eventos climáticos extremos como ciclones y huracanes, la deposición en forma de aerosol marino y la contaminación ambiental proveniente de las emisiones del tráfico vehicular. Las afectaciones debido a las inundaciones alcanzan desde el nivel de sótano hasta el primer nivel.
- Descripción organoléptica de las lesiones: La primera línea de fachada se encuentra expuesta, sin protección de repello y con aristas muy erosionadas provocadas por el desprendimiento de material producto de los ciclos de humectación y secado de las sales retenidas, además de recibir el impacto directo de la lluvia y el viento. La segunda línea de fachada tiene el mortero erosionado y desprendido. Las columnas carecen de acabado. La segunda línea, por el lateral derecho, tiene el mortero en muy malas condiciones, en donde se observa el sustrato base de ladrillos.

Las técnicas de diagnóstico aplicadas incluyeron:

- Toma de muestra: Se realizaron calas de profundidad en la primera línea de fachada para la identificación del tipo de piedra que compone la edificación, se hicieron ensayos de conductividad eléctrica para verificar la presencia de sales retenidas en los poros y ensayos de cristalización de sales (Figuras 81, 82, 83 y 84). Los resultados se muestran las tablas 2, 3 y 4.



Fig. 81: Toma de muestras para ensayos en laboratorio



Fig. 82: Realización de ensayos de humedad superficial

TABLA 2: RESULTADOS DE ENSAYOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

PROFUNDIDAD (CM)	CONDUCTIVIDAD (MS/CM)
0 A 2	1523
2 A 4	1510
4 A 6	1400

TABLA 3: RESULTADOS DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL EN MUROS

	PRIMERA LÍNEA DE FACHADA (ALTURA DE MEDICIÓN)		SEGUNDA LÍNEA DE FACHADA (ALTURA DE MEDICIÓN)	
	1,0 M	2,0 M	1,0 M	2,0 M
HUMEDAD SUPERFICIAL (%)	48,9	45	48,8	48,6
CLASIFICACIÓN (≥ 20)	SATURADO			

TABLA 4: RESULTADOS DE LA CRISTALIZACIÓN DE SALES

NO. DE CICLOS	OBSERVACIONES
12	MUESTRA DEGRADADA
10	MUESTRA DEGRADADA
11	MUESTRA DEGRADADA



Fig. 83: Antes de la realización del ensayo de cristalización de sales. Foto tomada en laboratorio

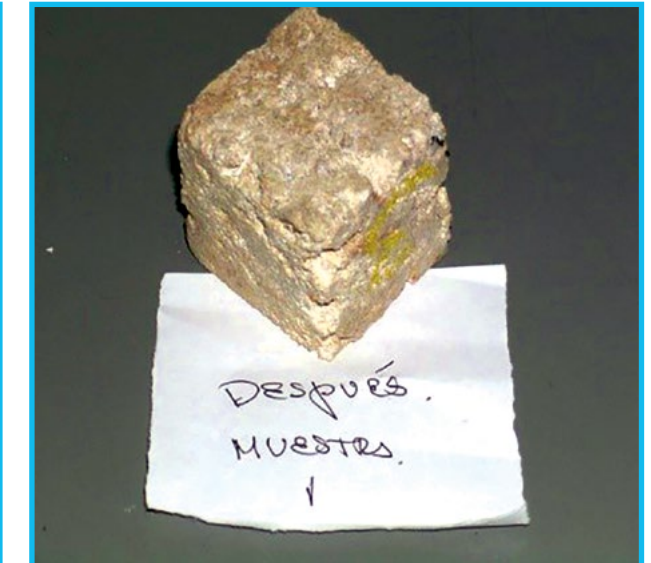


Fig. 84: Resultado después del ensayo, aristas desgastadas. Foto tomada en laboratorio

Análisis de los resultados:

Los resultados de conductividad eléctrica en las muestras fueron elevados en todos los casos. Esto demuestra como las sales han penetrado paulatinamente hacia el interior de la estructura de piedra. Esto genera ciclos de penetración-cristalización-fractura-desprendimiento que conlleva a un deterioro ininterrumpido del elemento estructural, lo que afecta su resistencia y capacidad portante. La humedad relativa ambiental (HR) en el momento de la medición fue de 74 %. Valores de HR superiores a 65 % propician la humectación de los poros en los materiales pétreos. Este fenómeno, unido a la corta distancia de la obra con respecto a la línea costera norte y la deposición húmeda de aerosol marino, conllevan a la humectación permanente de la superficie de la piedra, lo cual se registra en los valores medidos como medio saturado, de acuerdo con la clasificación de la tabla 5. El estudio de cristalización de sales, el cual tiene como objetivo evaluar la resistencia y durabilidad de la piedra al intemperismo, y la resistencia a la presencia de sales, indica que las columnas estudiadas no son resistentes al medio urbano-costero en que se encuentran. Los ciclos de cristalización realizados en laboratorio reflejaron cambios morfológicos en la estructura de la piedra.

TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE HUMEDAD SUPERFICIAL EN LOS ELEMENTOS

NIVEL DE HUMEDAD SUPERFICIAL	RANGO DE VALORES
SEMI SECO	6-8-11
PARCIALMENTE HÚMEDO	12-15
HÚMEDO	16-18-20
SATURADO	≥ 20

Propuestas de solución:

- La limpieza de la piedra se podrá realizar utilizando el método de agua a presión controlada para eliminar las sales y suciedades que se encuentran en la superficie de la piedra.
- Aplicar mortero de rejuntado en las juntas entre bloques ver los de sillares.
- Aplicar un repello de mortero a base de cal como solución de acabado y de protección contra el medio agresivo. Se deberán cumplir las indicaciones dadas en la Norma Cubana de morteros de albañilería (NC 175:2016).
- Pueden ser aplicados sistemas de pinturas a base de silanos u otro tipo de sistemas duplos como protección secundaria. Para ello deberá estudiarse la transpirabilidad y el espesor de acabo final óptimo a fin de no afectar la transpiración de la piedra y de cumplir la función protectora contra el medio agresivo.

3.2.2. Palacio del Segundo Cabo**Fig. 85:** Edificio del Palacio del Segundo Cabo**Fig. 86:** Portal del Palacio del Segundo Cabo

- Datos de la obra: Edificio construido a finales del siglo XVIII, ubicado en O'Reilly No. 4, esquina Tacón en La Habana Vieja. Uno de los máximos exponentes del llamado "Barroco cubano". Es un edificio rectangular, con grado de protección I, su fachada carece casi por completo de decoración, exceptuando los dinteles de las ventanas y los remates sobre el pretil, ambos con sinuosidades barrocas. La planta baja presenta un portal con arcos de medio punto que descansan sobre pilares compuestos por medias columnas circulares adosadas por los laterales y pilastras salientes en la parte central. La planta alta está dividida en sentido horizontal por tres porciones marcadas por pilastras. Las secciones de los extremos tienen dos vanos y la central tres. A cada sección le corresponde un balcón corrido con barandaje de hierro. El centro de la composición del edificio es el patio. Sus reducidas dimensiones y su exagerada verticalidad son atenuadas por otras hábiles disposiciones: el acceso desde el exterior, concebido como una extraordinaria sucesión de tipos de arco —de medio punto, polilobulado, mixtilíneo, rebajado— desde el portal hasta la escalera. Asimismo, la portada principal posee una potente expresividad. Se le retiró, no sin polémica, el repello que cubría su fachada, dejando al descubierto la tosquedad de la piedra conchífera, otorgándole una imagen de solemne monumentalidad.
- Datos del entorno: El edificio se encuentra ubicado en un medio urbano-industrial-costero, a una distancia entre 100 m y 500 m de la franja costera norte, por lo que se clasifica en un medio de agresividad alta, de acuerdo con la Norma Cubana NC 250:2005.
- Descripción organoléptica de las lesiones: En la inspección realizada se comprobó que los elementos estructurales de piedra se encuentran erosionados. Además, se han realizado sustituciones por ladrillo los cuales están expuestos e igualmente erosionados (Figuras 87 y 88). Los muros que se encuentran haciendo frente a la línea de costa, muestran niveles de aleveolización superiores al resto. Las cornisas y columnas se encuentran afectadas por la presencia de pátinas negras de origen biológico, excreta de palomas y costras negras debido a la deposición de partículas carbónicas provenientes de las emisiones vehiculares (Figuras 89 y 90). El empleo de elementos ferrosos

adheridos a la estructura para soportes auxiliares, ha provocado el manchado de la piedra como resultado de corrosión (Figura 91). Se observa pérdida del alero y crecimiento de plantas superiores. Las columnas muestran pérdida de material de rejuntado (Figura 92). En los balcones se aprecia pérdida de material y grietas.

**Fig. 87:** Ladrillo expuesto y erosionado en fachada**Fig. 88:** Columna de ladrillo por el lado del foso del Castillo, afectada por pérdida de recubrimiento**Fig. 89:** Pátina negra bajo la cornisa**Fig. 90:** Columna de fachada, cara interna, con acumulación de costras negras**Fig. 91:** Pátina naranja por corrosión de soportes de hierro adheridos a los muros**Fig. 92:** Ausencia de material en el rejuntado y fractura de la piedra

Alcance del estudio diagnóstico:

- Levantamiento detallado de cada patología presente en las diferentes partes que componen las fachadas estudiadas
- Mediciones de humedad superficial en los elementos de piedra para detectar zonas con exceso de humedad, no visibles a simple vista
- Toma de lectura de la temperatura ambiental y humedad relativa teniendo en cuenta la relación existente entre la humedad de la superficie de los materiales y la de su entorno
- Ensayos de pH
- Ensayo de conductividad
- Ensayo de ultrasonido
- Identificación de fuentes de humedad y determinación de la variación de temperatura, mediante el uso de la termografía
- Identificación de plantas superiores
- Determinación de los criterios en las posibles causas de cada patología presente que provocan el deterioro de los elementos
- Recomendaciones en cada caso para la eliminación de las patologías existentes

Toma de muestras:

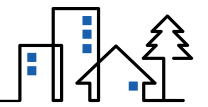
En la tabla 6 se presenta una descripción de las muestras que se tomaron.

TABLA 6: RESULTADOS DE LA TOMA DE MUESTRAS

ZONAS DE EXTRACCIÓN DE MUESTRAS	DESCRIPCIÓN	TIPO DE MUESTRA
FACHADA POR O'REILLY	COLUMNA 1	PIEDRA
FACHADA POR O'REILLY	COLUMNA 4	PIEDRA
FACHADA POR O'REILLY	COLUMNA 8	PIEDRA
FACHADA POR TACÓN	ESQ. A O'REILLY	PIEDRA
FACHADA POR TACÓN	ESQ. A EMPEDRADO	PIEDRA
FACHADA POR EL FONDO	ESQ. A TACÓN	PIEDRA
FACHADA POR EL FONDO	ESQ. AL CASTILLO	PIEDRA

Identificación de las plantas superiores

A partir de la visita realizada al inmueble se identificaron ocho especies de plantas superiores (Tabla 7), de las cuales merecen especial atención las especies de Ficus debido a que son plantas que pueden desarrollar raíces extensas y profundas que rompen y debilitan el substrato de piedra sobre el que crecen. El resto de las plantas identificadas no causan daños significativos, aunque contribuyen a retener localmente la humedad en la piedra, lo que favorece la proliferación de microorganismos y el desarrollo de nuevas plantas.

**TABLA 7: RESUMEN DE PLANTAS SUPERIORES IDENTIFICADAS**

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	LOCALIZACIÓN
PILEA MICROPHYLLA	FRESCURA	BAJO LOS TANQUES DE LA AZOTEA
BOERHAVIA DIFFUSA	MATA PAVO, TOSTÓN	EN LA AZOTEA, ALREDEDOR DEL PRETIL
PTERIS VITTATA	HELECHO	EN EL SÓFITO DE LOS BALCONES
TURNERA ULMIFOLIA	MARILOPE	SÓFITO DE LOS BALCONES Y EN LA UNIÓN DEL BalcÓN CON EL MURO
RHYTIDOPHYLLUM CRENULATUM	BOCA DE LEÓN	SÓFITO DE LOS BALCONES Y EN LA UNIÓN DEL BalcÓN CON EL MURO
FICUS RELIGIOSA	ÁLAMO	EN EL BORDE DE UN BALCÓN DE LA FACHADA PRINCIPAL
FICUS MICROCARPA	JAGÜEY, LAUREL	FACHADA PRINCIPAL CORNISA DE PRETIL, DENTRO DEL EDIFICIO EN MUROS DEL SEGUNDO NIVEL Y EN EL ALERO DE AZOTEA
FICUS TRIGONATA	JAGÜEY	PRETIL DEL PATIO INTERIOR

Determinación de la humedad superficial:

Se realizaron mediciones de humedad superficial en los muros durante 1 mes, dos veces al día entre 9:00 a.m. y 2:00 p.m. De todos los valores obtenidos, se determinó un promedio. A continuación en la figura 93 se muestran 4 tablas con resúmenes de los resultados obtenidos en las diferentes fachadas del Palacio del Segundo Cabo:

FACHADA POR O'REILLY (SUR)

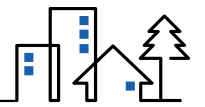
HORA	INCIDENCIA DEL SOL				VIENTO		TEMP. AMBIENTAL	HUMEDAD AMBIENTAL	PROMEDIO DE LA HUMEDAD SUP. DE LA PIEDRA	
	SOLEADO		SOMBRA		MUCHO	POCO			1.00M	1.50M
	M	C	M	C						
9:00-10:00		X					17.5	51.7	22.3	30.89
3:00-4:00				X			27.5	50.9	26.75	21.86
9:00-10:00		X				X	29.1	62.5	29.5	29.16
3:00-4:00				X	X		32.6	58.5	27.54	26.72
9:00-10:00		X				X	35.2	71.7	48.49	47
3:00-4:00		X		X	X		30.4	66.3	59.43	55.78
9:00-10:00	X					X	26.3	83.6	33.69	52.91
9:00-10:00		X				X	34.1	48.3	32.34	39.98
3:00-4:00				X	X		29.3	51.2	35.64	33.4
9:00-10:00				X			28.2	71.4	50.84	43.60
3:00-4:00		X	X			X	27.7	58.6	46.74	46.06
9:00-10:00		X			X		33.2	58.8	50.22	35.52
9:00-10:00		X			X		37.5	60.1	55.48	54.40
3:00-4:00		X		X	MEDIO		33.1	58.1	68.80	62.02
9:00-10:00		X					28.5	68.9	43.08	30.16
3:00-4:00				X	X		31.3	53.6	39.46	34.62
9:00-10:00		X			MEDIO		33.4	72.8	44.65	26.22
VALORES PROMEDIO							30.28	57.37	44.90	39.42

FACHADA POR LATERAL DEL CASTILLO (ESTE)

HORA	INCIDENCIA DEL SOL				VIENTO		TEMP. AMBIENTAL	HUMEDAD AMBIENTAL	PROMEDIO DE LA HUMEDAD SUP. DE LA PIEDRA	
	SOLEADO		SOMBRA		MUCHO	POCO			1.00M	1.50M
	M	C	M	C						
9:00-10:00				X		X	29.3	65.9	80.69	55.28
3:00-4:00		X			X	X	33.0	59.8	74.72	55.1
9:00-10:00				X		X	30.1	60.1	74.51	55.28
3:00-4:00		X				X	32.1	58.4	69.23	54.83
9:00-10:00	X			X		X	29.8	68.3	74.4	55.19
3:00-4:00		X				X	33.2	55.7	54.77	54.29
9:00-10:00				X		X	26.1	90.1	77.34	61
9:00-10:00				X		X	27.5	69.3	69.88	56.23
3:00-4:00		X			X		30.1	58.8	57.83	55.08
9:00-10:00				X		X	28.8	68.9	95.06	56.62
3:00-4:00									97.58	56.35
9:00-10:00				X	X		29.6	63.3	94.68	56.1
3:00-4:00		X			MEDIO		33.2	55.7	85.29	56.1
9:00-10:00				X	X		30	65.8	100	55.99
3:00-4:00							31.6	80.6	55.97	48.03
VALORES PROMEDIO							30.35	65.76	77.46	55.43

FACHADA PORTACÓN (OESTE)

HORA	INCIDENCIA DEL SOL				VIENTO		TEMP. AMBIENTAL	HUMEDAD AMBIENTAL	PROMEDIO DE LA HUMEDAD SUP. DE LA PIEDRA	
	SOLEADO		SOMBRA		MUCHO	POCO			1.00M	1.50M
	M	C	M	C						
9:00-10:00	X					X	25.1	86.3	98.38	52.65
9:00-10:00	X		X			X	31.1	59.5	60.1	44.90
3:00-4:00							30.2	63.5	44.62	24.58
9:00-10:00				X		X	29.1	70.9	81.06	65.63
3:00-4:00		X			X	X	23.1	64.0	96.08	72.86
9:00-10:00				X	X		27.9	53.9	52.05	37.77
3:00-4:00		X			X		33.7	44.4	48.50	24.47
9:00-10:00	X		X	X			27.8	70.2	93.32	73
9:00-10:00	X					X	33.7	67.5	51.8	25.74
3:00-4:00			X			X	27.9	72.3	77	63.96
9:00-10:00	X				X		33.7	65.4	60.78	42.96
3:00-4:00	X						32.6	62	62.51	25.47
9:00-10:00	X				X		33.6	58	66.93	48.59
9:00-10:00				X	X		30.2	58.6	59.96	40.18
3:00-4:00									49.17	28.72
9:00-10:00		X				X	29.3	58.4	91.87	66.81
3:00-4:00				X	X		32.4	62.1	94.81	69.24
9:00-10:00		X				X	32.1	68.4	96.64	75.46
VALORES PROMEDIO							30.20	63.84	71.94	55.07



FACHADA POR FONDO

HORA	INCIDENCIA DEL SOL				VIENTO		TEMP. AMBIENTAL	HUMEDAD AMBIENTAL	PROMEDIO DE LA HUMEDAD SUP. DE LA PIEDRA	
	SOLEADO		SOMBRA		MUCHO	POCO			1.00M	1.50M
	M	C	M	C						
9:00-10:00		X		X	X	X	28.1	53.3	46.37	38.24
3:00-4:00		X		X	X	X	28.8	51.3	38.86	38.47
9:00-10:00		X					34.8	47.9	53.98	43.9
3:00-4:00				X	X	X	28.5	68.6	48.60	42.11
9:00-10:00	X			X	X	X	29.8	67.9	57.52	48.04
3:00-4:00		X					32.7	64.0	60.54	47.57
9:00-10:00		X					28.8	95.3	57.79	49.94
9:00-10:00		X			X		29.9	59.2	75.1	70.02
3:00-4:00		X			X	X	32.3	42.1	67.98	62.06
9:00-10:00				X		X	28.8	79.2	71.92	70.73
3:00-4:00		X			X		28.8	51.3	74.52	63.37
9:00-10:00		X			MEDIO		30.4	60.8	84.82	75.53
3:00-4:00		X							84.5	52.42
9:00-10:00		X			MEDIO		30.2	56.8	63.62	54.78
3:00-4:00		X			MEDIO		32.0	64.0	48.48	36.60
9:00-10:00		X				X	31.6	54.6	53.73	43.98
3:00-4:00					X		28.5	59.3	56.19	47.84
9:00-10:00		X				X	33.8	72.8	73.86	79.62
VALORES PROMEDIO							30.45	61.67	69.78	49.42

Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico:

Se realizaron las lecturas de la velocidad de propagación de ultrasonidos en las columnas de la fachada. La tabla 8 muestra los valores arrojados en los ensayos de ultrasonidos.

TABLA 8: RESULTADOS DEL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

ELEMENTO ENSAYADO	LOCALIZACIÓN	SECCIÓN (CM)	VELOCIDAD (M/SEG)
COLUMNA 1	FACHADA POR O'REILLY	1000 MM	2803,5
			3054,4
			2987,9
COLUMNA 4	FACHADA POR O'REILLY	1000 MM	2023,7
			2354,6
			2032,6
COLUMNA 8	FACHADA POR O'REILLY	1000 MM	2341,3
			2444,8
			2671,5

Conductividad de sales:

La toma de muestras se realizó en los mismos elementos previamente estudiados. Para la ubicación, se seleccionó cuidadosamente teniendo en cuenta la dirección de ubicación de las fachadas y se tomaron muestras a distintas profundidades. La tabla 9 muestra los resultados obtenidos.

TABLA 9: RESULTADO DEL ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD

IDENTIFICACIÓN	LUGAR	PROFUNDIDAD (CM)	CONDUCTIVIDAD (MS/CM)	GRÁFICA
COLUMNA 1	FACHADA POR O'REILLY	0-2	690	
		2-4	680	
		4-6	588	
COLUMNA 4	FACHADA POR O'REILLY	0-2	190	
		2-4	127	
		4-6	7	
COLUMNA 8	FACHADA POR O'REILLY	0-2	558	
		2-4	555	
		4-6	554	
ESQUINA O'REILLY	LATERAL POR EL CASTILLO	0-2	1270	
		2-4	1176	
		4-6	1086	
CENTRO	LATERAL POR EL CASTILLO	0-2	1151	
		2-4	864	
		4-6	618	
ESQUINA O'REILLY	FACHADA POR TACÓN	0-2	600	
		2-4	510	
		4-6	487	
ESQUINA EMPEDRADO	FACHADA POR TACÓN	0-2	1572	
		2-4	1225	
		4-6	1052	
ESQUINA CASTILLO	FONDO	0-2	1082	
		2-4	942	
		4-6	851	
ESQUINA POR TACÓN	FONDO	0-2	592	
		2-4	338	
		4-6	193	

Ensayos de pH:

La evaluación de la alcalinidad de la piedra se realizó del mismo set de muestras tomados para los estudios de conductividad eléctrica. La tabla 10 muestra los resultados en los ensayos de pH.

TABLA 10: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PH

IDENTIFICACIÓN	LUGAR	PROFUNDIDAD (CM)	PH
COLUMNA 1	FACHADA POR O'REILLY	0-2	7,58
		2-4	7,38
		4-6	8,77
COLUMNA 4	FACHADA POR O'REILLY	0-2	8,06
		2-4	8,19
		4-6	7,94
COLUMNA 8	FACHADA POR O'REILLY	0-2	8,11
		2-4	7,78
		4-6	7,85
ESQUINA O'REILLY	LATERAL POR EL CASTILLO	0-2	8,39
		2-4	8,47
		4-6	8,21
CENTRO	LATERAL POR EL CASTILLO	0-2	7,80
		2-4	8,01
		4-6	7,68
ESQUINA O'REILLY	FACHADA POR TACÓN	0-2	7,87
		2-4	8,0
		4-6	7,60
ESQUINA EMPEDRADO	FACHADA POR TACÓN	0-2	8,02
		2-4	7,80
		4-6	8,61
ESQUINA CASTILLO	FONDO	0-2	7,89
		2-4	8,17
		4-6	8,09
ESQUINA POR TACÓN	FONDO	0-2	8,23
		2-4	7,62
		4-6	7,68

Identificación de fuentes de humedad y gradientes de temperatura mediante termografía:

Se realizó el ensayo de termografía en la fachada principal y la correspondiente a la calle Tacón. Los resultados se muestran en las figuras 94, 95, 96, 97, 98 y 99.

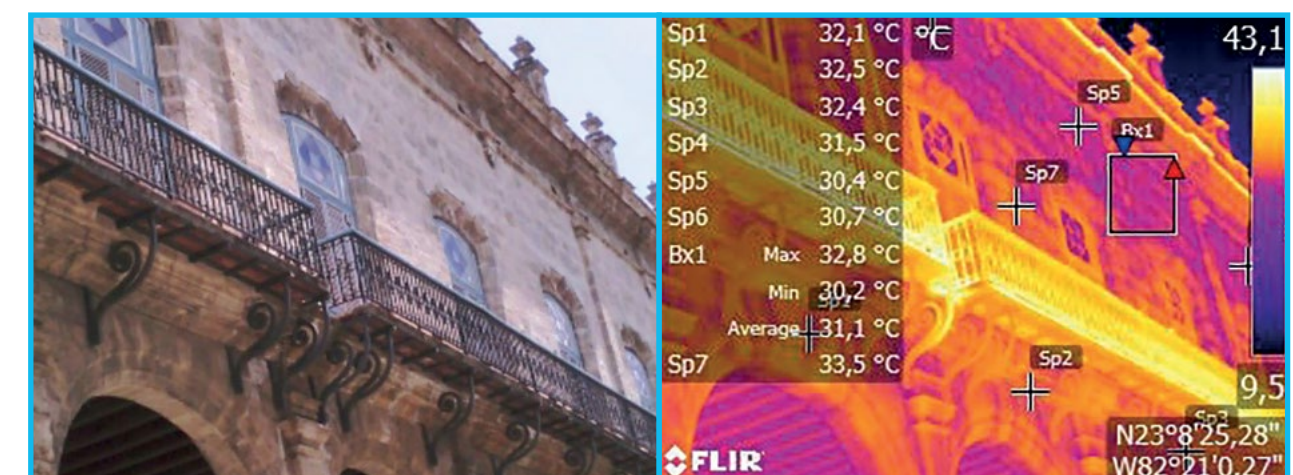


Fig. 94: Primera línea de fachada, planta baja



Fig. 95: Primera línea de fachada, planta baja



Fig. 96: Segunda línea de fachada, entrada principal

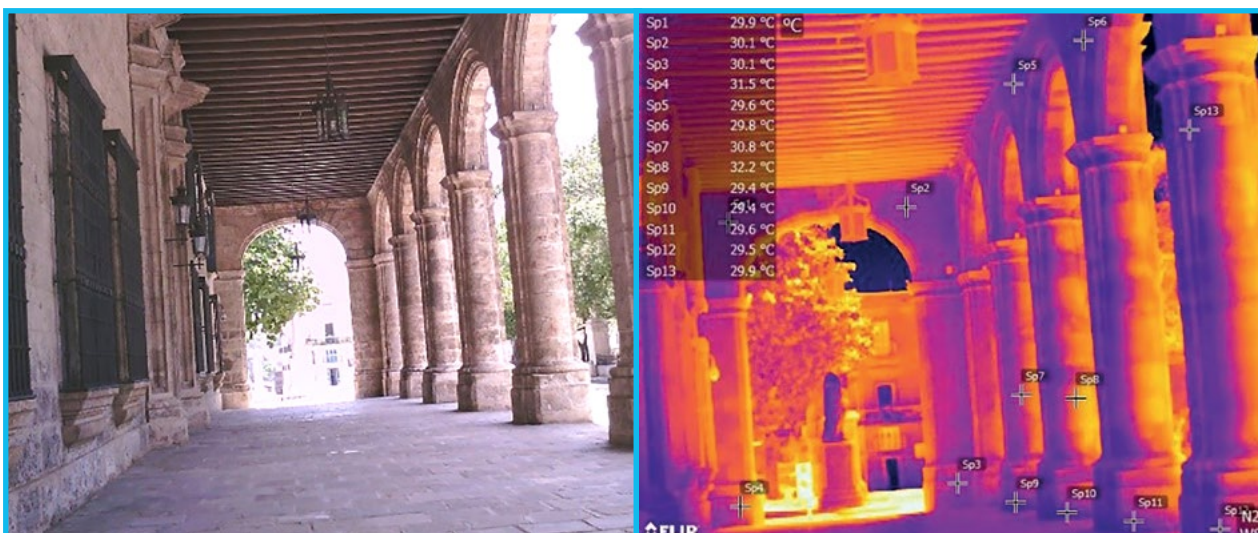


Fig. 97: Conjunto de columnas, portal

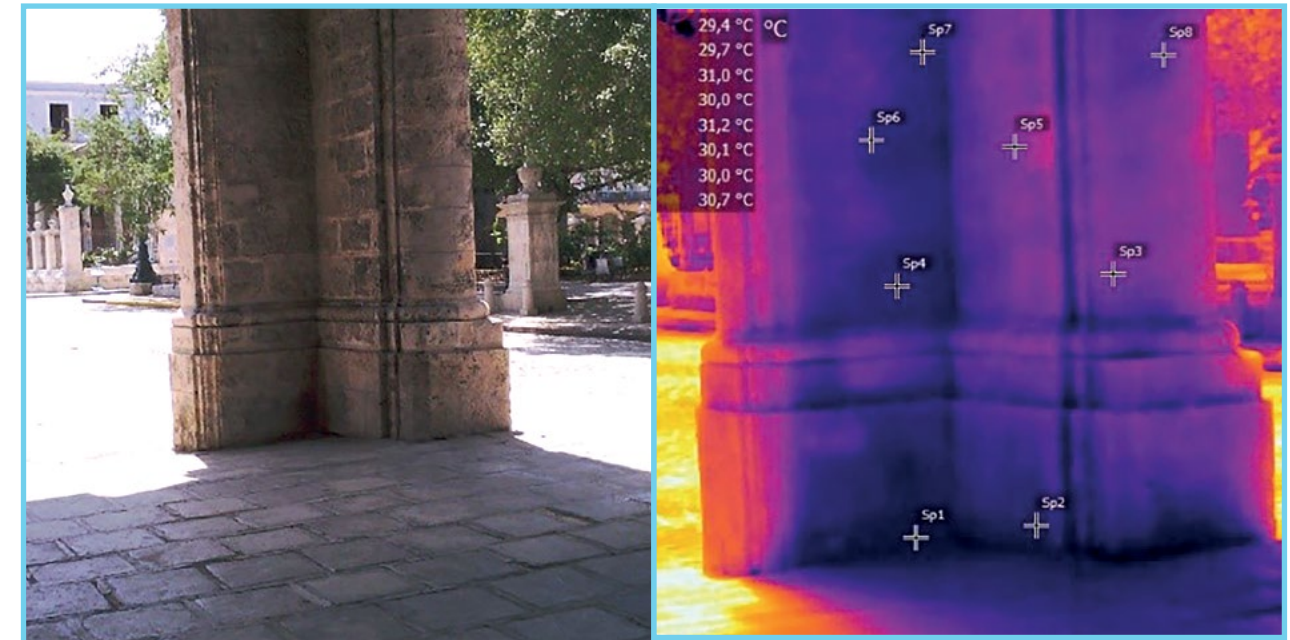


Fig. 98: Columna en la esquina del portal

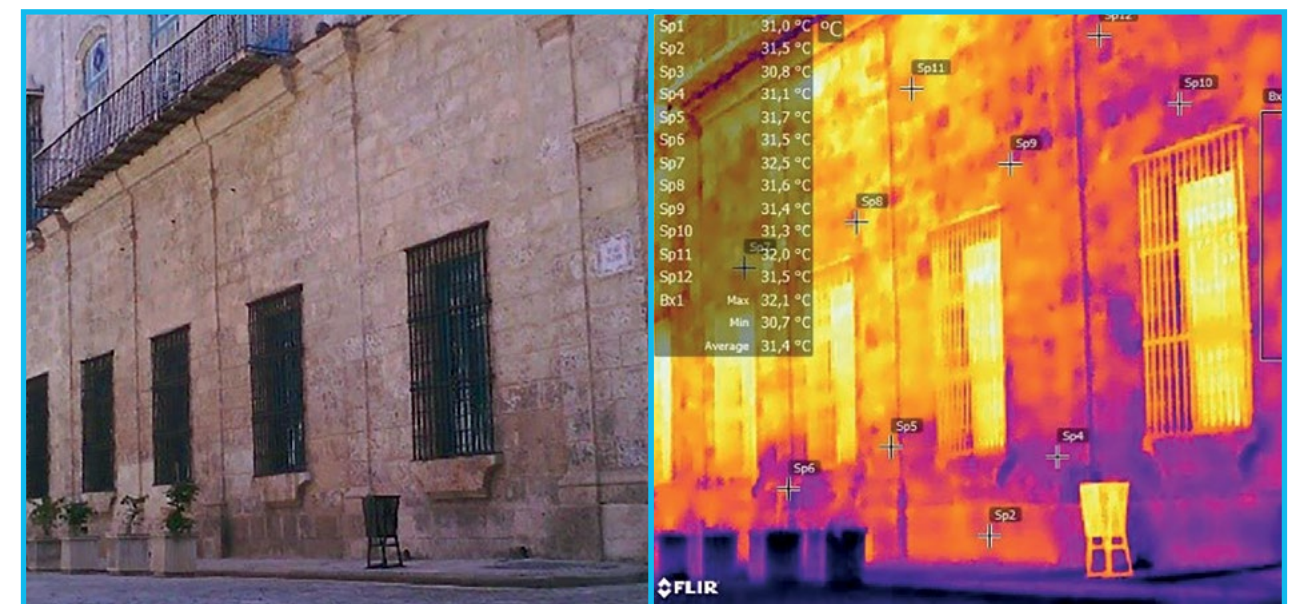


Fig. 99: Fachada por la calle Tacón

Análisis de los resultados:

- Fachada principal y orientación sur-sudeste: Se aprecian deterioros macroscópicos en la piedra, manifestados en forma de alveolos, erosión y pérdida de material. Hay afectación general de la cromacidad natural de la piedra por ennegrecimiento y deposición de costras negras. Esta lesión se extiende en todo el muro hasta la cornisa del primer nivel, la cual actúa como barrera de retención a la deposición de partículas. Como resultado de la corrosión de los elementos ferrosos de fijación de las barandas, ménsulas y otros soportes adosados, se registraron manchas de óxido sobre la piedra.
- Fachada hacia la calle Tacón (oeste): Este muro recibe muy poca incidencia del sol, por lo que su superficie es más húmeda. Se observa una apreciable diferencia de color de la piedra entre el muro de la planta baja con el de la planta alta. Esta diferencia de color viene dada por un ennegrecimiento

de la piedra como consecuencia de la deposición de partículas de hollín y polvo. Al no recibir el impacto directo de la lluvia y el sol, no se logra la limpieza del miso mediante mecanismos naturales, por lo cual se favorece su ensuciamiento.

- Fachada lateral hacia el este del Castillo: Esta fachada muestra lesiones significativas provocadas por el efecto de la humedad en ciclos de humectación y secado. En intervenciones de restauración aplicadas en años anteriores se colocaron ladrillos como sustituto de la piedra dañada, los cuales hoy se muestran severamente erosionados y con desprendimiento del revestimiento producto de las diferencias de capilaridad entre los materiales (ladrillo-piedra). En este muro se aprecian también pátinas negras, manchas de óxido y crecimiento de plantas superiores.
- Los ensayos de conductividad realizados reflejan que el contenido de sales disminuye en la medida que se profundiza en el muro. Esto demuestra que la fuente de contaminación proviene del aerosol marino, debido a la cercanía de la estructura con respecto a la franja costera noreste. Como resultado de esta penetración de sales en la estructura capilar de la piedra, suceden fenómenos cíclicos de cristalización/disolución que conllevan a la fractura del material calcáreo. En el caso de la piedra caliza conchífera este proceso tiene efectos a muy largo plazo (años o siglos), debido a que se trata de un material sumamente poroso y de manera natural, proveniente de un entorno de elevada salinidad.
- En las termografías realizadas se aprecia como en los muros, fundamentalmente en los primeros 50 cm desde el nivel de piso terminado (NPT), se distinguen zonas más frías con respecto al resto del área observada, lo cual puede ser debido al ascenso de agua por capilaridad que proviene de la humedad existente en el suelo.

Propuestas de solución:

- Eliminar manualmente las plantas, fundamentalmente los Ficus que pueden alcanzar gran tamaño y provocar fracturas y desprendimiento en las estructuras de piedra.
- Realizar revisiones periódicas para evitar el crecimiento de nuevas plantas.
- Limpiar periódicamente los excrementos de paloma en la superficie de la piedra, para no afectar la estética, la higiene y el deterioro de la piedra por disolución como resultado de la reacción química ácida con los productos de descomposición de las heces.
- Establecer programas de mantenimiento que definan la periodicidad de la limpieza de las fachadas con agua a presión para eliminar las costras negras y otras deposiciones sobre la superficie. El empleo de detergentes debe ser cuidadosamente estudiado en un área de la piedra antes de su uso en toda la estructura.
- Se deberán consolidar los bloques de piedra a través de mortero pétreo sustitutivo de base cal elaborado *in situ*, y que sea compatible con la piedra, aportando resistencia, densidad y compacidad, para evitar tensiones que produzcan rechazos y fracturas entre los materiales.
- Se eliminará manualmente toda la acumulación de excrementos de animales, polvos, morteros de cementos, plantas parásitas, manchas de óxido, etc., para ello se utilizará bisturí, espátula, estos útiles deben ser adecuados, además de la utilización de aire comprimido, como quitapolvo, que no exceda a más de 3 atmósferas de presión.
- Las grietas y orificios provocados por la eliminación de las plantas se limpiarán de restos de raíces, troncos, hojas, polvos, hollín, y cualquier partícula que no forme parte de la piedra. Posteriormente se rociará la superficie con agua para humedecerlas, y se consolidarán con mortero fresco de cal al que se le añadirá ripios de ladrillo y/o tejas criollas, y finalmente se limpiarán los bordes de las grietas.
- Una vez limpia la superficie se debe consolidar e hidrofugar la piedra con productos silicoorgánicos para aumentar la cohesión de los componentes de la zona superficial alterada, su resistencia mecánica, la cristalización de sales y resistencia a la acción de las aguas. Estos productos de protección mono-componentes no modifican el color y el brillo de la superficie de la piedra, tienen buena penetración y no generan productos secundarios.

En la tabla 11 se muestran algunos de los equipos más utilizados para el estudio de los materiales pétreos, y la información que se obtiene de los ensayos que se realizan con cada uno de ellos.

TABLA 11: EQUIPOS Y UTENSILIOS COMÚNMENTE EMPLEADOS EN EL DIAGNÓSTICO

EQUIPOS Y UTENSILIOS	INFORMACIÓN Y ACTIVIDAD A REALIZAR
<p>TEMO- HIGRÓMETRO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • MEDICIÓN DEL PORCIENTO DE HUMEDAD RELATIVA DEL MEDIO AMBIENTE. • MEDICIÓN DEL PORCIENTO DE HUMEDAD SUPERFICIAL DE LOS ELEMENTOS. • MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL.
<p>CONDUCTÍMETRO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD PARA EVALUAR LA PRESENCIA DE SALES EN LOS MATERIALES PÉTREOS.
<p>MEDIDOR DE ULTRASONIDO</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • PERMITE CONTROLAR LA CALIDAD Y HOMOGENEIDAD DE LOS MATERIALES, ASÍ COMO DETECTAR LA PRESENCIA DE GRIETAS Y OQUEDADES.

EQUIPOS Y UTENSILIOS

INFORMACIÓN Y ACTIVIDAD A REALIZAR

CÁMARA TERMOGRÁFICA



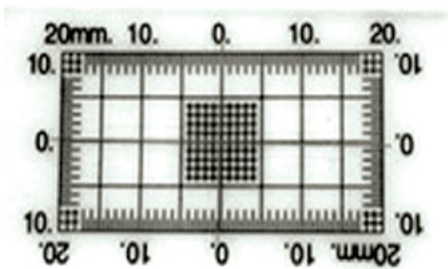
- REGISTRA LAS ZONAS FRÍAS O CALIENTES EN LA SUPERFICIE DE LOS ELEMENTOS. ÚTIL EN LA DETECCIÓN DE FUENTES DE HUMEDAD.

ENDOSCOPIO

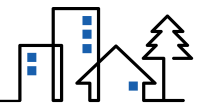


- PERMITE VER EN EL INTERIOR DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE CALAS U ORIFICIOS REALIZADOS PARA ESTE FIN.

FISURÓMETRO



- REGISTRA LA ACTIVIDAD DE LAS GRIETAS EN EL TIEMPO.



Otros ensayos en toma de muestras relacionados con los estudios son:

- Determinación de la porosidad
- Determinación de la absorción
- Determinación del pH
- Cristalización de sales

Posteriormente al resultado de cada uno de los ensayos se emiten las recomendaciones a seguir para la recuperación o restauración de los materiales en estudio, que por su importancia requieren ser conservados.

Todas estas variantes de posibles soluciones a los problemas existentes están avaladas por los resultados obtenidos de los ensayos, cálculos realizados y bibliografías o normas estudiadas relacionadas con los temas en cuestión.

4. BIBLIOGRAFÍA

- ICOMOS-ISCS, (2018). Glosario ilustrado sobre patrones de deterioro de piedras. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios.
- Toraya, J. C., (2001), "500 Años de construcciones en Cuba". D. V. Chavín, Servicios Gráficos y Editoriales, S. L., Madrid, 557 pp.
- Autores varios. Manual de Diagnósis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos. Col·legi d' Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona (s.f.).
- Autores varios. Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. España. 1996.
- Tejera Garófago, Pedro y Lucrecia Pérez Echazabal. Fichas técnicas para la reparación de edificaciones. Proyecto Habana. Publicaciones de la Universidad de Alicante. 1998.
- Pérez Botello, J. Carlos, Taller de Albañilería / Cantería. Escuela Taller de la Habana, Gaspar Melchor de Jovellanos (1993).
- UNE-EN 27888(1993). Determinación de la conductividad eléctrica.
- UNE-EN 83-308-86. Determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos.

CAPÍTULO III ESTRUCTURAS DE ACERO Y HORMIGÓN

AUTORES

ALBERTO HERNÁNDEZ OROZA, RAFAEL GONZÁLEZ HERNÁNDEZ,
PATRICIA BRAÑA NUEZ

1. ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

1.1 INTRODUCCIÓN

Se conoce que el uso del hormigón como material de construcción fue empleado por los romanos hacia el año 600 A.C. El mismo se preparaba a partir de la mezcla de ceniza volcánica, cal y agua de mar. Para el año 1824 el inglés Joseph Aspdin patentó el cemento Portland a partir de la producción de un material basado en caliza y arcilla. Unos años más tarde, en 1850 el francés François Coignet introduce el acero como refuerzo en las estructuras de hormigón, siendo finalmente popularizado su uso por el ingeniero civil alemán G. A. Wayss en 1880.

En Cuba, el uso de hormigones a base de arcilla y piedra datan del año 1620, durante la restauración de una primitiva iglesia por el arquitecto Joaquín Weiss. En el mes de junio del año 1895 se inaugura en La Habana la primera fábrica de cemento Portland que operó en Iberoamérica. En la actualidad, a nivel mundial se producen más de 9000 millones de toneladas anuales de hormigón de cemento Portland, y esto es debido a sus cualidades básicas: versatilidad para construir obras con diferentes formas, economía si se compara con otros materiales como los polímeros, y durabilidad que ha permitido que centenares de edificaciones históricas prevalezcan hasta la actualidad.

El hormigón armado, como relación de acero y hormigón para la construcción de obras de todo tipo, ha sido desde su descubrimiento uno de los materiales más empleados. Desde entonces ha demostrado ser confiable, seguro, así como de elevado desempeño y durabilidad. Sin embargo, ya sean estructuras de hormigón u hormigón armado, con el tiempo sufren de numerosos daños que pueden estar asociados a diversas causas desde pobre elaboración y conformación, hasta errónea selección del lugar de exposición y sus efectos ambientales. El entendimiento de estos aspectos son claves para la obtención de una edificación durable y con mínimos costos de reparación programados en el tiempo.

1.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN DIAGNÓSTICO

El objetivo principal de una investigación de diagnóstico es conocer o identificar el estado de conservación actual de la estructura, el entorno en que se encuentra ubicada y las causas principales que influyen en su deterioro. Aquellos procesos de deterioro que están relacionados con variaciones de temperatura ambiental (T) y humedad relativa ambiental (HR), son de manera general difíciles de estudiar y predecir, debido a que sus efectos muchas veces se contraponen. La mayoría de los factores que causan el deterioro en los hormigones históricos y modernos son muy similares. Ambos se verán afectados por errores de proyecto (diseño, selección de materiales), ejecución deficiente, entornos agresivos, cambios de uso, explotación inadecuada y falta de mantenimiento programado, todo lo cual puede conllevar a la reducción del tiempo de vida de la obra. La presencia de agua en la estructura es la principal causa natural de deterioro en el hormigón y en los refuerzos de acero.

Cuando se trata de comparar lesiones existentes entre hormigones antiguos (edificaciones históricas) y modernos, debe tenerse en cuenta que los años de exposición entre uno y otro conllevan a diferencias en la acumulación de factores y causas de deterioro. En las estructuras antiguas debido a su cercanía con las zonas costeras, como resultados de los primeros asentamientos y paulatino desarrollo urbano, además de la ausencia de normativas técnicas, es común encontrar lesiones causadas por la presencia de sales de cloruro en combinación con acidificación por carbonatación. Pueden identificarse también deterioros por reacciones áridos/álcalis, formación de etringita tardía como resultado de procesos de sulfatación por exposición a elevados niveles de contaminación atmosférica, erosión y eflorescencia (Figura 100). En las obras modernas existen normativas que regularan las condiciones durante la fase de proyecto y ejecución de la obra. Es por esta razón que es importante conocer previo al inicio de la investigación, toda la información histórica y técnica existente de la misma, fundamentalmente los siguientes aspectos:

- Edad de la edificación
- Tipología constructiva
- Tipo de uso y años de explotación
- Análisis de reparaciones anteriores
- Registro de lesiones presentadas con anterioridad y tratamiento de reparación utilizado

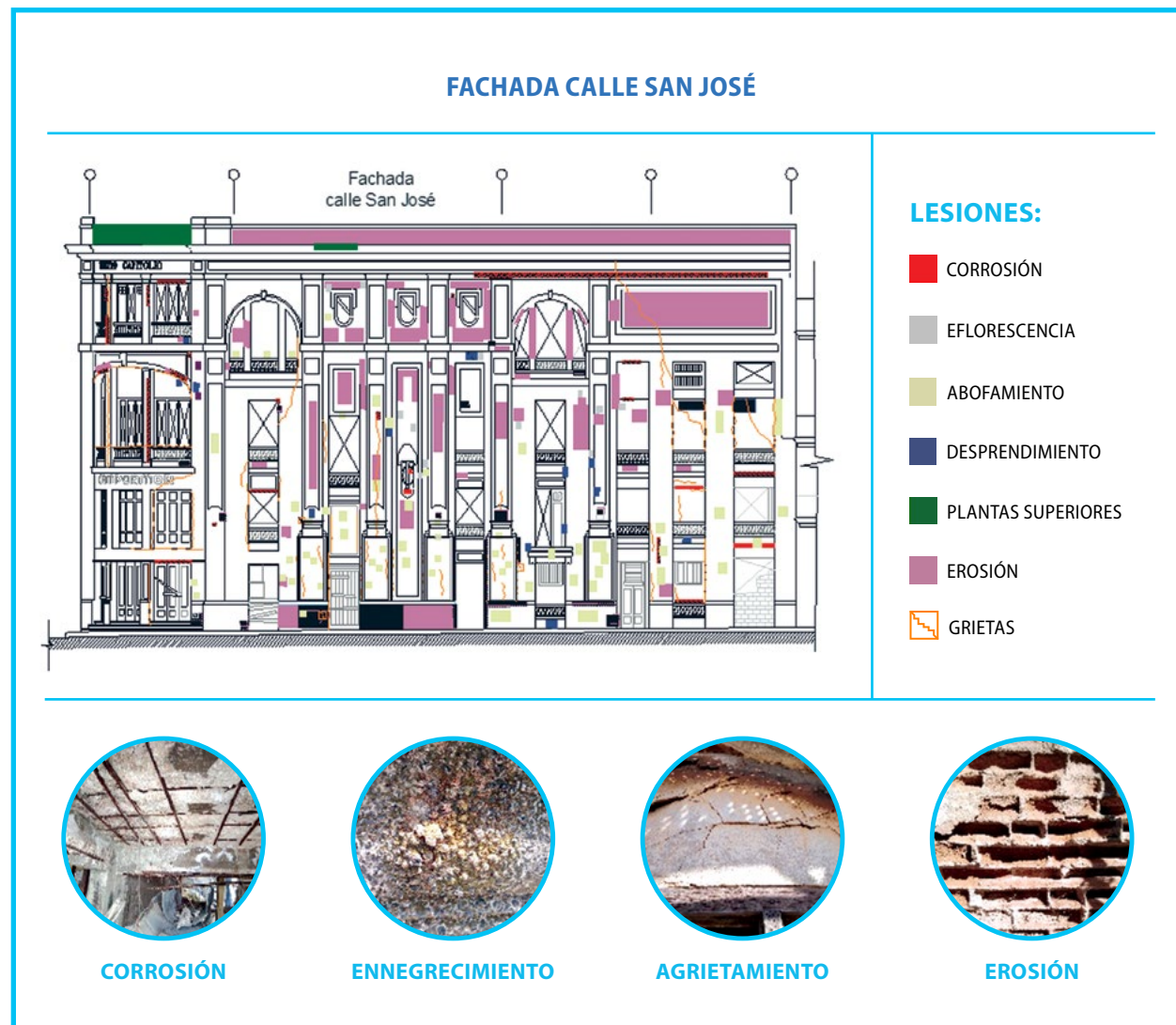
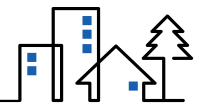


Fig. 100: Combinación de deterioros existentes en la fachada del Teatro Campoamor



Una metodología efectiva para evitar malas interpretaciones es plantearse la investigación en dos etapas generales. La primera basada en inspección organoléptica preliminar y toma de datos específica de todas las lesiones encontradas en la estructura objeto de estudio; y la segunda de tipo experimental, fundamentada en la ejecución de ensayos en función de lo observado, y conclusiones alcanzadas en la primera etapa. Durante todo el proceso de investigación, evaluación, verificación y registro de datos es imperativo seguir una pauta de trabajo que garantice que las etapas queden perfectamente definidas. Para esto debe contarse con toda la documentación necesaria y un esquema de metodología de investigación. En este sentido la norma ISO 16311-2:2014 (Figura 101), propone el siguiente proceso de investigación:

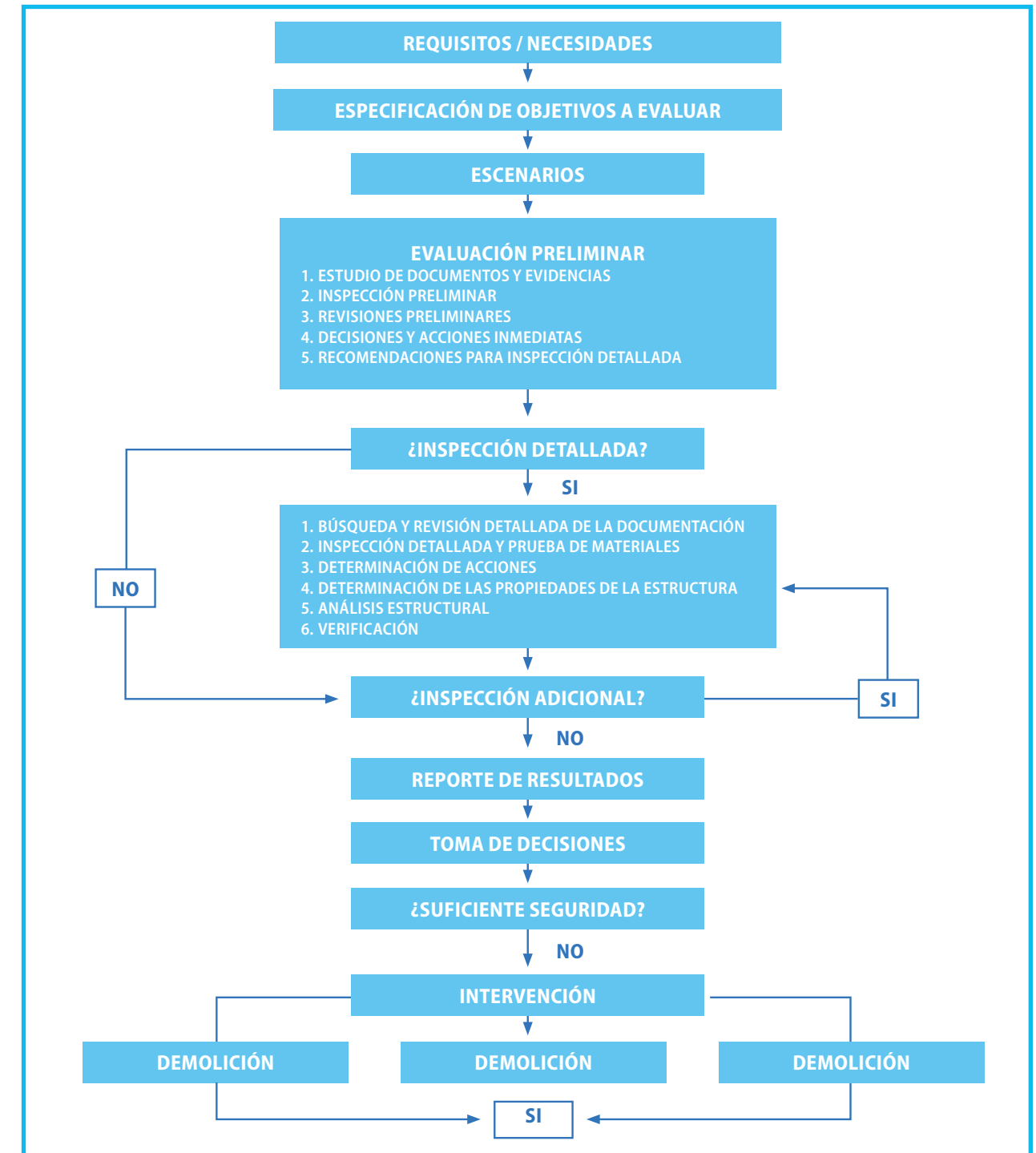


Fig. 101: Flujo general de evaluación, investigación, registro y toma de decisiones para una estructura existente. Fuente: ISO 16311-2:2014(E)

En la inspección preliminar es imperativo que la recopilación de datos indique de la existencia de lesiones por corrosión de los aceros de refuerzo, deterioros por acciones mecánicas, identificación del tipo de ambiente y la agresividad ambiental (cloruros, carbonatación, medio ácido, temperatura, humedad), posibles fuentes y mecanismos de deterioro.

Debido a la complejidad de un proceso de diagnóstico de una obra, generalmente el equipo de trabajo está compuesto por un grupo multidisciplinario que se involucra en la investigación desde su inicio. Los resultados que se vayan obteniendo son paulatinamente concatenados y discutidos hasta definir la causa o posibles causas de los deterioros existentes y su forma de intervención. Para evaluar la magnitud e intensidad de las lesiones, será necesario en la metodología de investigación, definir preferiblemente las técnicas de ensayos no destructivos (END) a aplicar. Si fuera necesario se aplicarán también ensayos destructivos (ED), como extracciones de probetas y perfiles de carbonatación con aplicación de fenolftaleína.

Para estos casos deberá tenerse en cuenta que el elemento estructural intervenido quedará dañado y con acceso a los contaminantes al interior de su masa y a los refuerzos de acero, en caso de poseer. Los agujeros dejados por la extracción de muestras testigos, calas para otros ensayos como carbonatación y pérdida de sección del acero, deben rellenarse con hormigón, morteros autonivelantes o morteros de resistencia compatible con la del hormigón del elemento. El material relleno debe tener retracción compensada con módulo de elasticidad igual o superior al del hormigón original, y tener muy buena adherencia a este.

1.3. TIEMPO DE VIDA DE UNA ESTRUCTURA

Uno de los aspectos más importantes para evaluar el estado de conservación de una estructura y, en consecuencia, las acciones necesarias para su posible recuperación, es la identificación de su etapa en la vida útil de la misma. El primer modelo para identificar este aspecto fue el desarrollado por Tuutti en el año 1982. Este planteaba que toda obra contaba con dos etapas a lo largo de su vida: iniciación y propagación. A partir de este concepto fueron desarrollados otros modelos que conceptualizan nuevas etapas, debido a la necesidad de tomar en consideración aspectos como los materiales, el ambiente, las técnicas constructivas, entre otros.

De igual manera, se profundizó más en el concepto de vida de servicio, el cual relaciona los siguientes aspectos: serviciabilidad, funcionalidad, seguridad, confiabilidad y durabilidad. En base a esto, diferentes normativas han creados sus propias definiciones:

- Norma Cubana NC-120:2014: Periodo de tiempo durante el cual el comportamiento del hormigón en la estructura se mantendrá a un nivel compatible con los requisitos de desempeño de la estructura, siempre que esta sea adecuadamente conservada.
- American Concrete Institute (ACI): Es el periodo de tiempo posterior a la iniciación, en el cual todas las propiedades exceden el valor mínimo aceptable de un mantenimiento rutinario.
- European Community Council: Periodo de tiempo durante el cual el desempeño de los trabajos se mantendrá a un nivel compatible con la totalidad de los requerimientos esenciales.
- Red DURAR: Es el periodo de tiempo en el cual la estructura conserva los requisitos del proyecto en seguridad, funcionalidad y estética sin costos de mantenimiento inesperados.

Aunque todos los conceptos son muy similares, es importante reflejar esta información en gráficas que expresen cada una de las etapas. En el modelo presentado por Helene (Figura 102), la vida de servicio se divide en cuatro categorías específicas que muestran paulatinamente el estado de degradación de la estructura hasta alcanzar su vida útil última o total.

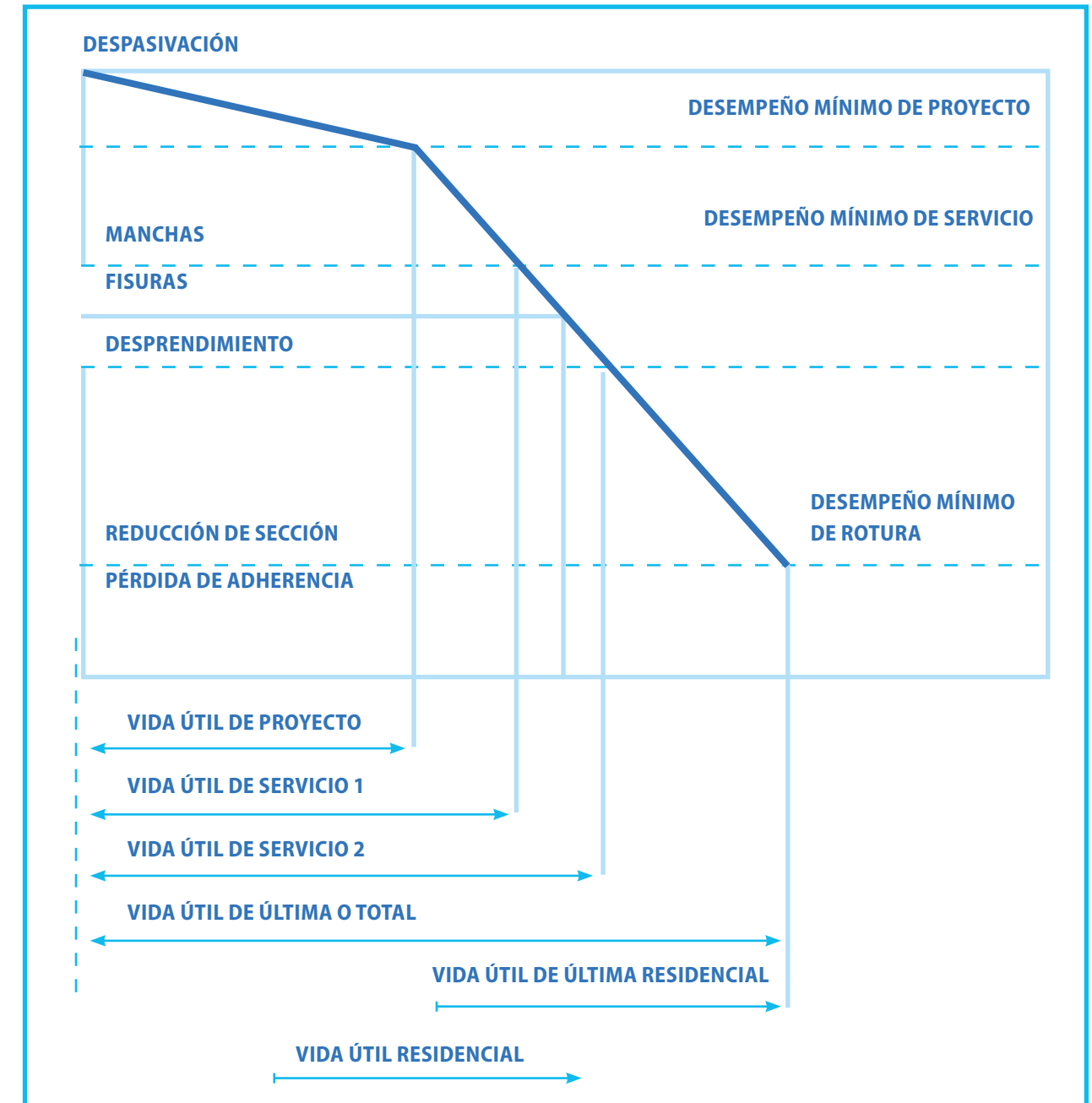


Fig. 102: Modelo de vida de servicio propuesto por Helene, 2014

Las cuatro etapas se definen de la siguiente manera:

- Vida útil de proyecto: Se caracteriza porque comienzan a aparecer en la estructura los primeros síntomas de corrosión del acero de refuerzo: fisuraciones, manchas superficiales de óxido, etc. Este es el momento idóneo para hacer las intervenciones necesarias que permitan alargar la vida útil de la estructura.
- Vida útil de servicio: Se caracteriza porque la estructura ha perdido sus condiciones de servicio, o sea comienza a desprenderse la capa de recubrimiento del acero y esto puede provocar accidentes en las personas.
- Vida útil última: Se caracteriza porque debido a la corrosión, el acero de refuerzo ha perdido sección suficiente para provocar en cualquier momento el colapso de la estructura.
- Vida útil residual: Es el tiempo en que la estructura se mantiene sin colapsar aún después de haber vencido su plazo de vida útil última.

Una propuesta más reciente es plantear la vida de servicio por etapas, en la cual a lo largo de siete pasos se identifican cada uno de los aspectos relacionados con la durabilidad de la obra, desde su etapa de planificación del proyecto hasta el inicio del colapso (Figura 103).

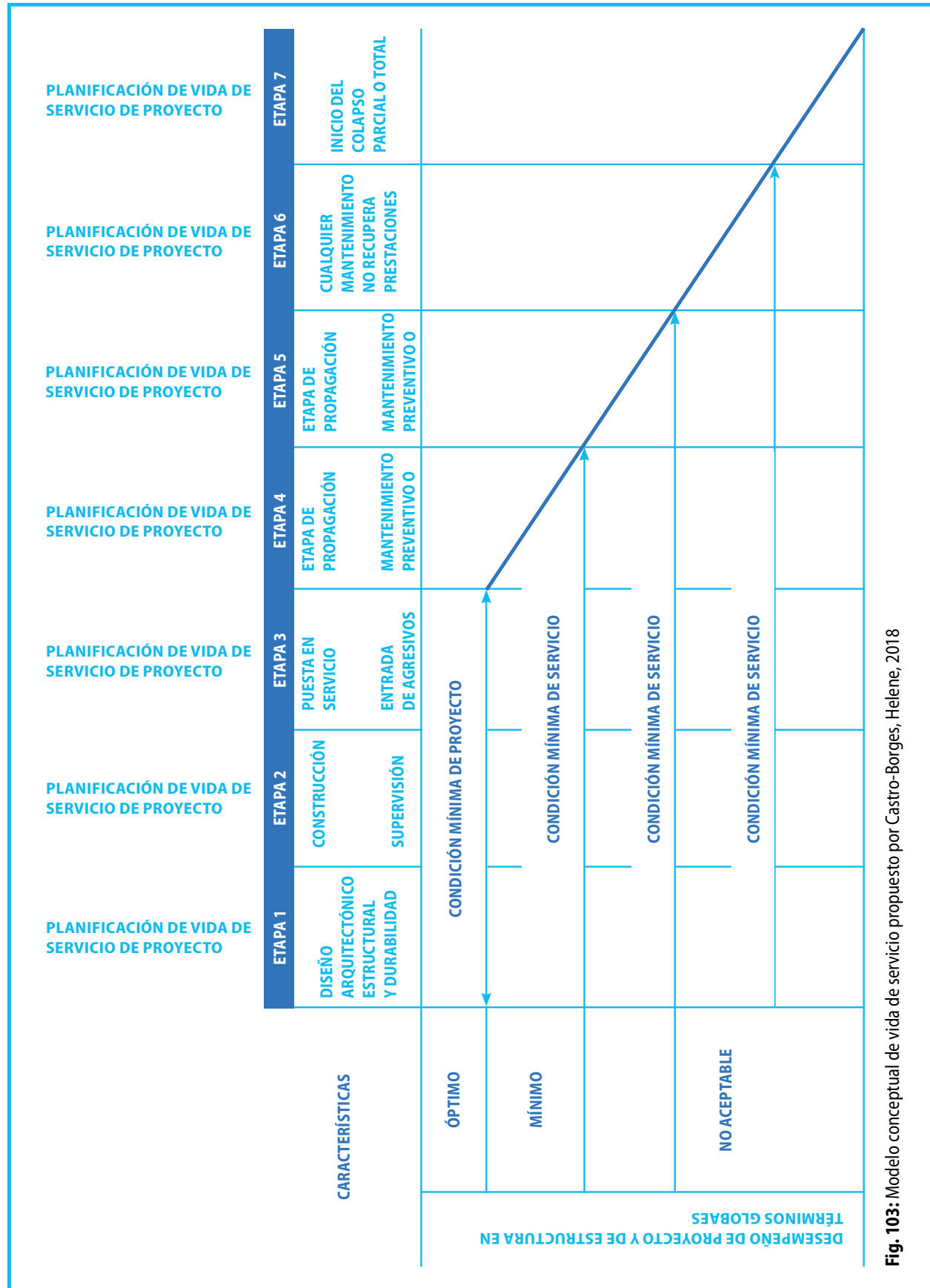


Fig. 103: Modelo conceptual de vida de servicio propuesto por Castro-Borges, Helene, 2018



Para esta propuesta, las etapas quedan definidas de la siguiente manera:

- Planificación de vida de servicio de proyecto: Esta es la etapa en la que la vida total de la estructura se define en la primera fase del proyecto de ideas conceptuales.
- Preparación para la vida de servicio: Una vez definida la vida total deseada para la estructura, esta etapa define entonces las especificaciones por proyecto necesarias para alcanzar esa vida de servicio.
- Inicio de la vida de servicio: Se define como el momento en que la obra queda culminada y se inicia su explotación.
- Vida de servicio: Se define como la etapa en la que la obra puede necesitar o no acciones de mantenimiento preventivo para evitar daños mayores. Es el periodo en cual los agentes agresivos dan inicio a las lesiones que afectan la durabilidad.
- Vida de servicio residual: Etapa en el cual la estructura puede continuar explotándose, pero ya son apreciables los daños y se requieren de mantenimientos correctivos programados.
- Vida residual: Está definida como la etapa en la que se requieren inspecciones técnicas para identificar posibles zonas con riesgo de derrumbe, emergencias de evacuación, apuntalamientos y desmontes de elementos estructurales.
- Fin de la vida residual: Etapa en la que ocurren colapsos parciales o totales.

1.4. CAUSAS COMUNES DE DETERIORO EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

1.4.1. Incorrecta ejecución

Los efectos de una mala ejecución generalmente están relacionados con falta de conocimiento tecnológico y el empleo de mano de obra sin experiencia de trabajo con el hormigón (Figura 104). Las deficiencias más comunes se deben a inadecuadas relaciones de mezcla, diseño, ejecución del encofrado, colocación de las armaduras ya sea planas o volumétricas, vertido, compactación, curado y deficiente control en la temperatura de fraguado.

Como consecuencia de malas ejecuciones, el material resultante es más poroso, menos compacto y homogéneo, lo cual incide en el tiempo de vida útil de la estructura. Una vez que aparecen lesiones como fisuras, grietas y pérdida de recubrimientos, se favorece el ingreso de agua y contaminantes atmosféricos al interior de la estructura, lo que promueve la corrosión de los aceros de refuerzo, la carbonatación, el ingreso de sales, entre otros procesos patológicos.

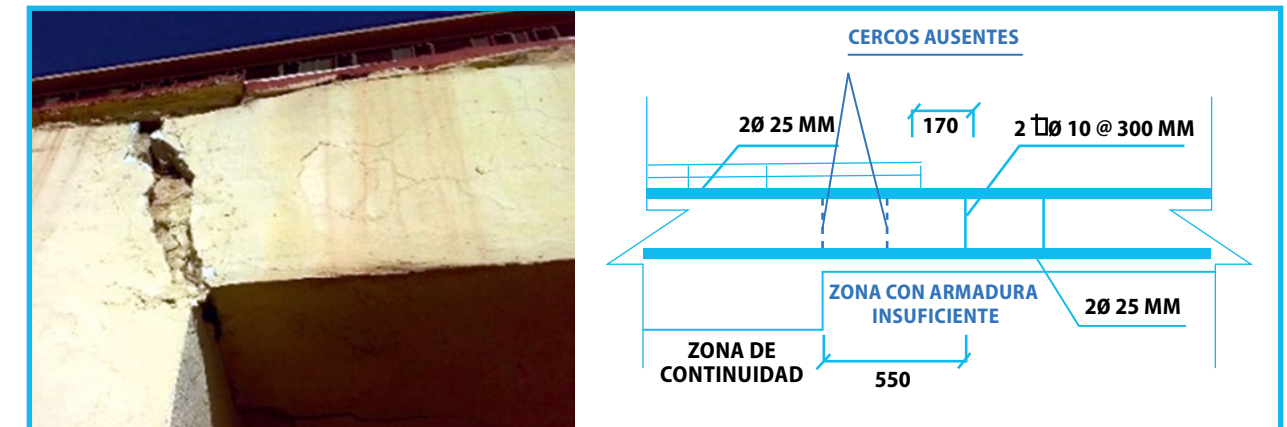


Fig. 103: Grieta en zona de empotramiento de la viga de fachada principal del edificio Sierra Maestra, producida por ausencia de cercos y juntas de expansión. Sede de la Corporación CIMEX S. A.

Adicionalmente, existen otras acciones que pueden provocar fisuras y grietas en el hormigón, las cuales pueden provenir de diversos orígenes. Entre estos se encuentran las acciones de funcionalidad, ambientales, intrínsecas a la naturaleza del hormigón y las acciones inducidas o impuestas.

En edificaciones patrimoniales, los defectos asociados a errores de ejecución deben ser mantenidos y considerados como parte de las características históricas del inmueble. Solo en caso que estos errores representen un riesgo para la estabilidad de la edificación, es que deben ser intervenidas y eliminadas por una solución estructural más confiable y duradera.

1.4.2. Calidad de los agregados

Los áridos tienen una influencia directa en las propiedades de la mezcla y del hormigón endurecido. La selección de los áridos en el diseño de mezcla es un factor primordial en el cual se deben considerar las características siguientes:

- Geometría
- Durabilidad
- Porosidad
- Resistencia a la abrasión y desgaste
- Peso volumétrico
- Vacíos
- Capacidad de absorción y contenido de humedad

La calidad y el tipo de agregado empleado tienen una mayor influencia en la calidad y propiedades de la mezcla de hormigón. Las dimensiones y geometría del árido añadido a la mezcla de cemento hidratado pueden conllevar a dificultades en la laborabilidad del hormigón y afectar la relación de mezcla, debido a que para mantener la relación agua/cemento constante, se hace necesario adicionar mayor cantidad de cemento. Áridos porosos y de baja resistencia incrementan el contenido de agua retenida en la mezcla, lo cual puede resultar en agrietamientos y debilitamiento del elemento estructural.

Otro factor importante es evitar el empleo de áridos reactivos capaces de producir reacciones con los álcalis del cemento. Con la influencia de la humedad y el tiempo de exposición, se producen fisuraciones que facilitan la penetración de los contaminantes atmosféricos al interior del material, lo que acelera la corrosión de los aceros de refuerzos.

En edificaciones patrimoniales es importante tener en cuenta la procedencia y naturaleza de los agregados empleados. Puesto que muchos de los materiales eran tomados de canteras cercanas a la zona de construcción y preparados *in situ* sin las dimensiones y propiedades mecánicas adecuadas para su empleo, es posible encontrar diversos tipos de áridos con diferentes formas geométricas en un mismo elemento estructural. Como parte de la memoria histórica constructiva del inmueble, se deben preservar este tipo de soluciones siempre que no conlleven un daño en la estabilidad de la estructura.

1.4.3. Cambios de volumen en el hormigón

El volumen del hormigón comienza a cambiar un tiempo breve después de ser vertido e iniciar su fraguado. Los cambios producidos en las primeras 24 horas influyen en las tensiones internas y la fisuración del hormigón al endurecer (Figura 105). Varias formas de cambios de volumen pueden suceder en el hormigón:

- Contracción química: Ocurre debido a la reducción del volumen absoluto de sólidos y líquidos en la pasta hidratada y continúa su acción mientras dura la hidratación del cemento. En una etapa inicial la pasta es capaz de resistir las deformaciones debido a su estado semi-plástico, pero posteriormente se producen vacíos adicionales en la microestructura de la pasta de cemento.
- Contracción autógena: Es un cambio dimensional en la pasta de cemento provocado por una contracción química. Cuando el contenido de humedad en el interior de la mezcla se reduce hasta ciertos límites, se produce una autodesecación de la pasta de cemento y en consecuencia sucede una reducción uniforme de volumen.
- Fluencia lenta: Es la deformación que sufre el hormigón a través del tiempo bajo cargas sostenidas. Esta deformación es debido a que en los microporos del gel queda retenida agua no combinada químicamente, y que, por efecto de las cargas es empujada hacia los conductos capilares, donde se evapora, dando lugar a una disminución del volumen. Este fenómeno es conocido como Efecto Picket.

- Hinchamiento: Sucede en la pasta de cemento cuando se sella o se encuentra en presencia de una fuente de agua externa. El fenómeno es causado por una presión en los poros que se acentúa debido a la formación de productos de hidratación expansivos.
- Expansión térmica: Sucede a medida que el cemento se hidrata por incremento del calor de reacción.

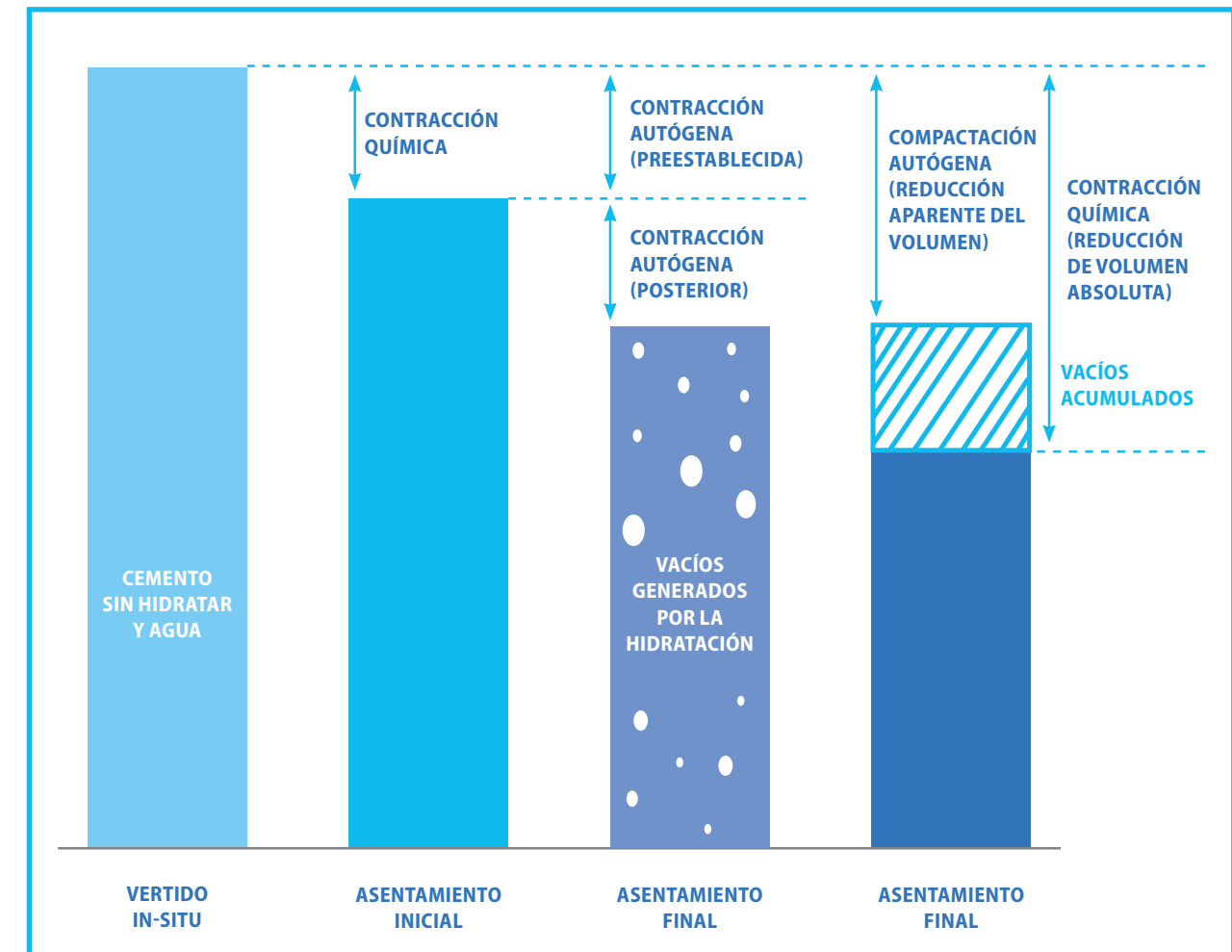


Fig. 105: Esquema de cambio de volumen del hormigón desde la preparación de la mezcla hasta su asentamiento final

1.4.4. Corrosión del acero de refuerzo

La corrosión es un fenómeno que, en las estructuras de hormigón armado, se caracteriza por ser de naturaleza electroquímica. Se manifiesta deteriorando los materiales ferrosos embebidos en la masa de hormigón, como los aceros de refuerzo, debido a la reacción con el medio que lo rodea (Figuras 106 y 107). Diferentes factores pueden desencadenar el proceso corrosivo: la acidificación del hormigón como resultado de la reacción con el dióxido de carbono (CO_2) del aire, el ingreso de sales de cloruro, compuestos ácidos como los de azufre (SO_x), nitrógeno (NO_x) y ozono (O_3) troposférico fundamentalmente. Los mecanismos de deposición de los contaminantes son mediante vía húmeda (lluvia, elevada HR, neblina, aerosol), o vía seca (polvo, sal, hollín), siendo la primera de estas formas la más invasiva. Al deteriorarse el material cementicio y establecerse los mecanismos de transporte para el acceso de los contaminantes hasta la ubicación de los aceros, se inicia el fenómeno de la corrosión con la consiguiente pérdida de material (cementante y ferroso), como de estabilidad estructural y de vida de servicio de la obra afectada.



Fig. 106: Ladrillo expuesto y erosionado en fachada



Fig. 107: Columna de ladrillo por el lado del foso del Castillo, afectada por pérdida de recubrimiento

1.5. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

1.5.1. Carbonatación

El efecto del dióxido de carbono (CO₂) en la durabilidad de las estructuras viene dado por su capacidad de reaccionar con ciertos componentes del cemento Portland. Durante la preparación del hormigón, al ocurrir la reacción de hidratación de los álcalis del cemento con el agua, la mezcla alcanza valores de pH superiores a 12.5. Esta elevada alcalinidad provee al acero de refuerzo de una capa pasiva que lo protege de la corrosión.

La presencia de CO₂ atmosférico en elevadas concentraciones (superiores al 0.035 %), en hormigones porosos, envejecidos y parcialmente húmedos (Figura 108), causa un proceso de degradación en las estructuras conocido como carbonatación. Esto ocurre en la pasta de cemento como resultado de la reacción química de los álcalis de calcio, sodio y potasio [Ca(OH)₂, KOH, NaOH] con este gas. El proceso tiene lugar en la solución de los poros de gel del hormigón, una vez que el CO₂ logra infiltrarse a través de los poros capilares.

La carbonatación es un tipo de deterioro que tiene la facultad de ocurrir en cualquier ambiente, aunque se favorece en entornos urbanos e industriales, con altas temperaturas ambientales y HR entre 50-75 %. Como resultado se obtiene la formación de carbonato de calcio (CaCO₃) y la consiguiente acidificación del hormigón (pH<9) debido a la reducción de álcalis en el cemento. Como consecuencia de esta acidificación se produce la despasivación de las barras de refuerzo y se favorece el inicio de la corrosión generalizada del acero (Figuras 109 y 110).

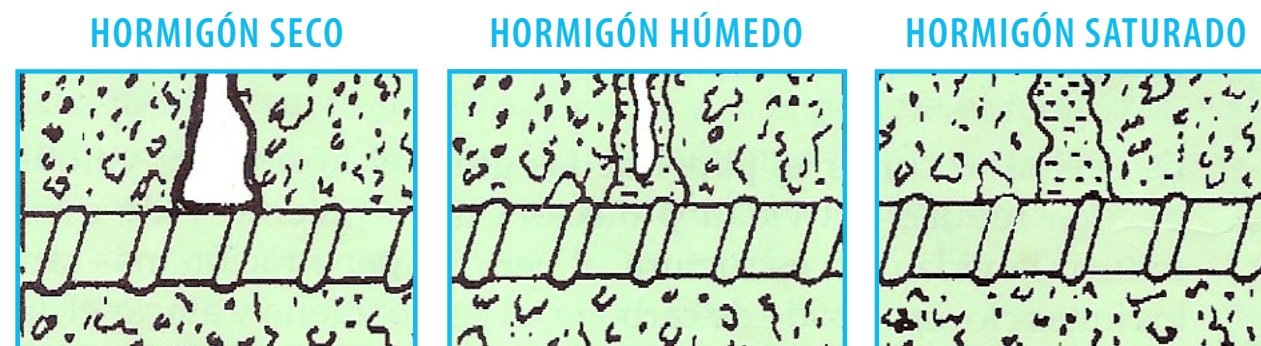


Fig. 108: Condiciones de humedad en el interior de los poros del hormigón



Fig. 109: Acero corroído por los efectos del avance del frente de carbonatación. Viga de hormigón armado. Convento de Santa Clara de Asís



Fig. 109: Pérdida del recubrimiento y aceros de refuerzo expuestos por corrosión en el sistema de vigueta y bovedilla. Casa de la Asociación de Combatientes

Para los efectos de la carbonatación sobre las estructuras de hormigón armado, la Norma Española UNE-EN 206 establece las siguientes denominaciones (Tabla 12):

TABLA 12: CLASES DE EXPOSICIÓN. TOMADO DE LA NORMA UNE-EN 206:2013+A1

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN DEL AMBIENTE	EJEMPLOS
PARA CORROSIÓN INDUCIDA POR CARBONATACIÓN, CUANDO EL HORMIGÓN ARMADO ESTÁ EXPUESTO A AMBIENTES HÚMEDOS, LA EXPOSICIÓN DEBE SER CLASIFICADA DE LA SIGUIENTE FORMA:		
XC1	SECO O PERMANENTEMENTE HÚMEDO	HORMIGÓN ARMADO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS CON HUMEDAD RELATIVA BAJA. HORMIGÓN PERMANENTEMENTE SUMERGIDO.
XC2	HÚMEDO, RARAMENTE SECO	SUPERFICIES DE HORMIGÓN SOMETIDAS A CONTACTO CON EL AGUA DURANTE LARGOS PERIODOS. CIMENTACIONES.
XC3	HUMEDAD MODERADA	HORMIGÓN ARMADO EN EL INTERIOR DE EDIFICIOS CON HUMEDAD RELATIVA MODERADA. HORMIGÓN EN EXTERIORES PROTEGIDOS DE LA LLUVIA.
XC4	HUMEDAD MODERADA	SUPERFICIE DE HORMIGÓN EN CONTACTO CON AGUA.

Esta clasificación tiene influencia sobre el tipo de corrosión más probable presente en los refuerzos de acero de los elementos constructivos, sirviendo como base para la estimación teórica de las velocidades de corrosión, a través de los siguientes resultados mostrados en la tabla 13:

TABLA 13: RANGO DE VALORES DE INTENSIDAD DE CORROSIÓN TEÓRICOS PARA LAS CLASES DE EXPOSICIÓN DICTADAS POR UNE-EN 206:2013+A1

CLASES DE EXPOSICIÓN		ICORR (MA/CM2)	
0	SIN RIESGO DE CORROSIÓN	≤0.01	
TIPO DE CARBONATACIÓN		PARCIALMENTE CARBONATADA	TOTALMENTE CARBONATADA
C1	SECO	≤0.01	~0.01
C2	HÚMEDO, RARAMENTE SECO	0.1 - 0.5	0.2 - 0.5
C3	HUMEDAD MODERADA	0.05 - 0.1	0.1 - 0.2
C4	CICLOS HUMEDAD-SECADO	0.01 - 0.2	0.2 - 0.5

1.5.2. Lixiviación y eflorescencia

Estos fenómenos son el resultado de un proceso químico debido a la reacción cíclica de las aguas blandas (ej. lluvia) con los álcalis del cemento (hidróxidos de calcio y sodio). Durante una prolongada exposición a ambientes de elevada humedad relativa, o ciclos de humectación y secado sistemáticos, el agua líquida, con menor carga iónica, comienza a percolar a través de los poros capilares del hormigón. A medida que transita por la masa del material, lixivia todas las sales solubles de calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+), hasta alcanzar la cara expuesta del elemento estructural. Este proceso de deterioro químico conduce paulatinamente a la pérdida de la protección primaria del cemento, disminuye el pH del medio, incrementa la porosidad y la permeabilidad, y en consecuencia se propicia el ingreso de los contaminantes atmosféricos hacia interior de la masa de hormigón. Una vez que el acero de refuerzo queda desprotegido del medio alcalino y con suficiente humectación, está en total condición electroquímica para dar inicio al fenómeno de la corrosión atmosférica (Figuras 111 y 112).



Fig. 111: Combinación de fenómenos de lixiviación, eflorescencia y agrietamiento longitudinal por corrosión de los aceros de refuerzo, en viga de hormigón armado. Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, Edificio Santo Domingo



Fig. 112: Afectación general en losa de hormigón armado por infiltración de agua pluvial. Almacenes San José

Una vez que los álcalis del cemento son lixiviados hacia el exterior, reaccionan con el CO_2 del aire y se transforman a carbonatos de calcio, sodio y potasio (CaCO_3), (NaCO_3) y (KCO_3). El resultado se refleja a partir de la aparición de costras blanquecinas (eflorescencia) en la superficie del elemento estructural, sin provocar desprendimiento de capas. Aunque el fenómeno es considerado más por su efecto estético que estructural, la reacción conlleva a pérdidas de propiedades del material debido al incremento de la porosidad y permeabilidad como consecuencia de la disminución del contenido de álcalis en su composición química.

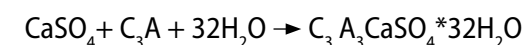
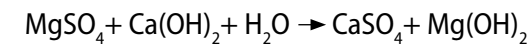
1.5.3. Influencia de los compuestos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x)

Los gases de SO_2 son considerados sumamente dañinos a las edificaciones. Su presencia en la atmósfera se debe fundamentalmente a actividades como la refinación de combustible, la generación eléctrica y las emisiones generadas por los motores de combustión, como son los vehículos automotores. La T y la HR ejercen una gran influencia en los mecanismos de deposición en la superficie de las estructuras, los cuales pueden ocurrir indistintamente mediante vía húmeda y seca.

La deposición húmeda se manifiesta de manera repentina e intermitente, debido a que depende de la transferencia del gas a través de las partículas de agua como los aerosoles, la niebla y la lluvia. La deposición seca se caracteriza por ser lenta pero continua, debido a que está en función de los mecanismos de transporte de las partículas y la presencia de otros contaminantes en la atmósfera.

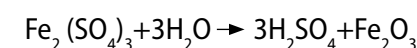
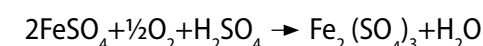
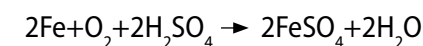
Tanto la deposición seca como la húmeda son capaces de producir daños en los materiales de construcción. Entre los más vulnerables se encuentran los mármoles, las calizas y los hormigones, en los cuales la deposición de SO_2 atmosférico es capaz de propiciar la formación de cristales expansivos de yeso (MgSO_4) producto de su reacción con los componentes químicos del cemento. Para las calizas y los morteros, la deposición de estos compuestos suele ser muy reactiva en la micro-estructura del material debido a la elevada porosidad.

En el caso de los hormigones, la presencia del anión sulfato (SO_4^{2-}) conduce a otro tipo de mecanismo de degradación. La reacción química conlleva a la descomposición de los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), los $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los aluminatos tricálcicos (C_3A) del cemento. La reacción sucede de la siguiente manera:



Otro mecanismo de deterioro producido por los gases de azufre es a través de su transformación a ácido sulfúrico (H_2SO_4), producto de la reacción con los radicales oxidrilos (OH^-) propiciados por la HR. El ácido sulfúrico (H_2SO_4) se forma en fase acuosa mediante la absorción del dióxido de azufre (SO_2) presente en las partículas de agua en el aire. El aerosol formado y los gases de SO_2 generan una nube que propicia las lluvias ácidas. La velocidad total de deterioro de los materiales dependerá simultáneamente de la acidez y el tiempo de exposición a la lluvia, como de la reacción de la deposición seca en la superficie de la edificación.

En adición a la acción de los ácidos sobre el hormigón, ocurre también reacción química entre SO_4^{2-} y el acero de refuerzo. En la cinética de esta reacción, el ataque corrosivo sobre el elemento metálico ocurre sin consumirse el anión durante el proceso:



En relación a los gases NO_x , estos se definen por la suma del monóxido de nitrógeno (NO) con el dióxido de nitrógeno (NO_2). Las fuentes de emisiones principales son los motores de combustión. El efecto degradante de los gases NO_x viene dado por su capacidad de reaccionar con las partículas de agua presentes en el aire y oxidarse a su forma ácida (ácido nitroso (HNO_2) o ácido nítrico (HNO_3)). La deposición sobre la superficie de los materiales puede ocurrir igualmente por mecanismos de vía húmeda o seca, como sucede con los SO_x .

1.5.4. Corrosión atmosférica por influencia del aerosol marino

El impacto de la salinidad atmosférica en las edificaciones ubicadas en las zonas costeras, es considerado uno de los aspectos más críticos en el tiempo de vida y la durabilidad de la obra construida. Su efecto negativo no solo influye en las estructuras de hormigón armado, sino también en las obras de fábrica en las cuales provoca el desprendimiento, alveolización, socavamiento, sub-eflorescencia y erosión mediante mecanismos cíclicos de cristalización y disolución de las sales, que generan tensiones capaces de desprender el material calcáreo.

Por su parte, en las estructuras de hormigón armado, la presencia de los aniones de cloruro (Cl^-) en el aerosol marino, una vez que alcanzan los refuerzos de acero, son capaces de desencadenar la corrosión localizada. Los productos de corrosión formados en diferentes composiciones químicas de hidróxidos de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$), se expanden hasta al alcanzar un volumen muy superior al del metal original (Figura 113), y generan amplias zonas de desprendimiento del recubrimiento de hormigón por acción de empuje mecánico (Figuras 114 y 115). En la cinética de este proceso corrosivo, los iones de cloruro no se consumen durante la reacción, sino que adicionalmente actúan como catalizadores del fenómeno.

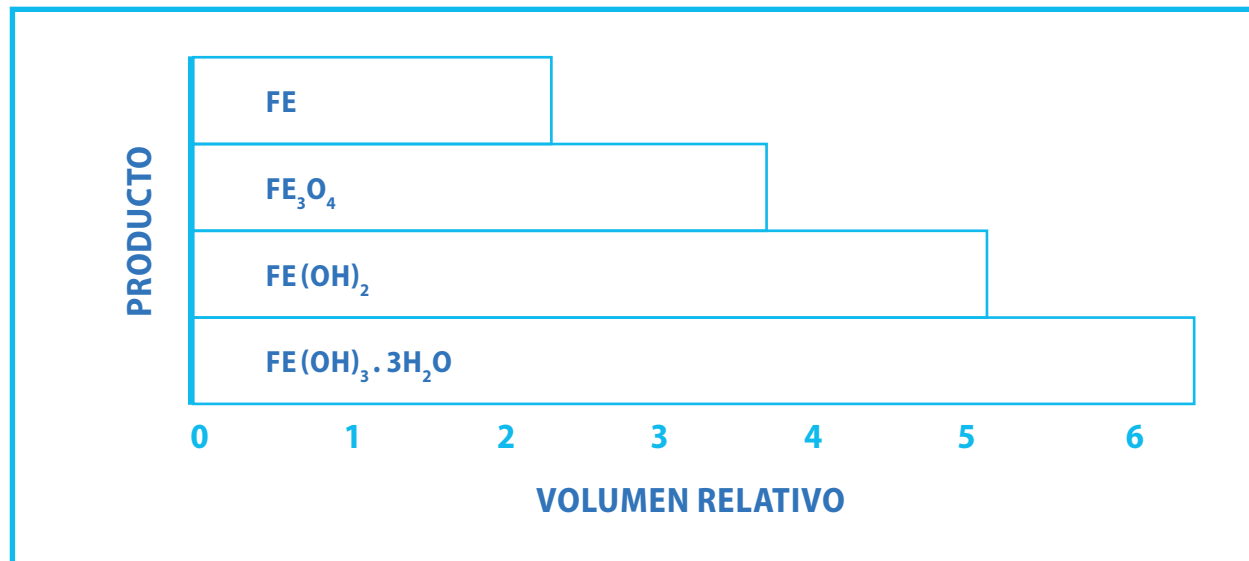


Fig. 113: Cambios de volumen en los productos de corrosión formado



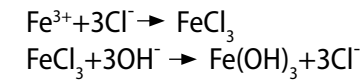
Fig. 114: Corrosión inducida por cloruros en viga de hormigón armado. Edificio de viviendas. Malecón No. 67



Fig. 115: Macrocelda de corrosión por presencia de cloruros en la masa de hormigón. Capitolio Nacional



La reacción tiene lugar de la siguiente manera:



Aunque desde el punto de vista ambiental, la presencia de iones de Cl^- en el aire no es considerado por muchos investigadores como un contaminante, debido a que no impacta negativamente en la salud humana, sí es uno de los elementos químicos que más incide en la durabilidad de las edificaciones de hormigón armado. En el caso particular de Cuba, los niveles de salinidad en las zonas costeras determinan significativamente en el estado de conservación de las edificaciones y las estructuras metálicas construidas en la costa norte del país.

La formación del aerosol marino puede suceder tanto a mar abierto, como en la zona de rompiente de la ola debido al empuje del viento, el cual es la fuerza responsable de la salinidad presente en la atmósfera costera. El tiempo de permanencia de las corrientes de aire, la velocidad del viento y el equilibrio establecido entre la humedad relativa y la temperatura ambiental son las variables responsables de la agresividad atmosférica presente en el aerosol marino. Diversos estudios han demostrado que a velocidades de viento entre 3 - 7.1 m/s puede iniciarse la formación de partículas de aerosol.

En la Figura 115 se muestran los perfiles de concentración salina en función de la velocidad del viento, obtenidos por diversos investigadores.

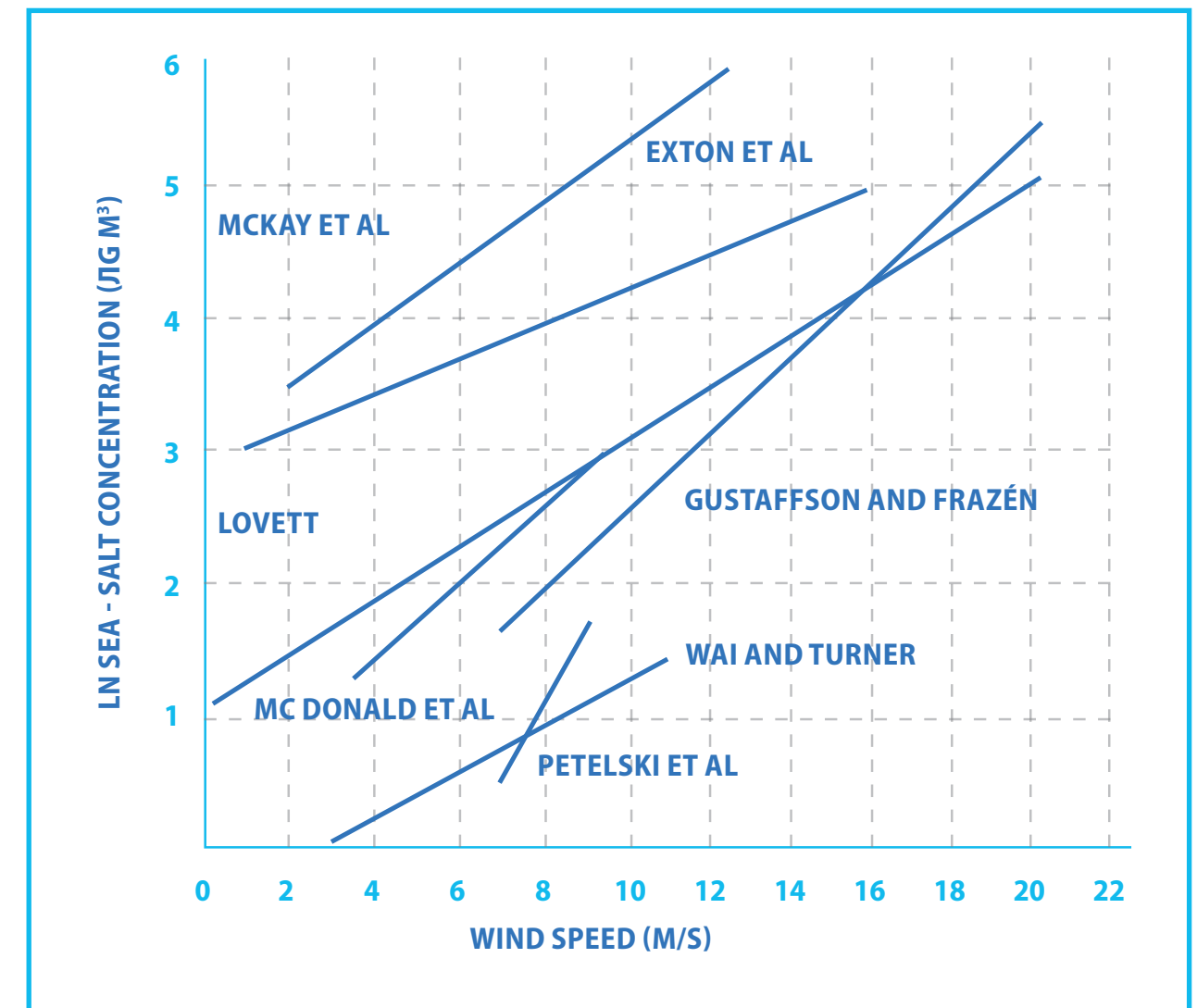


Fig. 116: Relación entre la velocidad del viento y el aerosol marino. Tomado de Meira, G. R. et al. (2008)

Para valores de Hr superiores al 65 %, se propicia la deposición de las partículas de sal en forma de solución salina. Esto conlleva a la formación de un ambiente significativamente más agresivo. El aerosol marino formado se compone de pequeñas partículas suspendidas en el aire, las cuales pueden adquirir diferentes formas geométricas en función del empuje del aire, la permanencia y la relación sólido/líquido presente en la gota. En función de esto, los diámetros pueden variar entre 0.1 - 400 μm . Esta variabilidad sustenta el hecho de que las partículas de mayor tamaño, y por tanto más dañinas (en términos de deterioro), sean depositadas a pocos metros de la zona del rompiente de la ola, mientras que las de menor tamaño y menos agresivas, sean capaces de viajar varios kilómetros hacia el interior de la ciudad.

En este sentido, la Norma Cubana NC 120:2014 establece los niveles de agresividad corrosiva atmosférica en función de las distancias con respecto a las líneas costeras norte y sur (Tabla 14):

TABLA 14: TIPOS GENERALES DE EXPOSICIÓN RELATIVOS A LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS. TOMADO DE NORMA CUBANA NC 120:2014

AGRESIVIDAD	DESCRIPCIÓN
MUY ALTA	ELEMENTOS DE ESTRUCTURA MARINOS POR ENCIMA DEL NIVEL DE LA MAREA ALTA Y EN ZONAS DE RECORRIDOS DE MAREAS. ESTRUCTURAS SITUADAS EN LAS PROXIMIDADES DE LA LÍNEA COSTERA HASTA 500 M DEL MAR EN LA COSTA NORTE Y HASTA 100 M EN LA SUR. ESTRUCTURAS NO IMPERMEABILIZADAS EN CONTACTO CON AGUAS QUE PRESENTEN UN CONTENIDO ELEVADO DE CLORUROS NO NECESARIAMENTE RELACIONADOS
ALTA	ELEMENTOS DE ESTRUCTURAS MARINOS SUMERGIDOS PERMANENTEMENTE ESTRUCTURAS SITUADAS EN LA FRANJA COSTERA A MÁS DE 500 M Y HASTA 3 KM DEL MAR EN LA COSTA NORTE Y A MÁS DE 100 M Y HASTA 1 KM. EN LA COSTA SUR ESTRUCTURAS SOTERRADAS BAJO LA INFLUENCIA TOTAL O PARCIAL DE AGUA DE MAR O SALOBRE
MEDIA	ESTRUCTURAS SITUADAS EN LA FRANJA COSTERA A MÁS DE 3 KM Y HASTA 20 KM DE LA COSTA NORTE Y A MÁS DE 1 KM Y HASTA 20 KM DE LA COSTA SUR. ESTRUCTURAS SOTERRADAS BAJO LA INFLUENCIA TOTAL O PARCIAL DE AGUAS Y SUELOS COMUNES. INTERIORES DE EDIFICACIONES AISLADAS DEL MEDIO EXTERIOR Y SOMETIDAS A HUMEDADES ALTAS O CONDENSACIONES. ESTRUCTURAS SITUADAS EN ZONAS DE HUMEDADES RELATIVAS MEDIAS ANUALES MAYORES DE 65 %. DEPÓSITOS DE AGUA DULCE
BAJA	ESTRUCTURAS SITUADAS A MÁS DE 20 KM DE AMBAS COSTAS. INTERIORES DE EDIFICACIONES NO SOMETIDOS A CONDENSACIONES. ESTRUCTURAS SOTERRADAS NO AFECTADAS POR LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS O FREÁTICAS EN SUELOS COMUNES. ESTRUCTURAS SITUADAS EN ZONAS DE HUMEDADES RELATIVAS MEDIAS ANUALES IGUALES O MENORES DEL 65 %

1.5.5. Relación de la contaminación atmosférica con el color de las edificaciones

El impacto de los contaminantes atmosféricos influye no solo en el deterioro de las edificaciones, sino también en el ennegrecimiento, amarilleamiento y decoloración del material pétreo. En las regiones cálidas del planeta, los eventos que más relación tienen con la variación cromática son la lluvia, los ciclos de humectación y secado, los gases de efecto invernadero, las concentraciones de partículas (PM10 y PM2,5) presentes en el aire, las lluvias ácidas y el nivel de los mares.

La fuente principal del fenómeno de ennegrecimiento de las edificaciones es la contaminación atmosférica. Las partículas de carbón suspendidas en el aire, fundamentalmente aquellas generadas por la combustión incompleta de los motores, son los compuestos que más incidencia tienen en el deterioro visual. La combinación de los elementos carbónicos unido a la deposición húmeda y seca del SO_2 , es el daño ambiental que más incidencia tiene en la estética de las edificaciones, tanto contemporáneas como históricas. Los metales pesados presentes en los combustibles actúan como soporte catalítico para la oxidación heterogénea del SO_2 , lo que favorece el ennegrecimiento de la piedra. Las partículas de carbón suspendidas en el aire, principalmente las PM10 y las PM2,5, tienen la capacidad de ocupar los poros superficiales e influir en la tonalidad y cromaticidad.

Prácticamente todos los elementos estructurales y arquitectónicos se convierten en barreras contra las corrientes de aire, actuando como reservorios de contaminantes atmosféricos. En consecuencia, permiten la formación de costras negras por acumulación de cristales de sulfatos de calcio y de otros compuestos químicos que, propiciados por los aerosoles, esporas y los PMx, quedan atrapados en las estructuras minerales presentes en los poros. Sobre estos elementos expuestos a las fuentes de emisiones y atmósferas agresivas, actúan mecanismos de deposición húmeda y seca. Aquellos elementos que poseen mayor capacidad de retención (capiteles, superficies bajo las cornisas y balcones, canes, atlantes y muchos otros), muestran mayores daños porque no reciben el impacto directo del sol, el aire y la lluvia (Figura 117). En los edificios altos, el impacto de la deposición de partículas y el ennegrecimiento es claramente visible, con una mayor concentración en los niveles inferiores que paulatinamente disminuye con la altura, como resultado de la dispersión de las partículas, la retención en los elementos arquitectónicos salientes como cornisas y balcones, y el efecto limpiador de la lluvia y el sol (Figura 118).

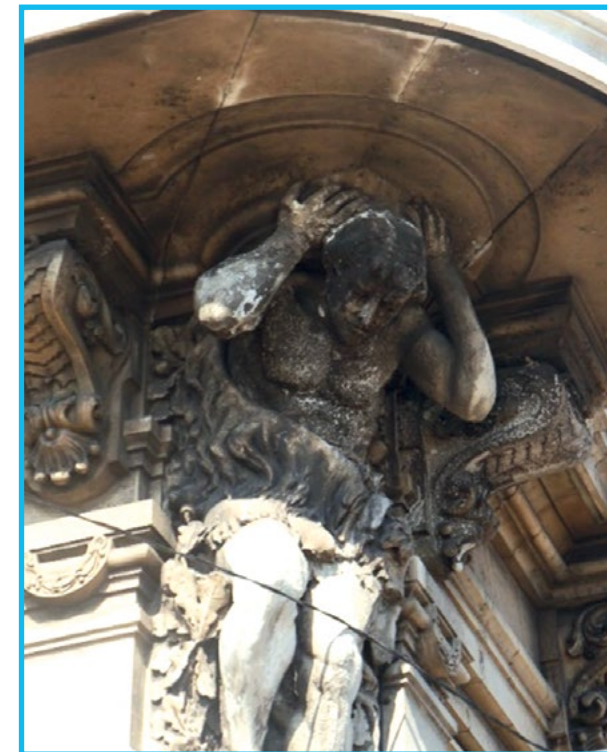


Fig. 117: Deposición de costras negras sobre atlante. Palacio de Dionisio Velazco. Embajada de España



Fig. 118. Instituto Pre-Universitario José Martí

2. ESTRUCTURAS METÁLICAS

2.1. INTRODUCCIÓN

El uso del hierro¹ como material de construcción empleado enteramente en la arquitectura metálica se inició a finales del siglo XVIII en Inglaterra, a partir de la incorporación del hierro fundido en la industria de la construcción. Sin embargo, no fue hasta los primeros años del siglo XIX con la revolución industrial, que comenzó su uso masivo en proyectos arquitectónicos. En Cuba, el empleo de estructuras metálicas en obras constructivas se registró por primera vez en la ampliación de la Carretera Central, con la construcción del Puente de Jatibonico en 1931 (Figura 119). Sucesivamente se fue incorporando el uso de este tipo de estructuras a proyectos urbanísticos de la capital, con el Puente de Hierro de la calle Línea y el antiguo puente de la 5ta. Avenida, hoy desaparecido (Figuras 120 y 121).



Fig. 119: Vista del puente de Jatibonico al concluir la construcción de la Carretera Central, en marzo de 1931. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

La durabilidad de las estructuras metálicas está influenciada por los fenómenos de corrosión atmosférica, cuyo control es un aspecto clave para el diseño y mantenimiento, tanto de las nuevas construcciones, como de los edificios históricos. Durante las décadas de 1970 y 1980 se realizaron varios estudios sobre el costo de la corrosión, en los cuales se demostró que el impacto de este fenómeno en la economía nacional de varios países representó hasta el 3 % del PIB. Para extender el tiempo de vida de estos materiales se re-

¹ El término "uso del hierro" está empleado de forma genérica. Su empleo como material, data de la era del hierro en las primeras civilizaciones del primer milenio A. C. Posteriormente fue empleado también como acero a lo largo de la historia de la humanidad.

quiere un mantenimiento y reemplazo costosos para el uso seguro y confiable de las construcciones, incluso si la capacidad de servicio de la estructura no se ve comprometida. En los últimos años se han incrementado las investigaciones relacionadas con el diseño y la durabilidad de las estructuras metálicas debido a que los deterioros por corrosión conllevan enormes pérdidas económicas.

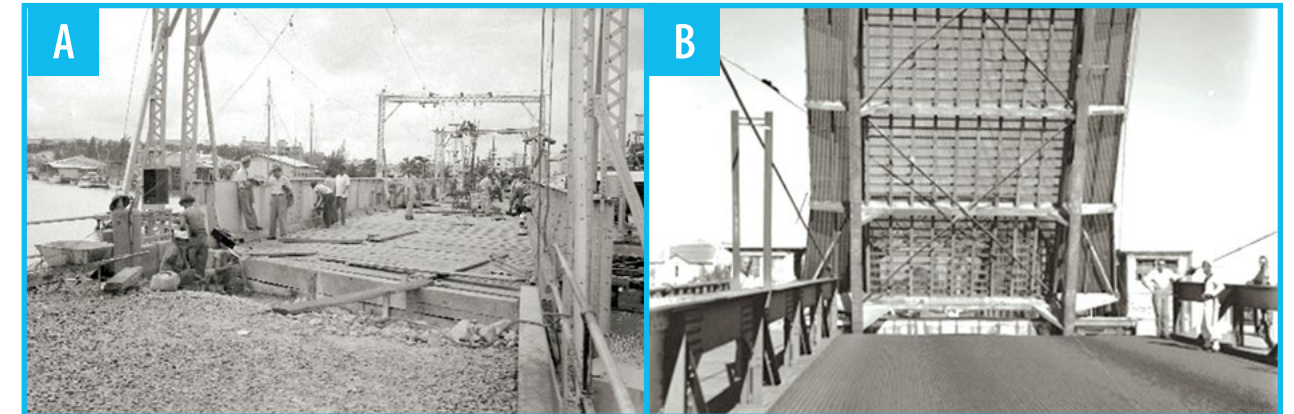


Fig. 120: Imágenes históricas del Puente de Hierro de la calle Línea. **A:** Etapa constructiva. **B:** Finalizada la construcción en 1946. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

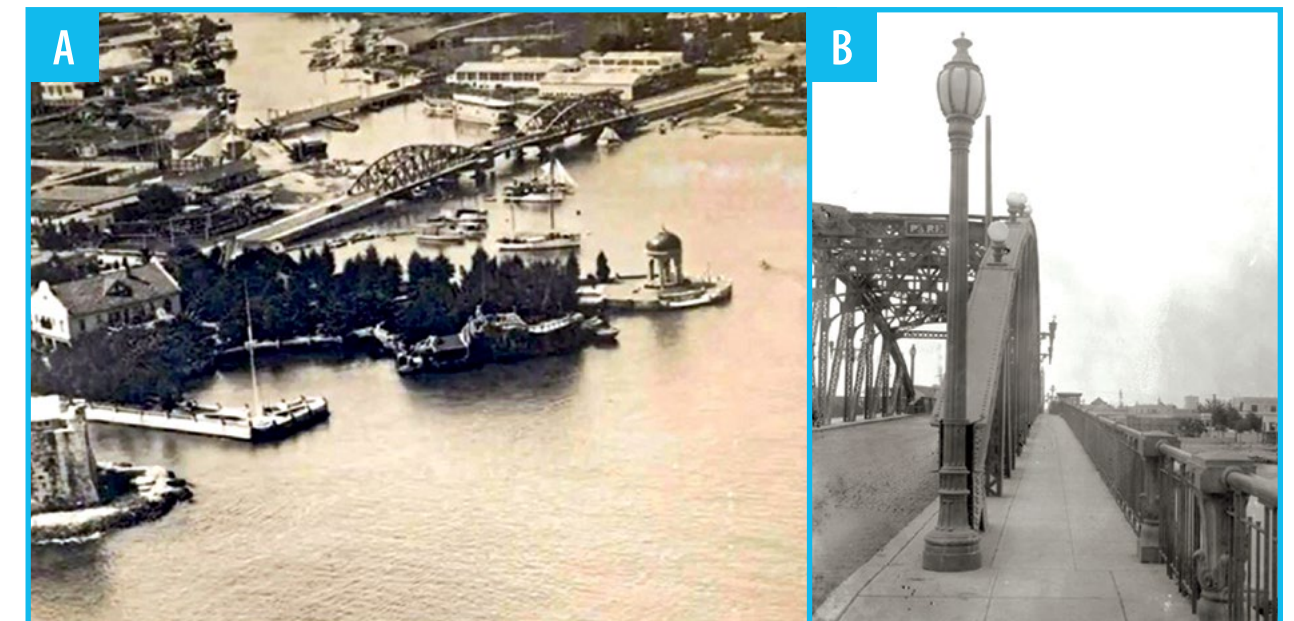


Fig. 121: Imágenes históricas del puente de hierro de la 5ta Avenida. **A:** Vista aérea. **B:** Vista del puente desde el malecón. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

Desde el punto de vista estructural, la disminución de espesor de la sección transversal por el fenómeno de la corrosión conduce a una menor área resistente, lo que promueve la disminución del rendimiento estructural en términos de resistencia, rigidez y ductilidad. En algunos casos, la falla local de un componente o junta podría afectar la estabilidad de toda la estructura. En caso de cargas cíclicas, el fenómeno de corrosión puede producir una reducción significativa de la resistencia a la fatiga, principalmente en zonas con elevadas concentraciones de tensiones.

Para evitar fallas por corrosión, es necesario un diseño duradero de las estructuras metálicas, tanto para los estados límite último, como de servicio. En este sentido, los principales códigos de diseño estructural prevén únicamente medidas de protección generales, como el uso de acero inoxidable o resistentes a la intemperie, de sistemas de protección de superficies y de resistencia estructural.


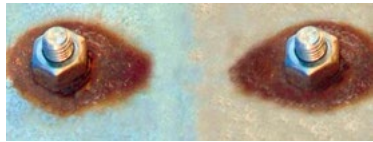

2.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA CORROSIÓN EN METALES Y ALEACIONES

Los fenómenos de corrosión de los metales y las aleaciones involucran principalmente dos elementos: el material y su entorno. En particular, la corrosión se define como el deterioro de un material, generalmente un metal, como resultado de su reacción con el medio que lo rodea, lo que conlleva a su degradación.

Los ataques de corrosión pueden manifestarse de diferentes formas, siendo más comunes como regla general los de corrosión química y electroquímica. Otra forma de caracterizar el fenómeno es según su apariencia y las formas básicas de corrosión, que pueden ser uniformes o localizadas. En la naturaleza se pueden manifestar variadas formas de corrosión de los materiales metálicos (Tabla 15), de acuerdo al medio en que se encuentren y los esfuerzos mecánicos que actúen sobre ellos, siendo los más comunes los siguientes:

Los fenómenos de corrosión atmosférica se pueden iniciar tanto en atmósferas interiores como en exteriores. A partir de la deposición de una capa delgada de líquido (electrolito) sobre la superficie del metal, ya sea mediante ciclos de humectación y secado, lluvia o condensación, se inicia la corrosión al alcanzar un nivel de humedad crítico que permite la creación y balance de zonas anódicas y catódicas. Esto provoca que se desplacen los electrones hacia el cátodo, lo cual desencadena la corrosión en el ánodo formado.

TABLA 15: MANIFESTACIONES MÁS COMUNES DE FENÓMENOS DE CORROSIÓN

TIPOS DE CORROSIÓN	REPRESENTACIÓN	DESCRIPCIÓN
UNIFORME		SE TRATA DE UN TIPO DE CORROSIÓN GENERAL QUE AVANZA AL MISMO RITMO EN TODA LA SUPERFICIE DEL METAL
GALVÁNICA		LA CORROSIÓN GALVÁNICA ES UN FENÓMENO ELECTROQUÍMICO QUE SE PRODUCE ENTRE DOS METALES DIFERENTES EN CONTACTO ANTE LA PRESENCIA DE UN ELECTROLITO, QUE PUEDE SER AGUA CONTENIDA EN LA HUMEDAD AMBIENTAL, LA CUAL ACTÚA COMO MEDIO CONDUCTOR DE ELECTRONES. DE ACUERDO AL EQUILIBRIO QUE SE ESTABLEZCA, UN METAL FUNCIONARÁ COMO ÁNODO Y EL OTRO COMO CÁTODO. EL METAL QUE ACTÚE COMO ÁNODO SERÁ EL QUE SUFRA LA CORROSIÓN
PICADURA		MANIFESTACIÓN DE CORROSIÓN LOCALIZADA QUE SE CARACTERIZA POR PEQUEÑAS ZONAS ANÓDICAS CON FORMA DE PICADURA Y AMPLIAS ZONAS CATÓDICAS

TIPOS DE CORROSIÓN	REPRESENTACIÓN	DESCRIPCIÓN
MICROBIOLÓGICA		CORROSIÓN ASOCIADA A LA PRESENCIA DE MICROORGANISMOS Y / O BACTERIAS EN LA SUPERFICIE DEL METAL QUE SE ENCUENTRAN EN EL AGUA DULCE Y DE MAR, ASÍ COMO EN EL SUELO
DE HENDIJAS		ES UNA FORMA DE CORROSIÓN PROVOCADA POR LA ACUMULACIÓN DE PEQUEÑOS VOLÚMENES DE SOLUCIÓN ENTRE DOS PIEZAS METÁLICAS, LO QUE CONLLEVA A DIFERENCIAS DE POTENCIAL POR MECANISMOS DE AIREACIÓN DIFERENCIAL
INTERGRANULAR		LA CORROSIÓN INTERGRANULAR ES UN TIPO DE DETERIORO QUE SUCEDE DE FORMA LOCALIZADA O ADYACENTE A LOS LÍMITES DEL GRANO DE UNA ALEACIÓN. SE SUELE PRODUCIR EN ALEACIONES QUE FORMAN CAPA PASIVA, COMO SON LOS ACEROS INOXIDABLES
FATIGA		SE MANIFIESTA MEDIANTE EL AGRIETAMIENTO DEL METAL CAUSADO POR ESFUERZOS REPETIDOS EN UN AMBIENTE CORROSIVO
EROSIÓN		SE MANIFIESTA POR UNA ACCIÓN CONJUNTA QUE IMPLICA UN FLUJO CORROSIVO QUE CONDUCE A UNA PÉRDIDA ACELERADA DE MATERIAL
CORROSIÓN POR TENSIÓN		EL AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN DESIGNA A UNA FALLA BAJO LA ACCIÓN COMBINADA DE LA CORROSIÓN Y LA PRESENCIA DE ESFUERZOS RESIDUALES O APLICADOS. LA TRAYECTORIA DE LA GRIETAS PUEDEN SER INTERGRANULARES O TRANSGRANULARES, LO CUAL DEPENDE DEL TIPO DE METAL Y DEL MEDIO CORROSIVO

La humedad crítica de líquido varía en función de las características del metal base. En el caso del hierro, que es el material más empleado en la construcción, esta comienza a partir de 60 % de HR. Para las condiciones climáticas de Cuba, este nivel de humedad es alcanzado durante casi todos los meses del año.

La velocidad general del proceso de disolución del metal está influenciada por la formación de productos de corrosión, su solubilidad en la película de agua y la corrosividad del medio ambiente. Estos procesos dependen de varios factores, que se pueden dividir en dos clases diferentes: los factores endógenos, que están relacionados con el metal en sí (el potencial de electrodo efectivo de un metal en una solución, la composición del metal, el químico y homogeneidad física de la superficie, etc.), y los factores exógenos que están conectados a la composición atmosférica.

Entre los factores importantes a evaluar en un proceso corrosivo están el tiempo de humectación (TOW-siglas en inglés) y la concentración de contaminantes, como el dióxido de azufre y los cloruros. El TOW representa el período de tiempo promedio durante el cual el electrolito está depositado sobre la superficie corroída. De acuerdo con la serie de normas ISO 9223:2012 esta se define como el número de horas durante las cuales la HR es superior al 80 % y la temperatura promedio superior a 0 °C. Esta norma también define las categorías de agresividad corrosiva atmosféricas, las cuales se clasifican con los códigos C1 a C5 y CX, siendo el primero la de menor corrosividad y CX la categoría extrema (Tabla 16).

TABLA 16: CATEGORÍAS DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA. ISO 9223:201

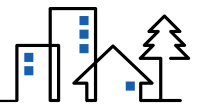
CATEGORÍA	CORROSIVIDAD
C1	MUY BAJA
C2	BAJA
C3	MEDIA
C4	ELEVADA
C5	MUY ELEVADA
CX	EXTREMA

Los cloruros en la atmósfera pueden aumentar significativamente la velocidad de corrosión, como en el caso de los ambientes marinos, donde el nivel crítico de humedad puede iniciarse alrededor del 30 %-40 %. El principal efecto de los cloruros es que estos no se consumen durante la reacción, por lo que impiden la formación de películas protectoras de óxido en la superficie del metal, lo que incrementa la velocidad de corrosión.

En lo que respecta al azufre, en ambientes contaminados, cuando la humedad relativa está por encima del 60%-70%, incluso las pequeñas partículas disueltas en la solución electrolítica (agua de lluvia, niebla), estimulan tanto las reacciones anódicas como las catódicas, lo cual conduce a un aumento de la velocidad de corrosión si se compara con una atmósfera de aire limpio.

2.3. CORROSIVIDAD DE LOS AMBIENTES ATMOSFÉRICOS

En cuanto a la corrosividad de las atmósferas, las normas ISO 9223:2012 y la EN 12500:2000 definen cinco entornos exteriores en función de la presencia de agentes corrosivos en el aire:



- Atmósfera rural: Campo y pequeñas ciudades, afectadas por contaminación por agentes corrosivos menores (dióxido de carbono, cloruros, fertilizantes artificiales).
- Atmósfera urbana: Áreas densamente pobladas, pocas actividades industriales, contaminación media por agentes corrosivos (SO_x, NO_x, O₃).
- Atmósfera industrial: Actividades industriales intensivas, alta contaminación por agentes corrosivos.
- Atmósfera costera: Áreas cercanas al mar o zonas internas fuertemente afectadas por la salinidad del aire. Los efectos de la corrosión están influenciados por las condiciones topográficas y la dirección del viento predominante.
- Atmósfera industrial/costera: Entorno complejo, áreas cercanas tanto al mar como a distritos industriales, o zonas internas ubicadas en la dirección del viento predominante. Contaminación media y/o alta por agentes corrosivos (dióxidos de azufre, cloruros).

Para la estimación matemática de la pérdida de masa de los metales más comúnmente empleados para el primer año de exposición, la Norma ISO 9223:2012 propone las siguientes ecuaciones:

Acero al carbono:

$$r_{\text{corr}} = 1.77P_d^{0.52} \exp(0.020HR + f_{St}) + 0.102S_d^{0.62} \exp(0.033HR + 0.040T)$$

$$f_{St} = -0.054(T-10)$$

Cobre:

$$r_{\text{corr}} = 0.0053P_d^{0.26} \exp(0.059HR + f_{Cu}) + 0.01025S_d^{0.27} \exp(0.036HR + 0.049T)$$

$$f_{Cu} = -0.080(T-10)$$

Zinc:

$$r_{\text{corr}} = 0.0129P_d^{0.44} \exp(0.046HR + f_{Zn}) + 0.0175S_d^{0.57} \exp(0.008HR + 0.085T)$$

$$f_{Zn} = -0.071(T-10)$$

Aluminio:

$$r_{\text{corr}} = 0.0042P_d^{0.73} \exp(0.025HR + f_{Al}) + 0.018S_d^{0.60} \exp(0.020HR + 0.094T)$$

$$f_{Al} = -0.043(T-10)$$

Donde:

r_{corr} : velocidad de corrosión para el primer año de exposición atmosférica, $\mu\text{m/año}$.
 T: temperatura del aire, °C
 HR: humedad relativa, %
 P_d : tasa de depósito de SO₂, mg/m²día
 S_d : tasa de depósito de Cl⁻, mg/m²día

2.4. EFECTO DEL CLIMA DE LA HABANA SOBRE LOS MATERIALES METÁLICOS

Desde la década de 1990 del siglo pasado, la calidad del aire en La Habana se ha monitoreado para conocer los niveles de contaminación existentes. Estas investigaciones han sido realizadas fundamentalmente por el Laboratorio de Química y Medio Ambiente del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNIC), el Instituto de Meteorología (INSMET) y el Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM). Los datos climáticos reportados por el INSMET demuestran que la HR promedio es de 76 %, lo cual favorece el desarrollo de los fenómenos corrosivos.

Para estas condiciones climáticas, la deposición media de los agentes agresivos sucede a una distancia de 50 m para los meses comprendidos entre mayo y septiembre. Entre los meses de octubre a abril, la deposición media sucede a una distancia de 30 m de la línea costera norte, con niveles de deposición de iones de cloruro (DCI) que oscilan entre 719.5 - 2.7 mg/m²d. Para el caso del óxido de azufre la concentración media en el aire se ha registrado en 32,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con TOW que oscilan entre 4966 - 3782 horas/año.

En resumen, los niveles de contaminantes atmosféricos medidos en el aire de La Habana, se presentan en la tabla 17. El comportamiento de los mismos, se muestra en la Figura 122.

TABLA 17: RELACIÓN ENTRE CONTAMINANTES Y CATEGORÍAS CORROSIVAS PARA LA HABANA

REFERENCIA	CONCENTRACIONES MÁXIMAS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (MG/M3)				
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	NH ₃	HOLLÍN
(PLACERES ET AL., 2004)	21,5	-	59,2	-	-
(VARONA ET AL., 2011)	32,7	120,3	41,09	54,10	21,86
INTERVALOS ISO 9223:2012	5 - 100	20-150	30 - 70	<20	-
CATEGORÍA	URBANO	URBANO	URBANO/ INDUSTRIAL	NORMAL	-

*:(-) VALORES NO REPORTADOS

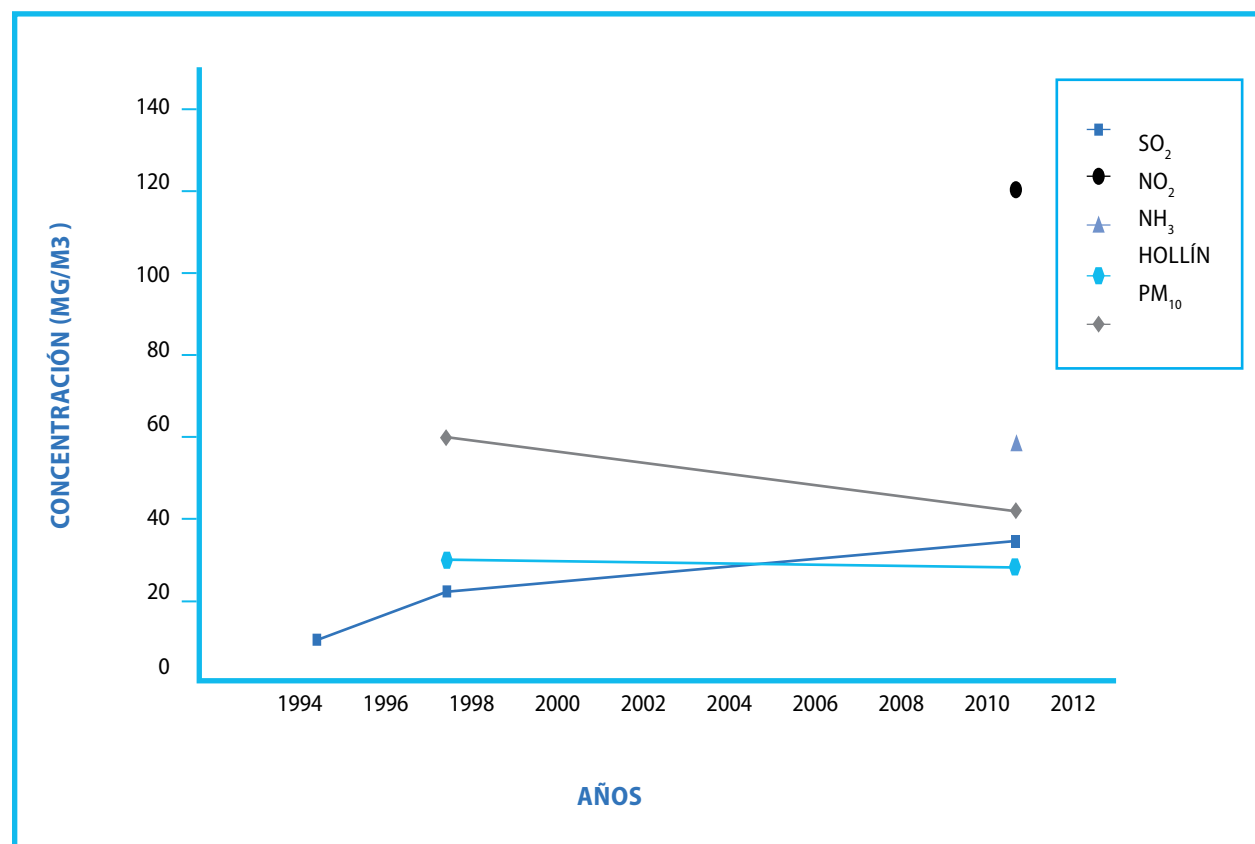


Fig. 122: Progresión de los niveles de contaminación del aire en La Habana



Mediante la aplicación de los modelos matemáticos existentes, se obtiene que los niveles de agresividad corrosiva atmosférica para los metales de acero al carbono, cobre, zinc y aluminio se encuentran comprendidos entre corrosividad "baja" para una distancia al mar superior 4000 m y de "extrema" para distancias de 20 m (Tabla 18).

TABLA 18: CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA EN LA HABANA PARA DIFERENTES METALES

MATERIAL	ACERO AL CARBONO						
DISTANCIA DEL MAR (M)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
R _{CORR} (MM/AÑO)	269,2	42,2	28,2	42,3	25,6	23,7	23,9
INTERVALO ISO 9223:2012(MM/AÑO)	200-700		25-50			1,3-25	
CATEGORÍA	CX	C3	C3	C3	C3	C2	C2
MATERIAL	COBRE						
DISTANCIA DEL MAR (M)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
R _{CORR} (MM/AÑO)	4,3	1,8	1,4	1,7	1,3	1,2	1,2
INTERVALO ISO 9223:2012(MM/AÑO)	2,8-5,6		1,3-2,8			0,6-1,3	
CATEGORÍA	C5	C4	C4	C4	C4	C3	C3
MATERIAL	ZINC						
DISTANCIA DEL MAR (M)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
R _{CORR} (MM/AÑO)	12,9	2,1	1,3	2,0	1,2	1,1	1,1
INTERVALO ISO 9223:2012(MM/AÑO)	8,4-25		2,1-4,2			0,7-2,1	
CATEGORÍA	CX	C4	C3	C3	C3	C3	C3
MATERIAL	ALUMINIO						
DISTANCIA DEL MAR (M)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
R _{CORR} (MM/AÑO)	5,21	0,66	0,37	0,64	0,32	0,29	0,28
INTERVALO ISO 9223:2012(MM/AÑO)	-	-	-	-	-	-	-
CATEGORÍA	-	-	-	-	-	-	-

Para el espacio correspondiente al Centro Histórico de La Habana, el comportamiento de degradación de los materiales metálicos con respecto a la distancia de la línea costera norte es el siguiente (Figura 123):

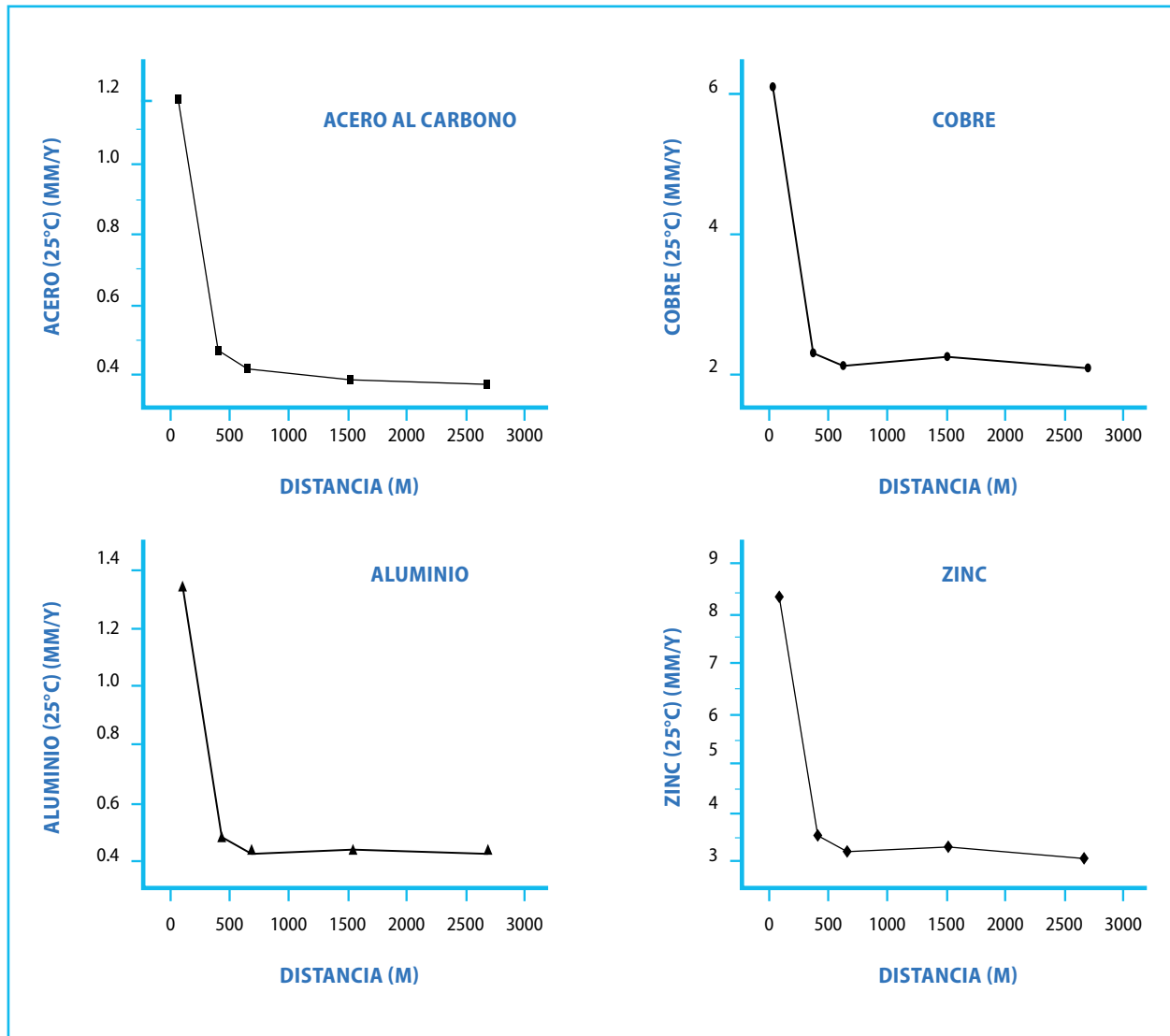


Fig. 123: Pérdida de masa de los metales para la zona del Centro Histórico de La Habana. Elaboración propia

2.5. POSIBLES EFECTOS PARA UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Desde el siglo pasado las emisiones en La Habana se han incrementado gradualmente. El impacto negativo de los contaminantes atmosféricos sobre las edificaciones patrimoniales es innegable y requiere la implementación de acciones, políticas y estrategias de mitigación basadas en la durabilidad. La ocurrencia de eventos climáticos extremos y el efecto que producen en la ciudad es cada año más devastador, incrementando el impacto en la velocidad de deterioro de todas las estructuras, en especial, en aquellas más próximas a la costa norte.

Los modelos climáticos desarrollados para el siglo XXI indican cambios en el clima global. Para las condiciones futuras de Cuba, la simulación muestra un incremento de 1 a 2 °C, mientras que las precipitaciones tenderán a disminuir en un 10 %. De acuerdo a esta predicción, el clima en la región de América Central tenderá hacia un ambiente más seco y cálido. Los monitoreos climáticos realizados por el INSMET reafirman los resultados de los modelos climáticos, con un incremento récord en el año 2020 de la temperatura media anual en 1.17 °C, desde 1951 (Figura 124).

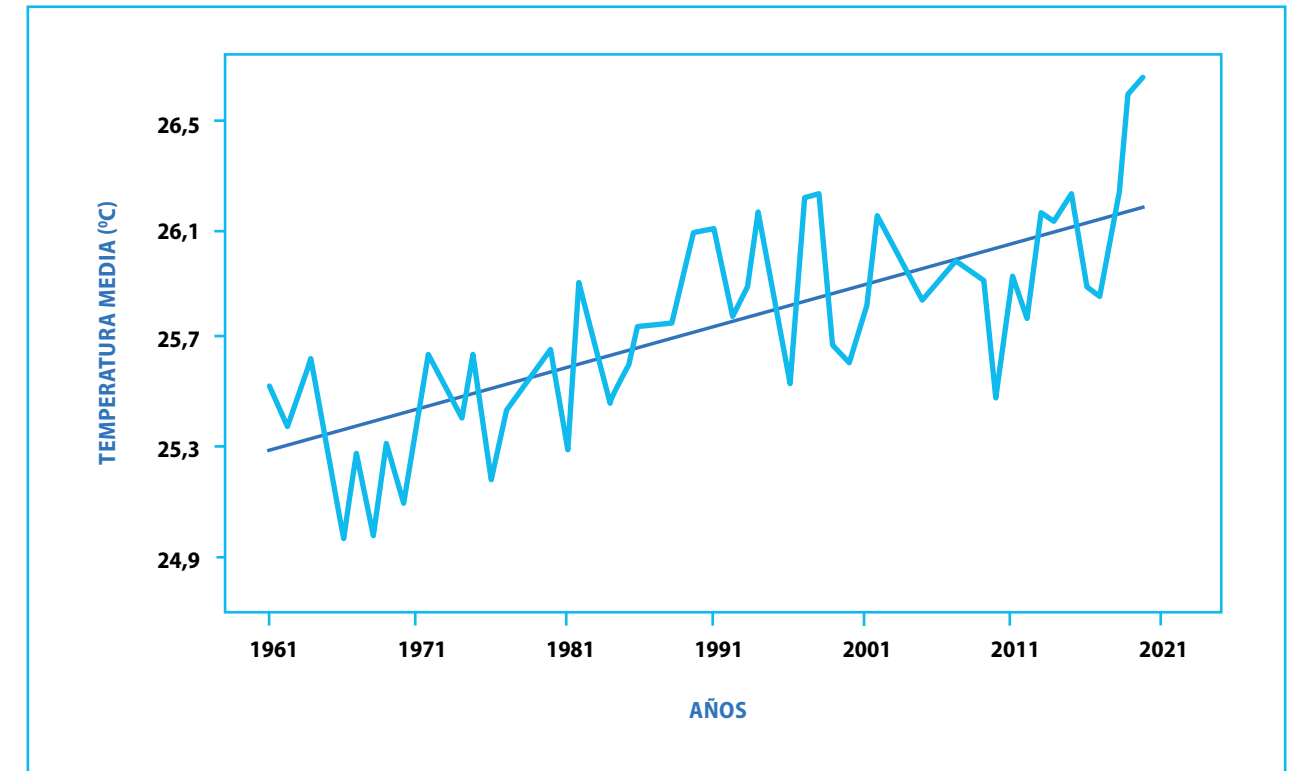
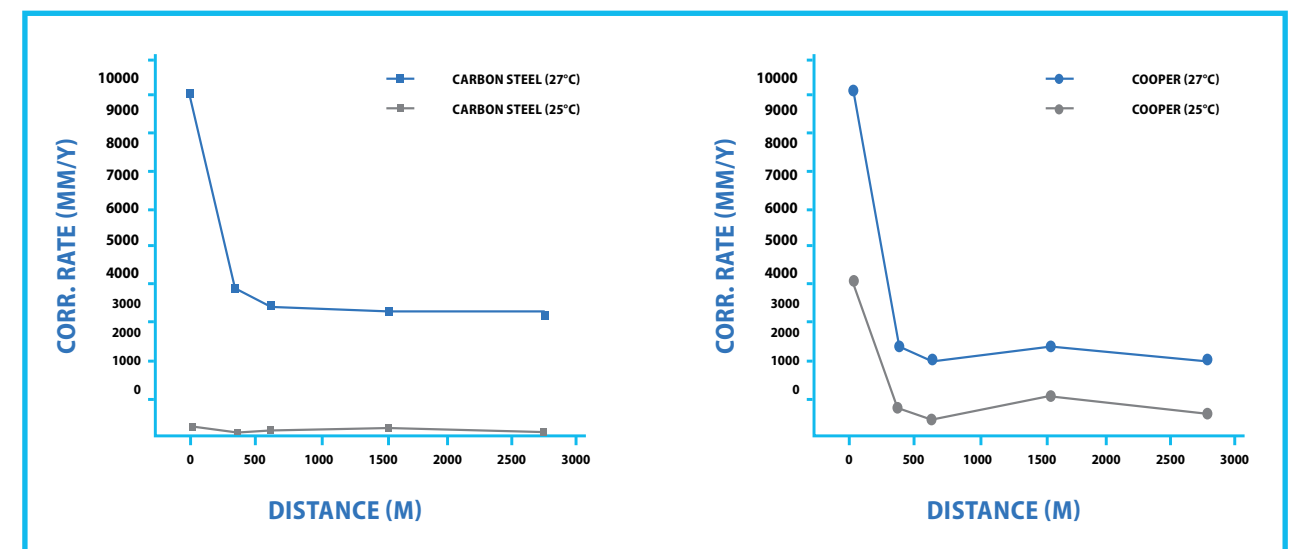


Fig. 124: Datos registrados por el INSMET de la temperatura media anual de Cuba durante el periodo 1951-2020. Norma climatológica referida al periodo 1961-1990. Tomado de Rivera, C. F. et al. (2020)

El aumento de la temperatura regional provocará el calentamiento del océano y del aire. En La Habana, si se mantienen los niveles actuales de emisiones, combinado con el escenario predictivo, las variaciones del clima aumentarán el secado de la vegetación urbana, lo que propiciará un incremento en la cantidad de polvo suspendido en el aire, en el contenido de partículas carbónicas y en consecuencia la velocidad de degradación de los materiales constructivos.

El aumento de la radiación solar puede acelerar el deterioro de los materiales por variaciones en los ciclos de humectación y secado, y la deposición de compuestos ácidos (SO_2/H_2SO_4). En consecuencia, los metales como el acero al carbono, cobre y zinc serán los más afectados. A partir de la aplicación de los modelos predictivos existentes, con un incremento de la temperatura regional en 2 °C, se observa en los gráficos como se acelera la velocidad de corrosión de los metales más empleados en la industria de la construcción (Figura 125).



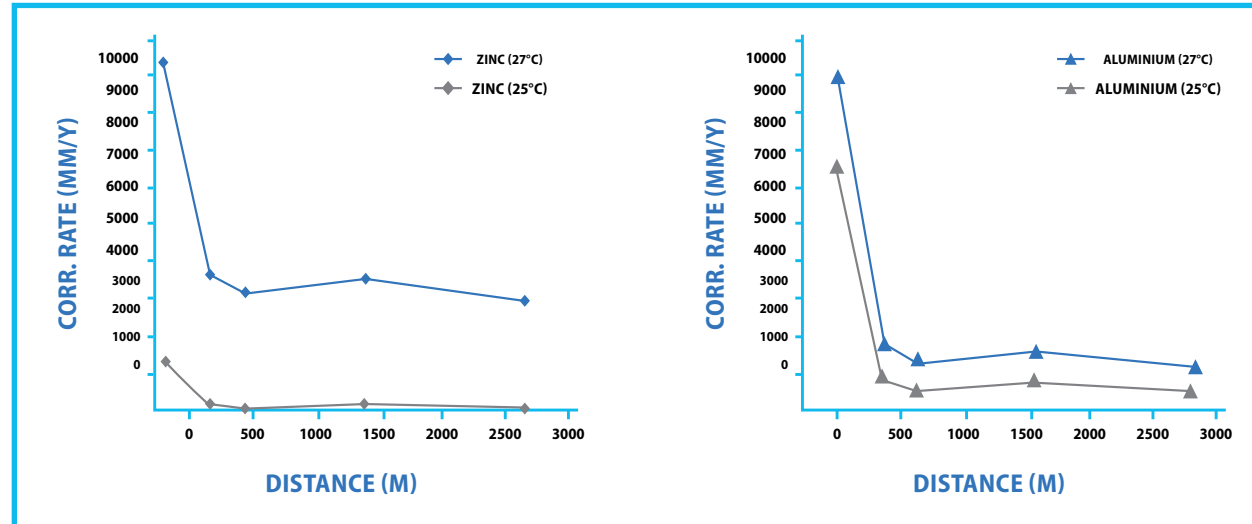


Fig. 125: Comportamiento de la degradación de los metales a 25 °C y a 27 °C en un posible evento de cambio climático. Elaboración propia

Las variaciones en el clima regional favorecerán el aumento de los niveles de concentración de O_3 . La entrada de las estaciones del año, el tiempo de permanencia y los niveles de los compuestos de NO_x tendrán una influencia significativa. En consecuencia, la estética y las condiciones estructurales de las edificaciones también se verá afectada por los niveles de concentración del O_3 troposférico.

2.6. EQUIPAMIENTO PARA DIAGNÓSTICO

Existe en la actualidad una amplia gama de equipos para el diagnóstico de estructuras de hormigón armado. Seguidamente se presentan algunos de los más empleados, dentro de la familia de los no destructivos y destructivos:

1.6.1. Equipos de ensayos no destructivos

- Localización de aceros de refuerzo: Conocidos popularmente como pacómetros, estos equipos se basan en la transmisión de pulsos electromagnéticos para la localización de materiales ferrosos, lo cual permite además la cuantificación de la sección de la barra de refuerzo y su profundidad en la masa de hormigón (Figura 126). Los equipos más avanzados en la detección de refuerzos de acero, son capaces de modelar la malla en 2D y 3D (Figura 127).



Fig. 126: Diferentes modelos de equipos de detección de barras de refuerzo en el hormigón

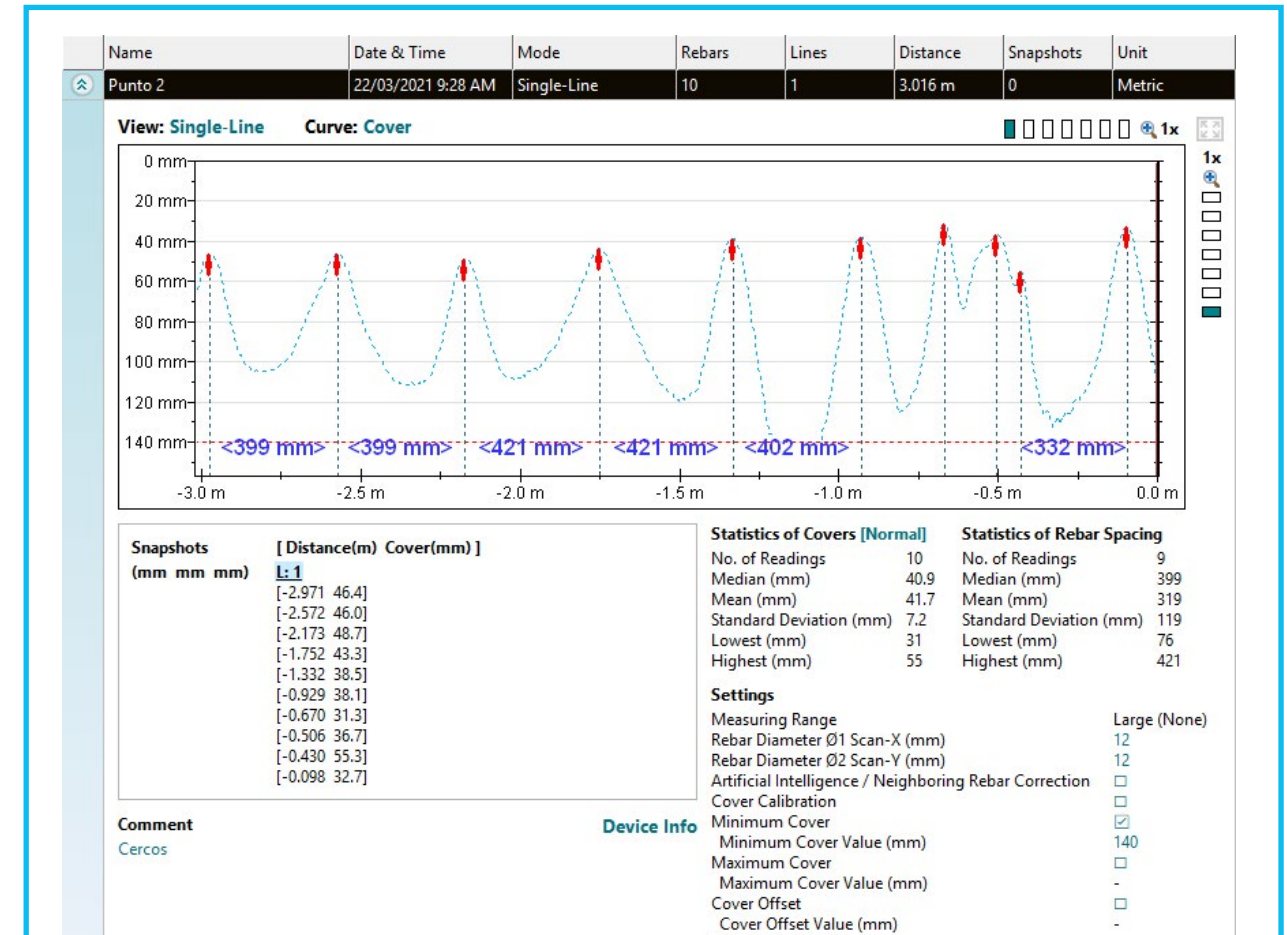


Fig. 127: Resultados en 2D de ensayo de localización de aceros de refuerzo en viga de hormigón armado. Convento de Santa Clara de Asís

- Esclerometría: La técnica se basa en realizar un impacto sobre la superficie del hormigón a través del disparo de una barra de acero. Este impacto hace que la barra rebote en sentido contrario, siendo la lectura recibida por el valor del rebote el indicativo de la dureza superficial del hormigón. Para esto se emplean comúnmente los esclerómetros de reflexión tipo N. Los resultados obtenidos permiten estimar *in situ* la resistencia a compresión del hormigón endurecido, proporcionando datos para la evaluación de la calidad del mismo. La normativa empleada es la NC 246:2003 (Tabla 19). Para el uso de este instrumento es necesario realizar una preparación previa de la superficie mediante disco o piedra abrasiva de carborundum, para remover la capa superficial de muy poco espesor (2 mm), que es la más dura (Figura 128).



Fig. 128: Esclerómetro digital Proceq para estimación de resistencia a compresión en hormigones mediante índice esclerométrico

TABLA 19: CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN SEGÚN EL ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO. TOMADO DE NORMA CUBANA NC 246:2003

ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO
>40	BUENA
30 A 40	MEDIA
20 A 29	POBRE
20	FISURAS Y DELAMINACIÓN

- **Velocidad de pulso ultrasónico:** La velocidad del pulso ultrasónico se determina mediante la relación que existe entre la distancia de viaje a través del hormigón de una onda ultrasónica, y el tiempo que tarda la onda en recorrer una distancia determinada. Este ensayo permite evaluar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del hormigón, además de permitir la determinación de defectos en el hormigón como capas de diferente calidad o grietas (Figura 129). La normativa vigente: NC 231:2002 “Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón”, establece los rangos de calidad del hormigón en función de las velocidades de pulso ultrasónico obtenidas (Tabla 20).



Fig. 129: Equipo de medición de velocidad de pulso ultrasónico Proceq PunditLab+

TABLA 20: CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN

VELOCIDAD DE LA ONDA	CALIDAD DEL HORMIGÓN
<2000M/S	DEFICIENTE
2001 A 3000M/S	NORMAL
3001 A 4000M/S	ALTA
>4000M/S	DURABLE



- **Resistividad eléctrica:** La resistividad es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas. Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del hormigón y mayor su resistencia mecánica. Además, si el hormigón no está saturado de agua la resistividad aumenta, por lo que también es un indicador de su grado de saturación. Se basa en el principio de la sonda de Wenner, la cual funciona aplicando una corriente a las dos sondas exteriores, y midiendo el potencial resultante entre las sondas interiores (Figura 130). El contenido de humedad (agua) presente en los poros del hormigón es proporcional con la corriente que es transportada entre las sondas. Esto hace posible calcular la velocidad de corrosión (I_{corr}) teórica que se encuentra actuando sobre las barras de acero. La normativa empleada para la interpretación de los resultados es RILEM TC-154 EMC (Tabla 21).



Fig. 130: Equipo de medición y esquema de funcionamiento de la técnica de resistividad eléctrica del hormigón. Equipo Proceq Resipod

TABLA 21: CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN

RESISTIVIDAD (KΩ CM)	RIESGO DE CORROSIÓN
>100	DESPRECIABLE
50 – 100	BAJO
50 – 100	ALTO – MODERADO
<10	ALTO



Fig. 131: Pie de rey analógico
Fig. 132: Pie de rey digital

- **Medición de magnitudes de precisión:** Para la medición de magnitudes con mayor precisión que la que pueden ofrecer una cinta métrica o una regla, se utiliza el pie de rey, calibre o Vernier. La medida más pequeña que es capaz de medir o apreciar va desde los 0.1 mm hasta los 0.02 mm aproximadamente. El pie de rey incluye dos juegos de pinzas que sirven para medir exteriores e interiores. Además, gracias a la sonda de profundidad, se facilita la medición de grietas, fisuras y cavidades. Para aumentar la apreciación de su escala principal, contiene en paralelo una escala auxiliar llamada nonio. Mediante este instrumento es posible realizar mediciones en espacios reducidos y es ampliamente utilizado en el diagnóstico, ya que sus características son especialmente útiles en el caso del estudio de grietas y fisuras en el hormigón, así como en el cálculo de pérdidas de sección por corrosión en el acero de refuerzo. Existen modelos tanto analógicos (Figura 131) como digitales (Figuras 132 y 133), para una lectura más rápida y precisa.



Fig. 133: Ensayo de medición de pérdida de sección con pie de rey digital. Cátedra de la Lengua Española. Edificio Santo Domingo



Fig. 134: Cámara termográfica FLIR TG165-X

- **Termografía infrarroja:** La termografía es un proceso de obtención de imágenes térmicas que brindan información sobre la temperatura superficial de un cuerpo tomando en cuenta la radiación emitida por dicho cuerpo (Figura 134). La cantidad de radiación emitida por un cuerpo aumenta a medida que aumenta su temperatura. Es la única técnica diagnóstica que permite una visualización instantánea del desempeño térmico de un elemento. De esta forma, mediante el uso de instrumentos capaces de detectar la radiación infrarroja es posible detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en los materiales, así como la presencia de zonas más húmedas. La termografía infrarroja, consiste en producir una imagen visible de radiación infrarroja invisible (para nuestros ojos) emitida por los objetos de acuerdo a su condición térmica. Una cámara termográfica produce una imagen en tiempo real (visualizada como fotografía de la temperatura superficial de un objeto). Las cámaras termográficas calculan la temperatura superficial de cualquier objeto y producen una imagen con colores o tonos de gris que representan el diseño térmico con facilidad.

2.6.2. Ensayos destructivos

Extracción de probetas: Los testigos o probetas de hormigón son una muestra de hormigón ya colocado en la estructura, extraída por medios mecánicos para someter la muestra de hormigón endurecido al ensayo de rotura, mediante la aplicación de carga axial en una prensa destinada a este fin. Con este ensayo se conoce la resistencia real a compresión del hormigón de estudio. También es posible realizar otros ensayos a las muestras extraídas, como porosidad y absorción. Para la realización de este ensayo, se utiliza la norma NC 318: 2003 Hormigón endurecido, extracción y preparación de testigos cilíndricos (ASTM C42-94, MOD) (Figuras 135 y 136). Por lo general, el equipo usado para la extracción es una máquina accionada con motor eléctrico o a explosión, con distintas velocidades de corte. La máquina tiene como herramienta de corte una broca con corona diamantada con diámetro variable, según sean las necesidades de las muestras a extraer. En todos los casos la broca tiene un dispositivo que refrigera el corte del hormigón, limpia la broca y no permite que los materiales tomen temperatura por la abrasión. Los testigos extraídos deben estar libre de defectos.



Fig. 135: Máquina perforadora eléctrica para la extracción de testigos de hormigón, HILTI H1301



Fig. 136: Proceso de extracción de probetas en viga de hormigón armado. Convento de Santa Clara de Asís

Corrosímetros y potenciómetros: Estos equipos permiten estimar la velocidad de corrosión (I_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}) a partir de la conexión directa del electrodo de cobre/sulfato de cobre ($Cu/CuSO_4$) al acero de refuerzo (Figuras 137, 138 y 139). Para la clasificación del nivel de riesgo de corrosión de las armaduras se emplea la Norma ASTM C876, que establece la determinación de la probabilidad de corrosión en función del valor del potencial. Acorde a esta norma, la corrosión solo puede ser identificada con un 90 % de certeza cuando se alcanzan potenciales más negativos que $-350mV$, mientras que la obtención de valores más positivos que $-200mV$ representan una estructura pasiva con riesgo de corrosión menor del 10 % (Figura 140). La clasificación del nivel de riesgo por corrosión de los refuerzos de acero, dictada por la norma ASTM C876 se muestra en la tabla 22.



Fig. 137: Medición de corrosión activa con GECOR 8. Edificio Santo Domingo



Fig. 138: Medición de velocidad de corrosión (I_{corr}) con GECOR 8. Capitolio Nacional

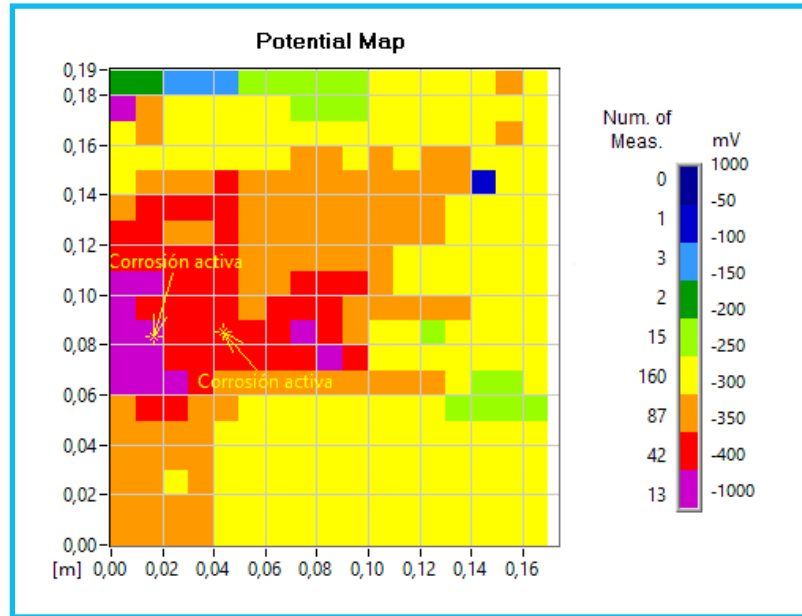


Fig. 139: Mapa de potencial de corrosión (Ecorr) en losa de hormigón armado

TABLA 22: RANGOS DE VALORES DE ICORR EN BARRAS DE ACERO DE REFUERZO

ICORR (MA/CM2)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN
<0.1	DESPRECIABLE
0.1 – 0.5	BAJO
0.5 – 1.0	MODERADO
>1.0	ELEVADO

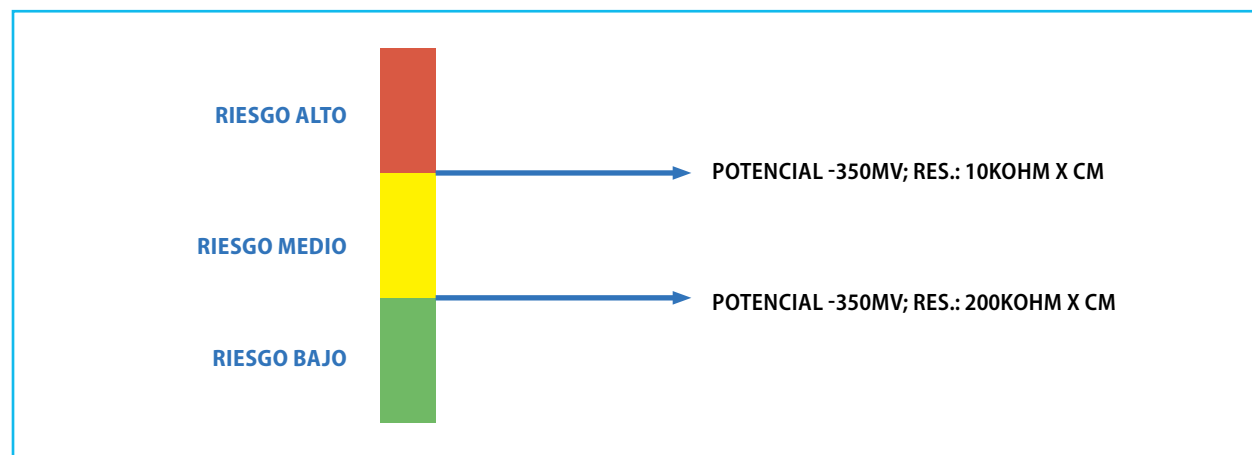


Fig. 140: Rangos de Ecorr y resistividad eléctrica relativos al riesgo de corrosión

Ensayo de Adherencia Pull-Off: Este tipo de ensayo de adherencia por tracción permite transmitir la tensión triaxial directa con un equipo portátil, a un disco previamente adherido al concreto, siempre después de transcurrido un tiempo suficiente para permitir que se haya curado la resina o material adhesivo usado en la fijación del disco. Se soporta este ensayo en el concepto de que la fuerza de tensión necesaria para "jalar" de un disco metálico unido a una capa superficial de concreto, se asocia con la resistencia a la compresión del material, razón por la que el ensayo se realiza con dos propósitos fundamentales: estimar la resistencia

superficial del concreto, y evaluar la resistencia de la unión entre el material de reparación y el concreto reparado (Figura 141).

Durómetro: Es un dispositivo diseñado para medir la propiedad de dureza de distintos materiales como: metales, cauchos, plásticos, elastómetros, entre otros. La dureza es definida como la resistencia a la penetración bajo una carga estática o dinámica del material (Figura 142).



Fig. 141: Equipo Pull-Off digital Proceq DY-216



Fig. 142: Equipo Pull-Off digital Proceq DY-216

Medidor de espesor metálico: Estos equipos se utilizan para determinar mediante pulso ultrasónico el espesor de diferentes materiales metálicos, cuando solo es accesible por una de las caras (Figuras 143 y 144).



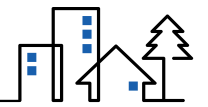
Fig. 143: Equipo medidor de espesor metálico



Fig. 144: Medición *in situ* en acero de refuerzo. Teatro Campoamor

2. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM C876-09. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. 2009.
- Bernardi, Adriana et al. "A Methodology to Monitor the Pollution Impact on Historic Buildings Surfaces: The Teach Project." Euro-Mediterranean Conference, Springer, 2012, pp. 765-775. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_81.
- Berardo, Liliana "Corrosión De Materiales Metálicos." Instituto Nacional de Tecnologías Industriales (INTI), 2011.
- Borges, P. Castro and P. Helene. "Service Life of Reinforced Concrete Structures: New Approach." ECS Transactions, vol. 9, no. 13, 2007, pp. 9-14, doi: <http://dx.doi.org/10.1149/1.2721426>.
- Brimblecombe, P and C. M. Grossi. "Damage to Buildings from Future Climate and Pollution." APT Bulletin, vol. 38, 2007, pp. 13-19.
- Brimblecombe, P. and C. M. Grossi. "Aesthetic Thresholds and Blackening of Stone Buildings." Science of The Total Environment, vol. 349, 2005, pp. 175-189, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.009>.
- Castañeda, A. et al. "Corrosion of Steel Reinforced Concrete in the Tropical Coastal Atmosphere of Havana City, Cuba." Quimica Nova, vol. 36, 2012, pp. 220-229.
- Castañeda, A. "Estudio de la Agresividad Atmosférica de la Ciudad de la Habana y su Influencia en la Corrosión del Acero de Refuerzo en las Estructuras de Hormigón." translated by Grupo de Protección de Materiales, CNIC, 2009, p. 22.
- CC Technologies Laboratories & NACE International 2001. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States." U.S. Federal Highway Administration, 2001.
- Rivera, Cecilia Fonseca et al. "Estado del Clima en Cuba 2020. Resumen ampliado." Revista Cubana de Meteorología, 2021, vol. 27, no. 2, ISSN: 2664-0880
- Corvo, F. et al. "Outdoor-Indoor Corrosion of Metals in Tropical Coastal Atmospheres." Corrosion Science, vol. 50, 2008, pp. 220-230, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.011>.
- Costa, António and Júlio Appleton. "Case Studies of Concrete Deterioration in a Marine Environment in Portugal." Cement and Concrete Composite, vol. 24, 2002, pp. 169-179, www.elsevier.com/locate/cemconcomp.
- CYTED. Manual De Rehabilitación De Estructuras De Hormigón, Reparación, Refuerzo Y Protección. 2003.
- Ebensperger, L and JP Donoso. "Nueva Metodología De Diagnóstico De Estructuras De Hormigón Armado Con Técnicas No-Destructivas." Revista Ingeniería de Construcción, vol. 3, no. 2, 2021, pp. 233-250, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732021000200233>.
- EN 12500. "Corrosion Likelihood in Atmospheric Environment." European Committee for Standardization (CEN), 2000.
- Ghedini, Nadia et al. "Chemical-Thermal Quantitative Methodology for Carbon Speciation in Damage Layers on Building Surfaces." Environmental Science and Technology, vol. 40, no. 3, 2006, pp. 939-944, doi: <http://dx.doi.org/10.1021/es050164l>.
- Grossi, C. M. and P. Brimblecombe. "Past and Future Colouring Patterns of Historic Stone Buildings." Materiales de Construcción, vol. 58, no. 289-290, 2008, pp. 143-160.
- Helene, P. "Estructuras De Concreto. Proyectar Para La Durabilidad." Sociedad Colombiana del ACI, 2014, pp. 1-7. general editor, Sociedad Colombiana del ACI.
- Ho Jae Lee, Do Gyeum Kim, Jang Hwa Lee, Myoung Suk Cho. "A Study for Carbonation Degree on Concrete Using a Phenolphthalein Indicator and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy." World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 6, no. 2, 2012, p. 7.
- Howland, J. J. Desempeño Por Durabilidad De Las Estructuras De Hormigón Armado. Instituto Politécnico de La Habana, 2012.
- ISO 16311-2:2014. "Maintenance and Repair of Concrete Structures- Part 2: Assessment of Existing Concrete Structures." 2014.



- ISO-9223. "Corrosion of Metals and Alloys. Corrosivity of Atmospheres. Classification, Determination and Estimation." International Standard Organization (ISO), 2012-02-01 2012, pp. 1-22.
- Kumar, Prashant and Boulent Imam. "Footprints of Air Pollution and Changing Environment on the Sustainability of Built Infrastructure." Science of The Total Environment, vol. 444, 2013, pp. 85-101, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>.
- Landolfo, Raffaele et al. "Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report." Sustainability, vol. 2, no. 7, 2010, pp. 2163-2175, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su2072163>.
- Meira, G.R. et al. "Modelling Sea-Salt Transport and Deposition in Marine Atmosphere Zone – a Tool for Corrosion Studies." Corrosion Science, vol. 50, 2008, pp. 2724-2731, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2008.06.028>.
- Mohammed Tarek Uddin, Md. Nazrul Islam, Sudhir Kumar Sutradhar, Mohammad Habibur Rahman Chowdhury, Ariful Hasnat, Jamal M. Khatib. "Carbonation Coefficient of Concrete in Dhaka City." Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013, p. 10.
- Moreno, Eric Ivan et al. "Concrete Carbonation in Mexico and Spain: Duracon Project, Four Year Evaluation." Key Engineering Materials, vol. 711, Trans Tech Publ, 2016, pp. 12-20. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.711.12>.
- NACE SP0390. "Maintenance and Rehabilitation Considerations for Corrosion Control of Atmospherically Exposed Existing Steel-Reinforced Concrete Structures." 2009. 21044.
- Norma Cubana. "Nc 120:2014 Hormigón Hidráulico. Especificaciones." Oficina Nacional de Normalización, November 2014 2014, p. 74. ICS: 91.100.30.
- Oroza, Alberto H. and Dainelys Guerra Bouza. "Influencia Del Micro-Ambiente En El Interior De Una Edificación Sobre La Corrosión Del Acero De Refuerzo." Revista CENIC Ciencias Químicas, vol. 46, 2015, pp. 45-55, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181642434007>.
- Oroza, Alberto H. "Impact of Environmental Pollution in the Historical Buildings of Havana. Effect of Future Climate Change." Revista Ingeniería de Construcción, vol. 33, no. 3, 2019, pp. 219-228, doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300219>.
- Ozga, Izabela J. "Multi-Pollutants Impact on Modern Cement Built Heritage." vol. Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias de la Conservación, Universidad de Bologna, 2009, p. CHIM/12. general editor, Prof. Luciano Morselli Prof.ssa Cristina Sabbioni.
- Placeres, Manuel Romero et al. "Contaminación Atmosférica, Asma Bronquial E Infecciones Respiratorias Agudas En Menores De Edad, De La Habana." Salud Pública de México, vol. 46, no. 3, 2004, pp. 222-233.
- Toraya, J. Cuevas 500 Años De Construcciones En Cuba. D.V. Chavín, Servicios Gráficos y Editoriales, S.L., 2001. Servicios Gráficos Y Editoriales, S.L., Chavín.
- Tuutti, K. "Corrosion of Steel in Concrete." Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982, p. 468.
- UNE-EN 206:2013+A1. "Hormigón. Especificaciones, Prestaciones, Producción Y Conformidad." Normalización Española, 2018.
- Urquhart, Dennis C. M. "Historic Concrete in Scotland Part 2: Investigation and Assessment of Defects." edited by National Conservation Center, Historic Scotland, 2014, p. 32.
- Varona, Miriam Martínez et al. "Daily Changes of Air Pollutant Levels in Havana (Cuba)." Higiene y Sanidad Ambiental, vol. 11, 2011, pp. 786-792.

CAPÍTULO IV

ESTUDIOS BIOLÓGICOS A LAS EDIFICACIONES

AUTORES

ALINA ROMEO SÁEZ, BETZAIDA RODRÍGUEZ ROSALES

1. INTRODUCCIÓN

La Biología como ciencia natural, estudia todo lo relacionado con la vida y los procesos biológicos de los seres vivos en diversos campos especializados. Existen referencias de la aplicación de esta ciencia al estudio y conservación del patrimonio cultural desde las últimas décadas del siglo pasado. Sus aportes son continuamente difundidos entre la comunidad científica internacional. Contrario a esto, resulta el desconocimiento por parte de la población, del vínculo que se establece entre las ciencias biológicas y los bienes culturales.

Una de las aplicaciones de las ciencias biológicas está relacionada con la composición y características de los objetos, pues un elevado número de los bienes que conforman el patrimonio cultural, están constituidos por materiales orgánicos que tuvieron su origen en un organismo vivo, ya sea vegetales o animales, por ejemplo, la madera como elemento constructivo en edificaciones. La identificación y caracterización de estos materiales constitutivos en inmuebles es un pilar determinante en las investigaciones históricas y arquitectónicas.

Por otra parte, los organismos vivos pueden representar agentes de deterioro del patrimonio cultural. Los estudios de laboratorio han permitido evidenciar como una gran variedad de especies biológicas, son capaces de crecer y desarrollarse sobre objetos que forman parte del patrimonio cultural, provocando alteraciones mediante procesos químicos y físicos que tienen su expresión en daños estéticos. Las investigaciones en este aspecto, además de la identificación de las especies que afectan los bienes culturales y los factores que favorecen su proliferación, están destinadas a proponer tratamientos certeros y eficaces que permitan el control y erradicación de los agentes biológicos.

El desarrollo de las ciencias biológicas en este siglo ha permitido desplegar otra área de aplicación en el patrimonio cultural, y es que determinadas especies biológicas también pueden emplearse para restaurar. El principal campo de desarrollo ha sido en los materiales pétreos y edificaciones, al valorar las potencialidades que tienen los microorganismos de producir en determinadas condiciones, compuestos que permiten consolidar materiales deteriorados, lo cual se conoce como bioconsolidación.

2. LA MADERA COMO ELEMENTO CONSTRUCTIVO EN LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS

Las edificaciones patrimoniales más antiguas en Cuba generalmente están constituidas por elementos constructivos de madera. Por sus propiedades físicas y mecánicas, su durabilidad, sus valores estéticos y facilidad de trabajo, son utilizadas en elementos estructurales: vigas, vigas principales, pies derechos, vigas que soportan escaleras y balcones, timbas, entre otros. Estas especies maderables también se encuentran como elementos de carpintería: portones exteriores, puertas interiores, marcos de puertas, ventanas y en elementos ornamentales: barandas, balaustres, pasamanos y molduras.

La madera es un material orgánico, anisotrópico, heterogéneo, poroso e higroscópico, compuesto por varios tipos de células que cumplen diferentes funciones en el árbol cuando este vive. Cada especie maderable está caracterizada por ciertas particularidades de naturaleza y disposición de las células que la constituyen.

2.1. Estructura de la madera

Se entiende por madera, desde el punto de vista constructivo, el tronco y las ramas gruesas de los árboles. Sus propiedades físicas y mecánicas varían según la dirección que se considere. Desde el punto de vista físico y mecánico, se consideran tres direcciones principales bien definidas:

- La dirección axial: Paralela a las fibras, es decir, paralela al eje del árbol.
- La dirección radial: Perpendicular a la primera y orientada en la sección recta, según un radio o, dicho de otra forma, perpendicular a los anillos aparecidos en la sección recta.
- La dirección tangencial: Se toma, igualmente, en la sección transversal, tangencialmente a los anillos de crecimiento, o también perpendicular a la sección radial.

Si se analiza la sección de un árbol cortado transversalmente, se observa que está formado por capas concéntricas de naturaleza diferente, cumpliendo cada una de ellas una función en el crecimiento del árbol, y por tanto en la formación de la madera (Figura 145).

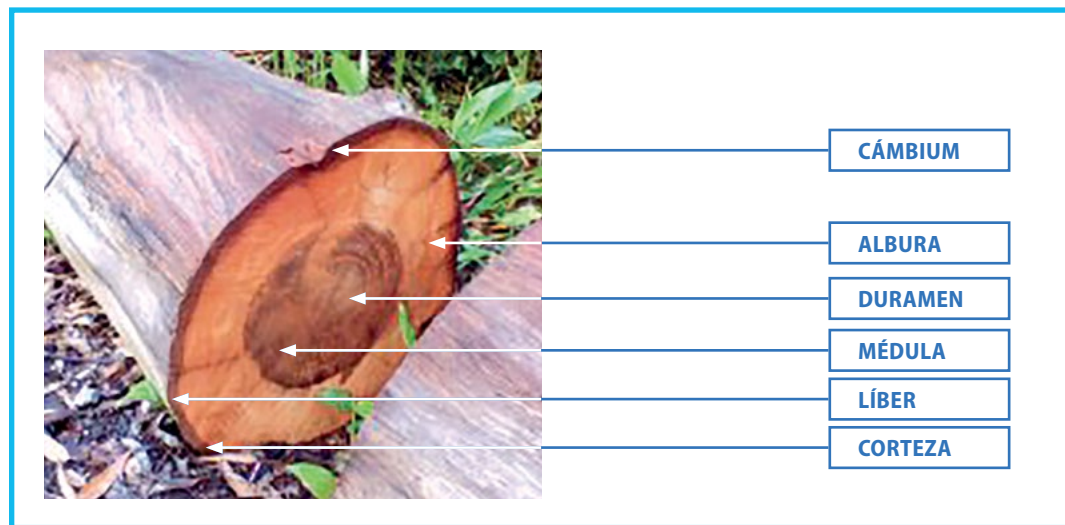


Fig. 145: Estructura del tronco de un árbol, corte transversal

Las diferentes capas que se observan en un corte transversal del tronco de un árbol son las siguientes:

- **Corteza externa:** Es la capa más externa del árbol. Está compuesta por la epidermis, una capa de corcho debajo de ella y una interior, líber. Esta capa sirve de protección contra los agentes atmosféricos.
- **Líber:** Parte interna de la corteza. Es filamentosa y poco resistente. Madera embrionaria viva.
- **Cámbium:** Es la capa que sigue a la corteza y da origen a otras dos capas: la capa interior o capa de xilema, que forma la madera, y una capa exterior o capa de floema, que forma parte de la corteza.
- **Albura:** Es la madera de más reciente formación y por ella viajan la mayoría de los compuestos de la savia. Las células transportan la savia, sustancia azucarada con la que algunos insectos se alimentan. Es una capa de coloración más clara que el duramen, más porosa y ligera.
- **Duramen (o corazón):** Es la madera dura y consistente. Está formada por tejidos que han llegado a su máximo desarrollo y resistencia. Se forma como resultado del proceso de duraminización, que es la transformación de la albura a duramen. Este proceso se caracteriza por una serie de modificaciones anatómicas y químicas de dicha capa. Por ello la madera del duramen posee mayor resistencia mecánica y contra la putrefacción y ataque de insectos que la albura.

- **Médula:** Es la zona central del tronco, constituida por células de paredes finas, la cual es pobre en resina. Madera vieja y normalmente agrietada que posee poca resistencia y se pudre con facilidad, por lo que, generalmente no se utiliza en la construcción ni en los artículos de ebanistería.

2.2. COMPOSICIÓN DE LA MADERA

Principales compuestos químicos: Su composición media se constituye de un 50 % de carbono (C), un 42 % de oxígeno (O), un 6 % de hidrógeno (H) y el 2 % restante de nitrógeno (N) y otros elementos.

Principales compuestos orgánicos: Los componentes principales de la madera son la celulosa, un polisacárido que constituye alrededor de la mitad del material total; la lignina (aproximadamente un 25 %), que es un polímero resultante de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos, la que proporciona dureza y protección, y la hemicelulosa (alrededor de un 25 %), cuya función es actuar como unión de las fibras. Existen otros componentes minoritarios como resinas, ceras, grasas y otras sustancias.

2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA

Densidad: Relación existente entre la masa de la madera y el volumen que esta ocupa ($p = m / V$), para un valor de humedad que generalmente se estima en un 12 %. Según su densidad, las maderas se clasifican desde muy pesadas como el guayacán (1230 Kg/m³), hasta muy ligeras como la balsa (180 Kg/m³). En general, existe una relación bastante constante entre densidad y resistencia mecánica; las maderas más pesadas son, comúnmente, más resistentes.

Contenido de humedad: La madera está compuesta de numerosas células huecas, las cuales presentan pared celular, agua fija, agua libre, diversas sustancias químicas (denominados extractivos) y numerosos espacios internos. La cantidad total de agua que contiene la madera es la que se encuentra unida a las moléculas orgánicas dentro de la pared celular (llamada agua de constitución), y la que se localiza libre en el lumen de la célula (agua de impregnación). El punto de saturación de las fibras (PSF) se define como el punto teórico en el cual las paredes celulares están completamente saturadas y las cavidades vacías, es decir la máxima humedad que tiene la madera sin que exista agua libre. En función de la temperatura y la humedad del aire circundante, la madera se encuentra absorbiendo y perdiendo agua constantemente, hasta alcanzar un valor en que dicho material se encuentre en equilibrio con el medio, valor que se conoce como humedad de equilibrio higroscópico (HEH).

Consecuencias que originan en la madera el aumento de la humedad:

- Variación de la densidad, la madera se hace más pesada
- Variación dimensional (hinchazón-contracción, grietas)
- Pérdida de la resistencia mecánica
- Favorece el crecimiento de bacterias, hongos e insectos deteriorantes a partir del 20 % de humedad en la madera a una temperatura ambiental de 23-30 °C
- Disminución de la durabilidad o resistencia al ataque de organismos xilófagos, sobre todo en aquellas maderas en las que la humedad sobrepasa el PSF

Dureza de la madera: Se refiere a la resistencia de la madera a la penetración de herramientas, clavos, tornillos, etc., lo que depende desde el punto de vista anatómico de la abundancia de fibras y la escasez de vasos en el tejido. Según su dureza, la madera puede clasificarse desde muy duras hasta muy blandas.

Otras propiedades de la madera: Aislante y acondicionador acústico, aislante eléctrico y aislante térmico.

2.4. DURABILIDAD DE LA MADERA

Es la capacidad que posee la madera de resistir o mantener sus propiedades frente al efecto degradativo que originan los hongos e insectos xilófagos, bacterias y factores climáticos, etc, durante un período determinado (Tabla 23).

TABLA 23: CLASIFICACIONES DE LAS MADERAS SEGÚN SU RESISTENCIA Y DURABILIDAD

CRITERIO DE CLASIFICACIÓN	CLAVE	CARACTERÍSTICAS
DURABILIDAD NATURAL	CLAVE 1- MUY DURABLE	MÁS DE 25 AÑOS
	CLAVE 2- DURABLE	10 A 25 AÑOS
	CLAVE 3- SEMIDURABLE	10 A 15 AÑOS
	CLAVE 4- POCO DURABLE	5 A 10 AÑOS
	CLAVE 5- NO DURABLE	MENOS DE 5 AÑOS
RESISTENCIA	CLAVE 1- ALTAMENTE RESISTENTES	PÉRDIDA DE PESO DEL 1 AL 10 %
	CLAVE 2- RESISTENTES	PÉRDIDA DE PESO DE 11 A 24 %
	CLAVE 3- MODERADAMENTE RESISTENTES	PÉRDIDA DE PESO DE 25 A 44 %
	CLAVE 4- NO RESISTENTES	PÉRDIDA DE PESO DE MÁS DE 44 %

Factores que afectan el comportamiento de la madera:

- Defectos de crecimiento: nudos, fibras inclinadas, grietas, cavidad rellena de resina, hendiduras, etc.
- Influencia del contenido de humedad
- Influencia de la temperatura
- La densidad
- Proceso de secado
- Comportamiento ante el fuego
- Agentes degradantes

Con el paso del tiempo, como todo material orgánico, la madera está sujeta a una degradación natural que depende de varios factores, principalmente de las condiciones ambientales en las que se encuentra y sobre todo los agentes biológicos que alteran y degradan su estructura.

Es por ello que se hace necesaria la identificación de la especie maderable a que pertenecen los elementos constructivos en madera, ya sea para sustituirlos por especies con características anatómicas similares, o preservarlas para prolongar su vida útil, su comportamiento ante procesos de secado e impregnación de preservantes químicos. Además, una vez identificada la especie maderable se utiliza el resistógrafo, que es un equipo mediante el cual se puede evaluar el estado de conservación en el interior de la madera, pues permite detectar cavidades y diversos tipos de lesiones en el interior de la madera. El principio se basa en registrar las variaciones en la resistencia aplicada por el material a la broca de acero, a medida que perfora sus elementos anatómicos (Figura 146).



Fig. 146: Resistografía en las vigas. A: Museo Simón Bolívar. B: Convento Santa Clara de Asís

2.5. IDENTIFICACIÓN DE LA MADERA

La identificación de la madera se realiza por el método de la anatomía comparada. Esta tiene como objetivo estudiar las características anatómicas macroscópicas y microscópicas mediante comparación de la especie maderable a identificar, con maderas patrones de referencia, clasificadas dentro de una xiloteca. Para esto se realizan cortes de tejido de las muestras en los tres planos o secciones: transversal, longitudinal tangencial y longitudinal radial, para visualizar los elementos constitutivos de la madera, que los caracteriza por especie.

Los caracteres macroscópicos a evaluar son: color, textura, grano, lustre y presencia de anillos de crecimiento, observados con una lupa de 10x. La observación de los caracteres anatómicos microscópicos se realiza por comparación de los elementos constitutivos de las muestras analizadas, con las descripciones anatómicas de referencia y la clave de identificación reportada.

Las microfotografías se realizan con una cámara digital acoplada a un microscopio óptico de luz. Las imágenes son procesadas posteriormente de forma digital.

Una vez conocida la especie de madera, es necesario documentarse sobre sus propiedades para garantizar que se utilice adecuadamente. Esta información puede obtenerse de las fichas técnicas. Un aspecto a tener en cuenta a la hora de estudiar las propiedades físico-mecánicas de la madera, es la anisotropía de las mismas: diferencias de las propiedades de la madera en las tres direcciones principales (Figura 147).

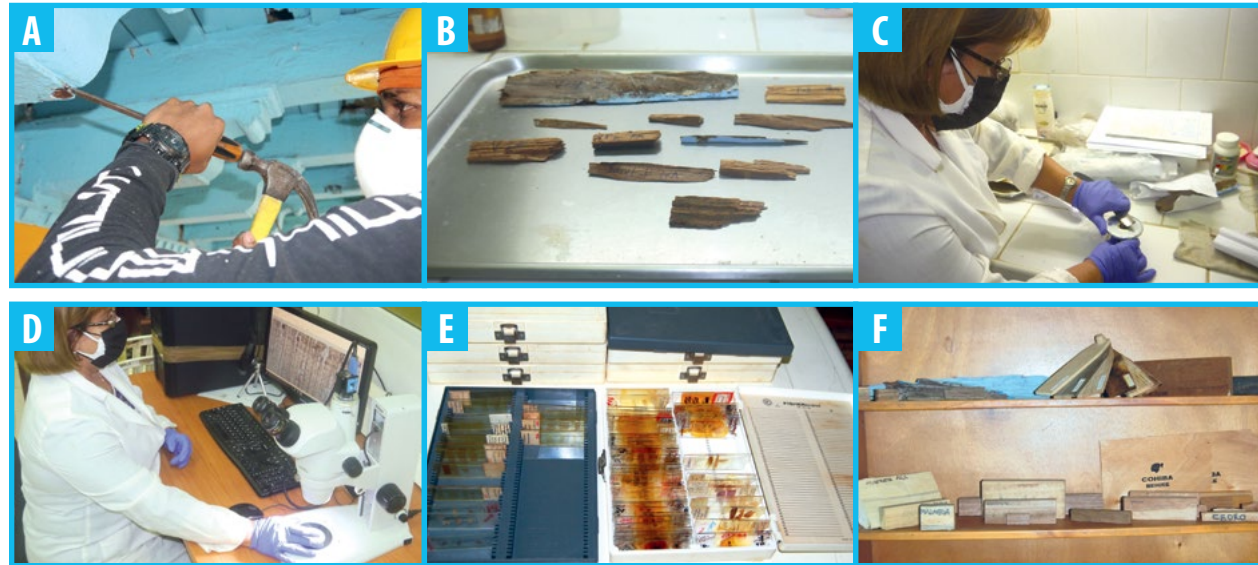


Fig. 147: Identificación de la especie maderable. **A:** toma de muestras. **B:** inspección macroscópica. **C:** cortes histológicos con el micrómetro. **D:** observación al microscopio óptico. **E y F:** xiloteca

A continuación (Tabla 24), se muestran ejemplos de edificaciones de gran valor histórico y arquitectónico, donde se muestrearon los elementos constructivos de madera, para identificarlos anatómicamente.

**TABLA 24: MADERAS IDENTIFICADAS EN CINCO
EDIFICACIONES HABANERAS CONSTRUIDAS EN LOS SIGLOS XVIII, XIX Y XX**

INMUEBLES ESTUDIADOS Y GRADO DE PROTECCIÓN	ELEMENTO CONSTRUCTIVO MUESTREADO	ESPECIES MADERABLES IDENTIFICADAS
CAPITOLIO NACIONAL GRADO DE PROTECCIÓN I SIGLO XX	VIGAS	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO PINUS SP, PINO</i>
	ELEMENTOS DE CARPINTERÍA: PUERTA	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO</i>
	REVESTIMIENTO	<i>SWETENIA MAGAONI, CAOBA</i>
	ENTREPAÑOS DE ESTANTES	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO SWETENIA MAGAONI, CAOBA</i>
	JAMBA DE PUERTA	<i>SWETENIA MAGAONI, CAOBA</i>
CASA NATAL JOSÉ MARTÍ. SIGLO XIX	TIMBA	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO</i>
	VIGA DE ESCALERA	<i>MANILKARA GRISEBACHII, ÁCANA</i>
	PISO DE MADERA	<i>LISYLOMA SABICÚ, SABICÚ</i>
EL TEMPLETE SIGLO XIX	VIGAS	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO MANILKARA GRISEBACHII, ÁCANA</i>
CASA DE DON MATEO PEDROSO. HOY PALACIO DE LA ARTESANÍA SIGLO XVIII	VIGAS	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO MANILKARA GRISEBACHII, ÁCANA</i>
	TABLAZÓN	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO</i>
	TAPAJUNTAS	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO MANILKARA GRISEBACHII, ÁCANA</i>
TORREÓN DE COJÍMAR GRADO DE PROTECCIÓN I SIGLO XVIII	VIGAS	<i>MANILKARA GRISEBACHII, ÁCANA LISYLOMA SABICÚ, SABICÚ</i>
	TIMBAS	<i>CEDRELA ODORATA, CEDRO</i>

Según se muestra en la tabla anterior, las especies maderables de *Cedrela odorata* y *Manilkara grisebachii*, fueron las más utilizadas en elementos estructurales, ornamentales y de carpintería de los inmuebles construidos en los siglos XVIII, XIX y XX. Además, dichos elementos constructivos de madera que no han estado expuestos a elevada humedad, evidencian hasta la actualidad una mayor resistencia al biodeterioro y por tanto su mayor durabilidad natural con el paso del tiempo.

La especie *Manilkara grisebachii* (ácana) se caracteriza por un duramen de color rojo oscuro bien diferenciable de la albura parda oscura, textura fina, grano recto, raramente ondulado, zonas de crecimiento no muy precisas en corte transversal, aspecto ceroso. Muy dura, muy durable. Alta resistencia a la compresión paralela a las fibras. No es fácil de trabajar, pero adquiere buen pulimento (Figura 148).

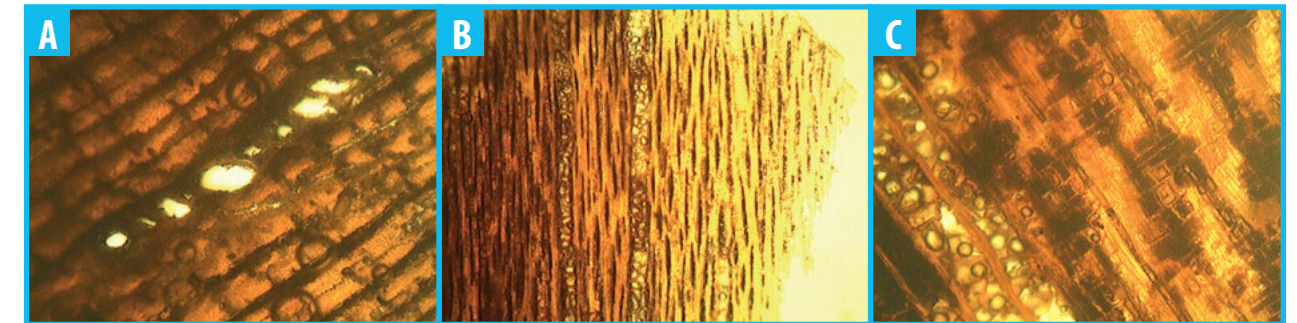


Fig. 148: Cortes histológicos del ácana visto al microscopio óptico 40x. **A:** Transversal. **B:** Longitudinal tangencial. **C:** Longitudinal radial. Palacio del Segundo Cabo

En la especie *Cedrela odorata* (cedro) se observa la albura de color casi blanco a castaño claro, el duramen del castaño claro al rojizo. Textura media, grano recto, zonas de crecimiento visibles, olor agradable y persistente, sabor amargo. Dura, resistente, muy durable. Fácil de trabajar, seca rápidamente sin rajarse (Figura 149).



Fig. 149: Cortes histológicos del cedro vistos al microscopio óptico 40x. **A:** Transversal. **B:** Longitudinal tangencial. **C:** Longitudinal radial. Palacio del Segundo Cabo

3. AGENTES BIOLÓGICOS QUE DETERIORAN LOS MATERIALES CONSTRUCTIVOS DE LAS EDIFICACIONES

Los materiales constructivos de naturaleza orgánica como la madera, y de naturaleza inorgánica como las superficies pétreas: muros, pretilas, cornisas, entre otros, con el pasar de los años envejecen y se exponen a factores degradantes físicos como la radiación ultravioleta (fotodegradación, radiación infrarroja recalentamiento) y el fuego; químicos como ácidos, bases concentradas, óxido de hierro; y biológicos representados por hongos (manchadores y de la pudrición), insectos y bacterias.

En la mayoría de los casos estos factores se encuentran estrechamente relacionados, y de no intervenir a tiempo dichos materiales constructivos, podrían traer como consecuencia la pérdida de sus valores estéticos o de sus propiedades estructurales, a veces irreversible con severas pérdidas económicas. La acción permanente de la humedad en estructuras de madera y elementos pétreos, ya sea por filtraciones o capilaridad, conjuntamente con las elevadas temperaturas son, entre otras, condiciones que favorecen la proliferación de microorganismos y organismos, que con su acción destructiva originan cambios irreversibles en las propiedades de dichos materiales.

Generalmente, estos procesos se producen de forma simultánea pero pueden predominar unos u otros en dependencia de los agentes biodeteriorantes, el tipo de sustrato y las condiciones ambientales. La acción biológica de los organismos puede originar fisuras, pérdidas del material, cambios en la circulación de la humedad, pigmentación y decoloración química en las superficies de los sustratos sobre los que se aíslan. Todos los cambios no deseados en las propiedades del material, causado por la actividad de los organismos vivos, se define como biodeterioro.

3.1. BIODETERIORO DE LA MADERA

3.1.1. Biodeterioros causados por hongos

La madera como sustrato orgánico es más susceptible al daño causado por microorganismos, insectos y por factores climáticos, si se compara con materiales inorgánicos pétreos. Como consecuencia, su biodeterioro puede producirse por agentes microbianos con características metabólicas diferentes y que utilicen celulosa, lignina, hemicelulosas y almidón como requerimientos nutricionales. Su susceptibilidad al ataque depende del contenido de humedad (CH), debido a que es un material higroscópico que alcanza el equilibrio con la HR del ambiente y se produce, generalmente, cuando el CH es superior al 20%. Sin embargo, el desarrollo óptimo de la mayoría de los hongos ocurre si el CH= 30% porque se supera el punto de saturación de la madera.

A través de los procesos físicos los organismos provocan pérdida de cohesión del sustrato debido a la acción mecánica de sus estructuras. Estos ejercen una presión sobre el material y le produce debilitamiento y/o disgregación. Al estar reducido a fragmentos menores, ofrece una superficie mayor a otros factores de degradación. Los procesos químicos traen como resultado la descomposición o la transformación del sustrato como resultado de mecanismos de asimilación o de excreción. En el primero utilizan el material como un requerimiento nutricional, por ejemplo, la excreción de los complejos enzimáticos que les permite utilizar la celulosa y al almidón de la madera como fuentes de carbono.

Entre los organismos que pueden deteriorar la madera con mayor frecuencia se encuentran los hongos xilófagos y los insectos. Los primeros se ubican taxonómicamente en el Phylum Ascomycota y Basidiomycota de las clases Basidiomicetes y Ascomicetes, así como de sus formas imperfectas, los Deuteromicetes. Las especies xilófagas obtienen de la degradación de compuestos orgánicos la fuente de energía y carbono necesaria para su metabolismo. Atendiendo al efecto que producen sobre la madera, algunos autores proponen agruparlos en hongos cromógenos (manchadores, moho, etc.) y hongos de la pudrición (parda, blanca y blanda). Los hongos cromógenos se alimentan de sustancias almacenadas en el lumen y desarrollan diferentes coloraciones. En algunos casos se desarrollan superficialmente sobre la madera, sin afectar las propiedades físicas mecánicas de las células. En este grupo también se encuentran los comúnmente llamados hongos del azulado, debido a la coloración azul-verdosa que producen en las alburas de la madera, fundamentalmente cuando está húmeda.

Los hongos degradadores de la madera como también se les conoce, deterioran la pared celular y provocan pérdida de sus propiedades físicas y mecánicas, los cuales se clasifican en tres categorías:

- **Hongos de la pudrición parda:** Este microorganismo se alimenta principalmente de celulosa, dejando intacta la lignina. La madera afectada por pudrición parda adquiere un color marrón oscuro y se encuentra cuarteada, formando pequeñas formas cúbicas (Figura 150).
- **Hongos de la pudrición blanca:** Degradan tanto la celulosa como la lignina, dejando la madera blanquecina, ligera y con aspecto fibroso e incluso harinoso (Figuras 151 y 152).

- **Hongos de la pudrición blanda:** Estos microorganismos se desarrollan dentro de la pared secundaria de las células leñosas, descomponiendo la madera de forma altamente especializada, tomando un aspecto esponjoso similar al de un queso fresco y cuando se seca, muestra una típica fracturación en forma de cubos, perdiendo densidad y resistencia (Figura 153).

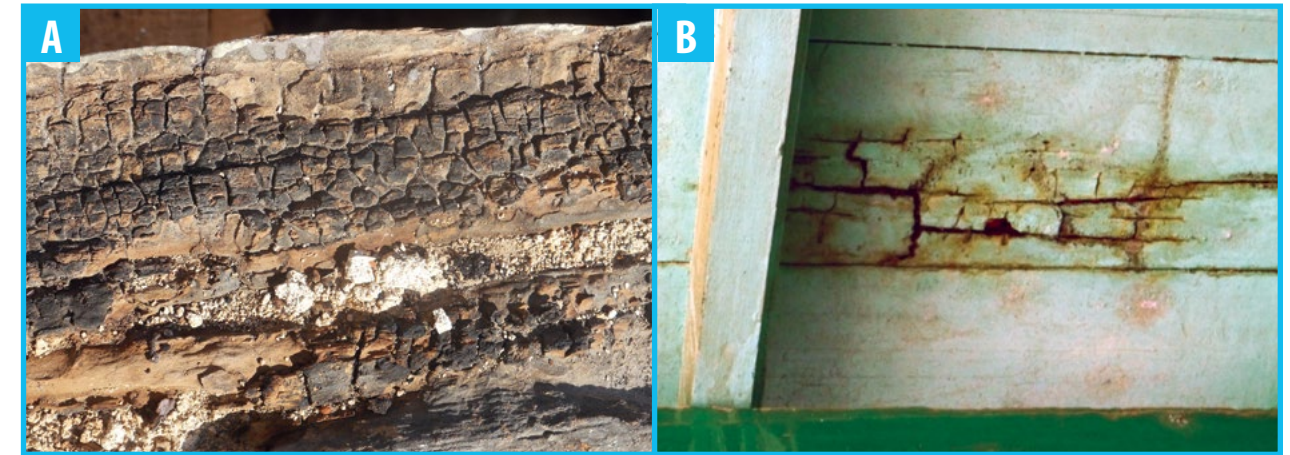


Fig. 150: Maderas atacadas por hongos de la pudrición parda. **A:** Fragmento de madera, Torreón de Cojímar. **B:** Tablas en forjado de cafetería, Quinta de los Molinos

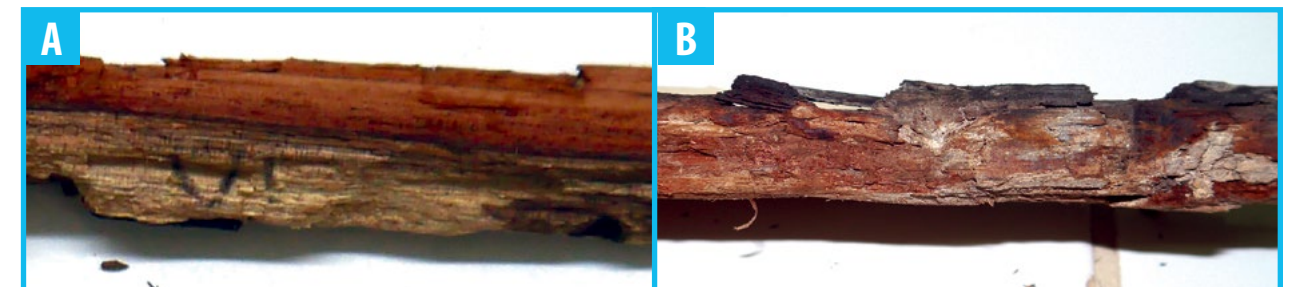


Fig. 151: Maderas atacadas por hongos de la pudrición blanca. **A:** Fragmento de madera con zonas blanquecinas, Capitolio Nacional. **B:** Viga de madera afectada, Casa de Pedroso

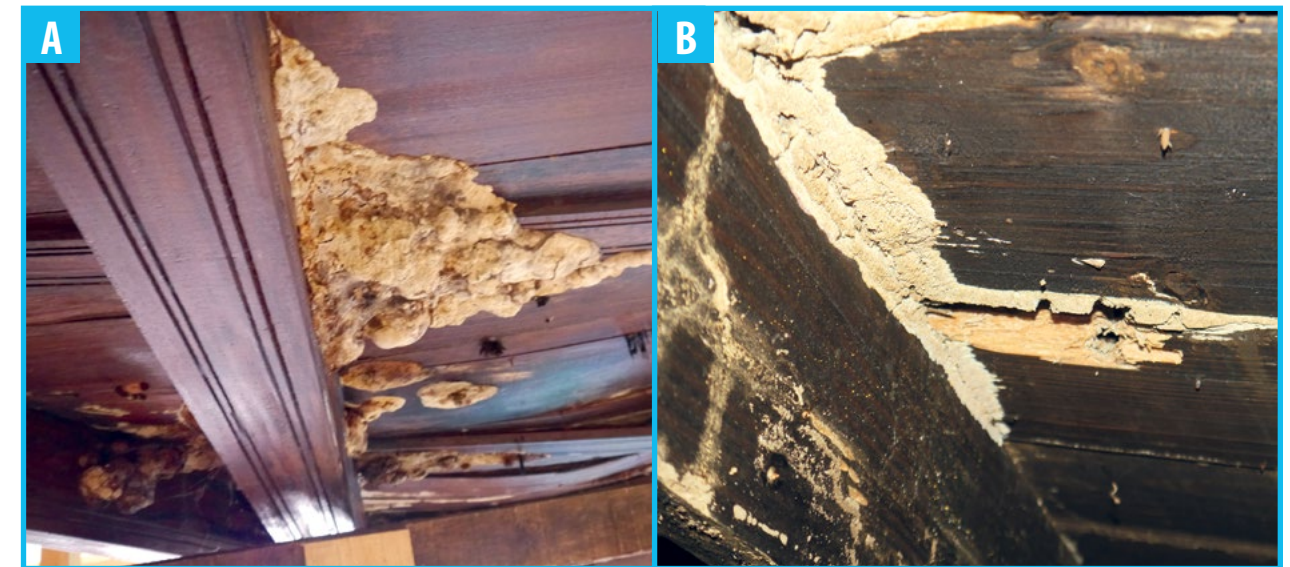


Fig. 152: Cuerpos de fructificación de hongos de la pudrición deteriorando tablas de madera. **A:** El Quitrín. **B:** Empresa TABACUBA

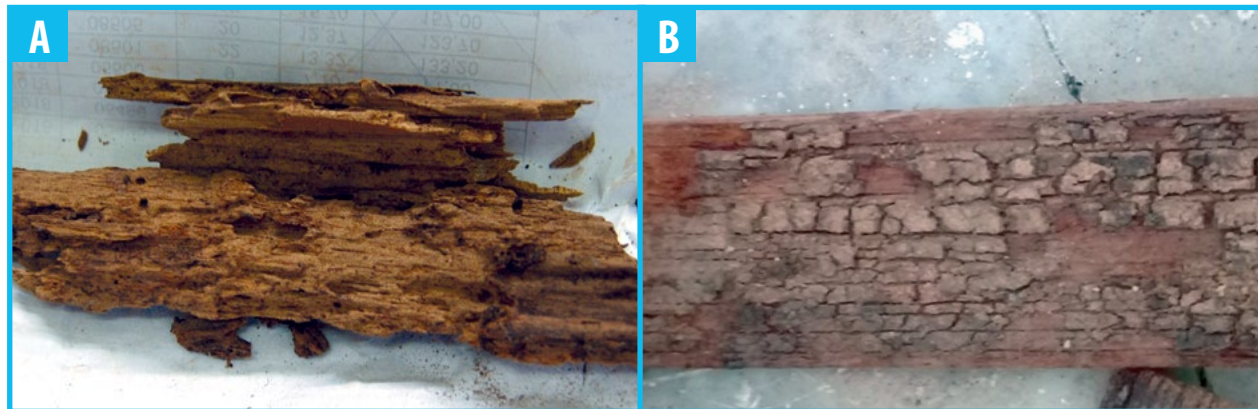


Fig. 153: Maderas atacadas por hongos de la pudrición blanda. **A:** Fragmento de viga de madera de cedro con aspecto esponjoso, Convento de Santa Clara de Asís. **B:** Fragmento de viga de cedro afectada por hongo de la pudrición blanda, Casa del Conde de Lombillo

Para la observación de estructuras de hongos en los elementos estructurales de madera se emplea el microscopio óptico, generalmente a una magnificación de 40x y 100x. Se realizan cortes de tejido en dirección longitudinal tangencial y en dirección radial y se colocan en portaobjetos. Luego se le añaden dos gotas de lactofenol (líquido de montaje para la observación de estructuras fúngicas) a la muestra y se le coloca un cubreobjetos para fijarla (Figuras 154 y 155).

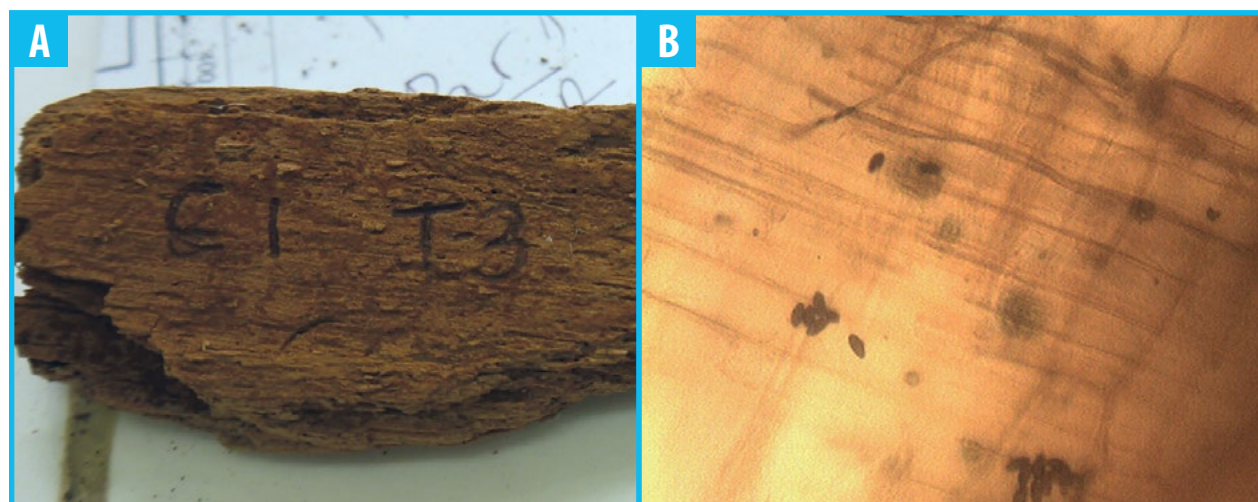


Fig. 154: Maderas del Convento de Santa Clara atacadas por hongos de la pudrición blanda. **A:** Fragmento de madera. **B:** Estructuras fúngicas vistas en corte longitudinal radial, 40x

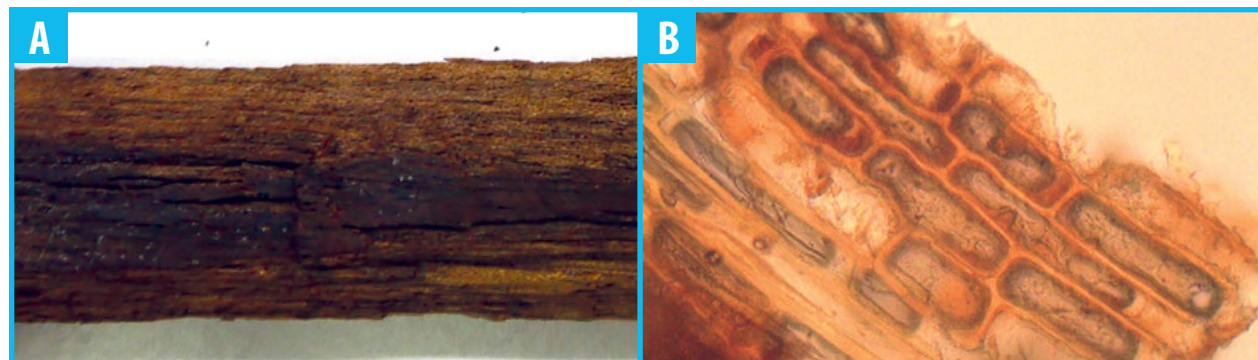


Fig. 155: Hongos de la pudrición parda en vigas del Vestíbulo de Honor del Capitolio Nacional. **A:** Fragmento de viga. **B:** Paredes celulares contraídas, distorsionadas e irregulares en corte longitudinal radial 40x

En los estudios realizados para identificar los hongos presentes en elementos de madera en ocho inmuebles patrimoniales del Centro Histórico de La Habana Vieja, se aislaron representantes fúngicos en todos los casos. Las especies del género *Aspergillus* evidencian una mayor frecuencia relativa de aparición en comparación con otros géneros detectados como *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Nigrospora*, *Mucor* y *Syncephalastrum* (Tabla 25).

TABLA 25: GÉNEROS FÚNGICOS AISLADOS DE VIGAS DE MADERAS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

INMUEBLES ESTUDIADOS	GÉNEROS FÚNGICOS
PALACIO DEL CONDE DE CAÑONGO SIGLO XIX	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>PENICILLIUM</i> , <i>ALTERNARIA</i> , <i>NIGROSPORA</i>
PALACIO DEL SEGUNDO CABO SIGLO XVIII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>MUCOR</i>
MUSEO DE ARTE COLONIAL SIGLO XVIII	<i>ASPERGILLUS</i>
CASA DE DON GASPAR RIBEROS DE VASCONCELOS (EL QUITRÍN) SIGLO XVII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>PENICILLIUM</i> , <i>MUCOR</i> , <i>SYNCEPHALASTRUM</i>
RESTAURANT LOS DOCE APÓSTOLES SIGLO XVII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>PENICILLIUM</i> , <i>PAECILOMYCES</i>
RESTAURANT 1830 SIGLO XIX	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>PENICILLIUM</i> , <i>MUCOR</i>

Los hongos al metabolizar sustancias como la celulosa y el almidón excretan diferentes tipos de ácidos como oxálico, fumárico, succínico y acético. Estos ácidos se depositan sobre la madera y traen como resultado su acidificación. El efecto lítico sobre la madera se debe a la capacidad que tienen de reaccionar directamente con las moléculas del sustrato. Esta excreción puede favorecer el desarrollo de especies acidófilas que no podrían vivir en condiciones de neutralidad o basicidad, y provocar una sucesión ecológica de microorganismos biodeteriorantes.

La acción conjunta de las enzimas y los ácidos excretados por los hongos al degradar la celulosa provocan daños estructurales irreversibles en la madera, relacionados con sus propiedades físicas y mecánicas (Figura 155). Las propiedades físicas (contracción, CH en equilibrio e hinchamiento), y las mecánicas (resistencia a flexión, compresión perpendicular y paralela a la fibra, cortante, tensión y dureza) están estrechamente relacionadas con un fenómeno que ocurre normalmente en la madera y que se denomina "trabajo de la madera". En la madera con un elevado grado de deterioro el "trabajo de la madera" puede afectarse por la reducción de la resistencia mecánica a la tracción, a la compresión y a la flexión. La resistencia mecánica a la tracción puede disminuir hasta un 16 %, la de compresión hasta un 25 % y la de flexión hasta un 17 %. Para las vigas de madera con función de soporte del techo, el debilitamiento o la pérdida de algunas de sus propiedades pueden tener implicaciones estructurales en el inmueble.

3.1.2. Biodeterioros causados por insectos xilófagos

La acción de insectos xilófagos en la madera de las edificaciones merece especial atención por su grave acción destructora. Son muy comunes en los climas tropicales y subtropicales, debido a que requieren condiciones de elevada humedad y temperatura. Los insectos en su ciclo de vida tienen cuatro funciones vitales: alimentación, refugio, reproducción y dispersión. Todas estas funciones se pueden realizar en el interior de los elementos de madera, lo que conlleva al deterioro de la misma. La alimentación produce afectaciones desde el punto de vista mecánico y químico, que conducen a la transformación química del sustrato mediante complejos enzimáticos. Por otra parte, durante el refugio, reproducción y finalmente la salida a la madera para su dispersión, producen alteraciones de naturaleza fundamentalmente mecánica.

Las termitas en Cuba se pueden separar en dos grupos:

- **Termitas subterráneas:** *Coptotermes gestroi* y *Heterotermes sp.*, de la familia Rhinotermitidae y *Nasutitermes costalis*, conocido como comején de bola, de la familia Termitidae
- **Termitas de la madera seca:** *Cryptotermes brevis* de la familia Kalotermitidae.

Las termitas subterráneas realizan sus nidos enteramente o parcialmente bajo tierra. Permanecen ocultas y protegidas. Tienen fototropismo negativo (huyen de la luz), por lo que acceden a la madera de las edificaciones (vigas, marcos de puertas y ventanas, zócalos, muebles adosados, etc.), desde el interior y atravesando muros y paredes, en algunos casos, en paredes muy duras o cuando precisan intercambios de humedad y/o temperatura. Salen al exterior de los muros, formando unos túneles característicos, compuestos de los restos de los materiales constructivos y excrementos cementados por saliva que segregan las obreras. Estos insectos dañan severamente, al inicio de su colonización, las estructuras de madera que estén en contacto con el suelo, pero al cabo del tiempo estos pueden alcanzar incluso las estructuras altas del inmueble.

Los nidos de estas termitas están constituidos por varios compartimentos conectados por diferentes galerías del material constructivo del lugar donde se encuentren estos insectos. Estos compartimentos son abandonados si no encuentran recursos alimentarios suficientes, o si están buscando condiciones ambientales más propicias (humedad) para su desarrollo. Por tanto, se producen desplazamientos poblacionales en función de las necesidades de alimentación o de las condiciones de humedad.

Las termitas de madera seca son bien diferentes de las subterráneas. Estas son totalmente independientes del suelo y comienzan su colonización en la madera desde el aire, y realizan su nido totalmente dentro de la madera. Excavando sus galerías puede observarse que están secas y contienen abundantes gránulos pequeños fecales, de consistencia dura y bien seca, conocidos como pellets.

Estos insectos contienen solo dos castas de adultos, que son los reproductores y los soldados. Como no tienen obreras, el trabajo en la colonia lo realizan las ninfas jóvenes. La identificación de las termitas subterráneas y de madera seca se basa en la observación de las características anatómicas de los soldados de estas castas sociales (Figuras 156 y 157).



Fig. 156: Microfotografías de soldados de termitas subterráneas vistas en microscopio a 10x. **A:** *Coptotermes gestroi*. **B:** *Heterotermes sp.* **C:** *Nasutitermes costalis*

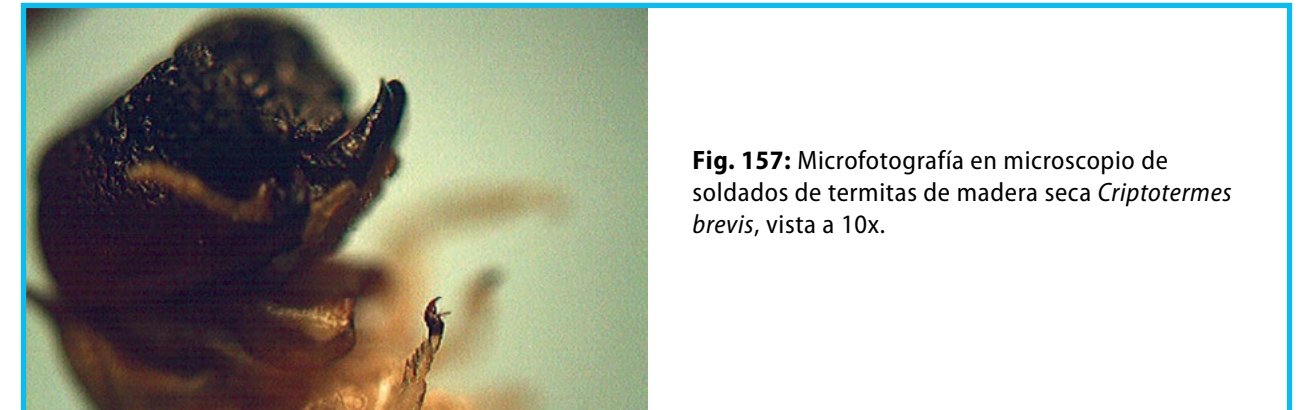


Fig. 157: Microfotografía en microscopio de soldados de termitas de madera seca *Cryptotermes brevis*, vista a 10x.

Las carcomas son también insectos xilófagos del orden de los coleópteros, y entre ellos se encuentran los que pertenecen a la familia Anobidae. Es una plaga muy común en piezas de madera: estructuras de edificios, carpintería, mobiliario, etc. Su acción puede ser devastadora en obras de arte como tallas, retablos, marcos, bastidores, etc. Además, prefieren la madera húmeda y su presencia se reconoce fácilmente por los orificios visibles en la superficie y por el serrín que sale de ellos (Figura 158).



Fig. 158: Ataque de anóbidos en Salón del Trono del Palacio de los Capitanes Generales. **A:** Cúmulo de fragmentos originados por los anóbidos en el piso del local. **B:** Adulto de anóbido. **C:** Galerías de anóbidos en la moldura protectora.

Estos insectos son de ciclo larvario. Las hembras ponen sus huevos en las superficies rugosas de la madera, en fendas, e incluso en antiguos orificios de salida. Después de 4 - 5 semanas nacen de los huevos pequeñas larvas blanquecinas y arqueadas que penetran en la madera, perforando mediante sus potentes mandíbulas, galerías paralelas a la fibra y de sección circular, lo que hacen durante la mayor parte de su vida.

En su última etapa se transforma en coleóptero. Es entonces cuando para salir realiza un orificio hasta la superficie. Ello suele ser en los meses cálidos del año, entre abril y septiembre. Tiene cierta capacidad de vuelo, por lo que puede depositar sus huevos en otros lugares, completando así el ciclo.

En ocasiones, la plaga parece estar latente porque no se ven agujeros nuevos, pero en realidad las larvas siguen royendo el interior. La duración del ciclo vital varía según la especie, las condiciones exteriores (humedad y temperatura), y las propiedades nutritivas de la madera. Suele ser de un año, pero pueden llegar hasta 3 o 4 años.

Otros de los agentes biológicos que afectan las estructuras de madera son los coleópteros xilófagos llamados escarabajos del polvo, líctidos, pertenecientes a la familia Lyctidae, que convierten la madera en polvo fino y blanco. Son capaces de atacar madera seca pero principalmente la madera de la albura, la que contenga un buen contenido de almidón. Las larvas de estos insectos asimilan la parte de almidón, y expulsan la celulosa y la lignina.

Esta familia produce poros con diámetro lo suficientemente anchos para permitir la colocación de los huevos por la hembra. Las larvas emergidas por los adultos en dichos poros, perforan túneles a través de la albura de la madera y si no es tratada con productos químicos, estos convierten la madera en polvo al cabo de los años. Ellos van dejando una fina capa de la superficie de la madera, de tal manera que no se detecta el daño hasta que los adultos perforan la superficie para emerger con el fin de dispersarse e infestar otras piezas de madera (Figura 159).

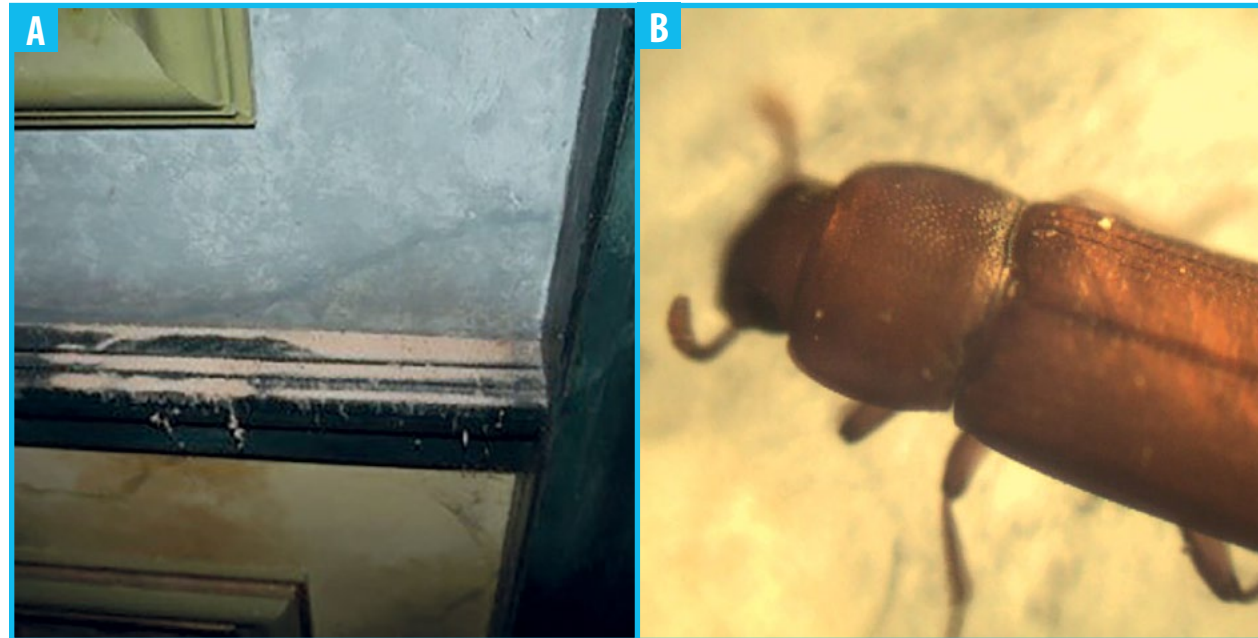


Fig. 159: Ataque de líctidos Salón del Trono del Palacio de los Capitanes Generales. **A:** Abundante serrín muy fino. **B:** Adulto de líctido

Una técnica moderna para detectar insectos xilófagos en el interior de la madera es la del sensor acústico. Este equipo es capaz de percibir ruidos o vibraciones dentro de un material, ya sean provocados por la flexión de materiales, circulación de agua, como la vibración de conductores eléctricos, etc. Su gran sensibilidad permite una inspección rápida y precisa, que requiere pocos puntos de observación para la localización de galerías, así como de antesala para otros ensayos (Figura 160).

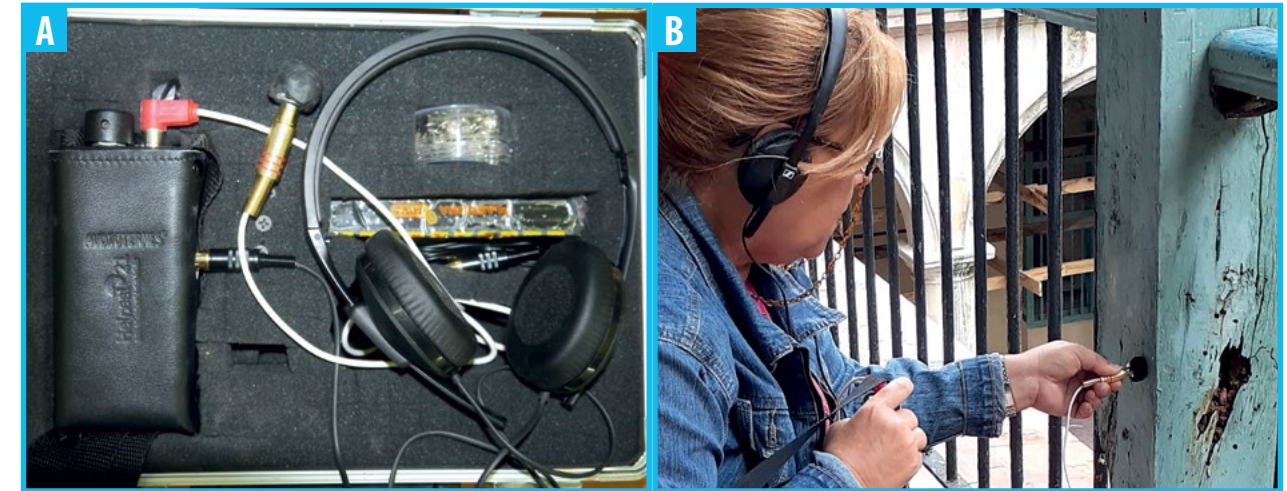


Fig. 160: Utilización de sensor acústico para detectar insectos. **A:** Equipo Audietermes Helpest 2. **B:** Monitoreo de pie derecho con el detector acústico. Convento de Santa Clara de Asís

La monitorización mediante los sistemas de cebos permite detectar la presencia de termitas en los inmuebles. El ensayo se realiza con el objetivo de localizar nidos de termitas subterráneas. Los contenedores, de pared o de suelo, que incluyen celulosa (el alimento principal de las termitas), se monitorean periódicamente y existen diferentes sistemas estación de cebos (Figura 161). Además, el mismo sistema puede ser empleado posteriormente como método de control, si se encuentran termitas, se sustituye la celulosa pura por el cebo impregnado con el producto (Diflubenzuron), que inhibe la síntesis de la quitina de las termitas, que, tras ser consumido y repartido lentamente por toda la colonia, incluida la reina, hace que en el proceso de muda mueran los individuos, lo que termina por aniquilar a la colonia.



Fig. 161: Tipos de sistema de cebos. **A:** Estación Green Eye para detección temprana. **B:** Estación de suelo para tierra y hormigón. **C:** Estación de pared para localizar las termitas en el interior de la edificación

3.2. BIODETERIORO DE MATERIALES PÉTREOS

El deterioro de monumentos pétreos constituye uno de los aspectos más interesantes de aplicación de los estudios microbiológicos. Se incluye el estudio de lesiones no detectables que comprenden formación de fisuras capilares y microfisuras dentro del material, que terminan por reacciones químicas en el debilitamiento de la cohesión de los componentes. Con el tiempo este deterioro se hace visible, formándose grietas, fisuras y escamas que terminan en la ruptura de la superficie, pulverización y desmoronamiento de las partes internas, causando la deformación de la piedra.

La naturaleza química de la piedra, su estructura física y su origen geológico determinan que el material se deteriore por diferentes agentes de origen biológico. Para nombrarlas se utiliza el término de biorreceptividad, que no es más que la aptitud de un material para ser colonizado por uno o distintos grupos de organismos. Para que ocurra la colonización el material debe cumplir las condiciones adecuadas para albergar, desarrollar y multiplicar el organismo. Esto excluye la capacidad del material para

recibir organismos de manera fortuita y que permanecen inactivos. En otras palabras, biorreceptividad es la totalidad de propiedades del material que contribuyen a la colonización, establecimiento y desarrollo de los diferentes organismos biológicos.

La acción de los organismos sobre los edificios pétreos puede ser muy variada y esencialmente se divide en dos grupos:

- **Procesos biogeofísicos:** Fenómenos puramente físicos, como la acción de las raíces de plantas, que pueden introducirse por las grietas o por las juntas de las edificaciones, o afectar a las cimentaciones.
- **Procesos biogeoquímicos:** Efectos químicos o físicos-químicos donde se incluyen todos los mecanismos que ocasionan la descomposición o la transformación del sustrato debido a la actividad química de los organismos, ya sea mediante procesos de asimilación (los organismos usan el material no pétreo como fuente nutricional, como fuente de carbono o energía liberada gracias a la actividad enzimática que poseen), o procesos de excreción en los cuales el material es dañado por la excreción de productos metabólicos intermediarios o finales entre los que caben destacar: la producción de ácidos orgánicos e inorgánicos (fórmico, acético, butírico, láctico, succínico, glucónico), formación de sustancias quelantes, liberación de enzimas y la liberación de pigmentos.

Los organismos involucrados en los procesos de biodeterioro incluyen desde bacterias fototróficas del tipo de las cianobacterias, bacterias heterotróficas como las bacterias acidificantes, hongos, líquenes, musgos, plantas superiores y finalmente animales. Las cianobacterias por sus características metabólicas (fototróficas y autotróficas), son generalmente las colonizadoras primarias de la piedra, sirviendo luego como fuente de carbono para el crecimiento de las comunidades bacterianas y fúngicas heterotróficas.

Las comunidades microbianas asociadas al biodeterioro de la piedra crecen formando biopelículas, constituidas por células microbianas, material polimérico extracelular de naturaleza polisacárida, material particulado diverso y agua, formando así películas mucilaginosas, altamente adherentes al sustrato al cual no solo degradan, sino que lo afectan estéticamente. La formación de biopelículas comienza con la adhesión inicial de los microorganismos a la superficie. La multiplicación de las células adheridas da lugar a microcolonias que contienen grandes cantidades de exopolímeros. La producción de exopolímeros y otros exudados estimula la respuesta a la densidad celular mediante señales células-células. La matriz de polímeros extracelulares está compuesta principalmente por una variedad de polisacáridos, y tiene diversas funciones como la protección de la desecación, radiaciones, erosión y desinfectantes, y como una magnífica reserva de carbono orgánico y nutriente (Figura 162).



Fig. 162: Biopelícula en la base de una columna. Casa Simón Bolívar

Las cianobacterias y las algas, tales como clorofitas, crisofitas y diatomeas, forman costras pigmentadas que afectan al sustrato estéticamente y provocan deterioro físico y químico de la roca. Su presencia se reconoce a través de la formación de biopelículas. Las cianobacterias epilíticas juegan un papel importante en la disolución del carbonato de la roca caliza, lo que puede provocar el desprendimiento de partes de la misma, debido a una disminución en la adherencia de los cristales alrededor de las colonias (Figura 163).



Fig. 163: Crecimiento de algas y cianobacterias en el nicho de la Basílica de San Francisco de Asís

Las bacterias son un grupo de organismos procariotas, unicelulares, de variadas formas (esféricas, bacilar o espiral), las que pueden ser autótrofas o heterótrofas. Debido a sus sencillos requerimientos ecológicos y nutricionales se desarrollan fácilmente en el exterior de objetos de piedra y monumentos, especialmente en los lugares de la superficie donde existe un elevado contenido de agua. Las bacterias son pequeñas y su presencia en la piedra es normalmente determinada microscópicamente o por cambios químicos causados en la misma. Se ha comprobado que algunas producen pérdida de peso, disminución del pH y liberación de calcio y silicatos solubles. En los procesos de biodeterioro intervienen bacterias quimiolitotróficas, autótrofas y heterotróficas.

Los hongos constituyen un grupo de organismos quimioheterótrofos caracterizados por sus hifas filamentosas unicelulares o pluricelulares. Ellos carecen de clorofila y por tanto de la capacidad de sintetizar sus propios alimentos usando la energía solar, pero se pueden desarrollar con muy poca cantidad de materia orgánica en descomposición, como la que se acumula en la superficie de los edificios.

Estos organismos a pesar de que son heterótrofos a veces pueden ser aislados de materiales pétreos alterados, especialmente en las regiones tropicales o cuando las condiciones de humedad relativa y temperatura son elevadas. Asimismo, su proliferación depende del pH, por lo que es frecuente encontrarlos en el interior de las piedras donde se produce ácido sulfúrico, carbónico, etc. Las calcáreas o las piedras que en su composición mineralógica contienen carbonato de calcio (CaCO_3) son las más sujetas a este tipo de destrucción. La piedra de origen inorgánico por ella misma no favorece el crecimiento de los hongos, pero la presencia de residuos orgánicos en ella sí promueve el desarrollo de estos microorganismos.

Estudios realizados demuestran que los hongos pueden degradar la piedra por vía química o mecánica. El deterioro biofísico ha sido demostrado por la extensiva penetración de la hifa fúngica en el interior de la piedra caliza, lo cual puede visualizarse mediante la presencia de puntos, en ocasiones microscópicos, denominados también con el término proveniente del inglés "pitting". Algunos hongos endolíticos han sido reportados por producir picaduras en la piedra a través de su acción química, mientras que la acción bioquímica a través de la producción de diversos ácidos (oxálico, cítrico, succínico, acético y otros), parece ser uno de los

procesos más importantes de degradación. Además, los pigmentos producidos por el micelio filamentoso originan un cambio de coloración o manchas en las partes expuestas de la piedra, lo cual permite reconocer su presencia.

En la tabla 26 se muestran los géneros fúngicos aislados de biopelículas detectadas en diferentes inmuebles. En edificaciones y monumentos de piedra, con abundante contenido de carbonato de calcio, se ha demostrado que los géneros fúngicos que se encuentran en mayor proporción corresponden a *Aspergillus*, *Penicillium* y *Cladosporium*.

TABLA 26: GÉNEROS FÚNGICOS AISLADOS EN MATERIALES PÉTREOS DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE LA HABANA

INMUEBLES ESTUDIADOS	GÉNEROS FÚNGICOS
PALACIO DEL CONDE DE CAÑONGO SIGLO XIX	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> <i>PENICILLIUM</i>
FORTIFICACIÓN DE SANTO DOMINGO DE ATARÉS SIGLO XVIII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> <i>PENICILLIUM</i> , <i>ALTERNARIA</i> , <i>NIGROSPORA</i> <i>FUSARIUM</i>
MUSEO DE ARTE COLONIAL SIGLO XVIII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>PENICILLIUM</i> , <i>FUSARIUM</i>
HOSTAL CONDE DE VILLANUEVA SIGLO XVI	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>ALTERNARIA</i> , <i>NIGROSPORA</i>
BASÍLICA DE SAN FRANCISCO DE PAULA SIGLO XVII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>ALTERNARIA</i> , <i>NIGROSPORA</i>
BASÍLICA DE SAN FRANCISCO DE ASÍS SIGLO XVII	<i>ASPERGILLUS</i> , <i>CLASDOSPORIUM</i> <i>PENICILLIUM</i>
COLEGIO DE SAN GERÓNIMO SIGLO XX	<i>CLASDOSPORIUM</i> , <i>PENICILLIUM</i>

Los líquenes están asociados con el deterioro de la roca de una manera similar a los musgos y a las plantas superiores. Por ejemplo, en el mármol los líquenes endolíticos pueden secretar ácido oxálico que lo atacaría, precipitando como oxalato de calcio dihidratado y formando una pátina de oxalato. Este mecanismo de biodeterioro le fue atribuido también a las cianobacterias. Su presencia se manifiesta en forma de incrustaciones, manchas, y punteaduras (*pitting*) (Figura 164).

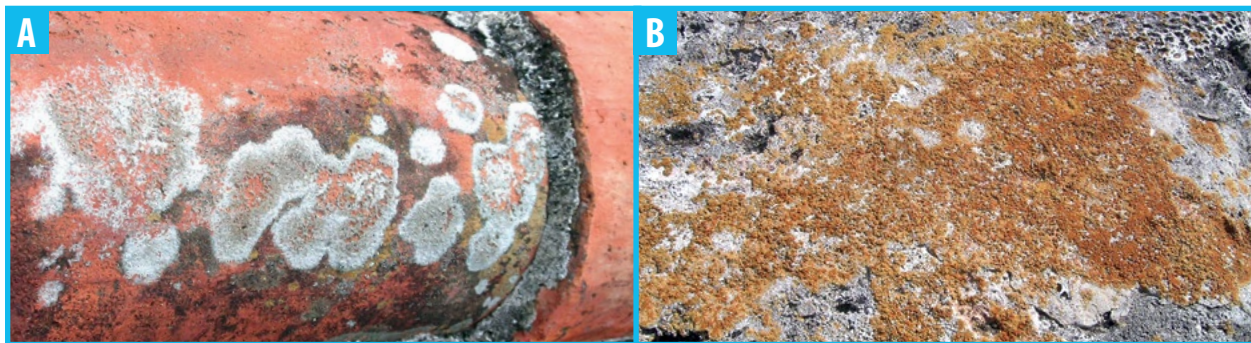


Fig. 164: Crecimiento de líquenes. A: Tejas del Museo de Arte Colonial. B: Pretel de la Basílica de San Francisco de Asís

Los musgos a través de los rizoides, pueden penetrar en la roca provocando agujeros. La acción de las plantas vasculares en el deterioro de la roca puede ser mecánica, a través del crecimiento de raíces, o química, por la acidez de las raíces y diversos exudados.

Las plantas invasoras que se desarrollan en las edificaciones contribuyen al deterioro químico del sustrato en que crecen, debido a la acidificación del medio y la excreción de sustancias quelantes que forman sales con los minerales de los elementos pétreos. La acción mecánica es la más importante pues a medida que estos organismos vivos crecen en longitud y grosor, el sistema radical va ganando en extensión y profundidad, lo que ocasiona notables daños que comprometen la estabilidad de estos elementos en obras de carácter patrimonial.

Las semillas del grupo de especies de plantas presentes en los entornos de los inmuebles, se dispersan fundamentalmente por zoocoría, es decir, son transportadas por aves que las depositan en fisuras o grietas presentes en los elementos constructivos. Esto ocurre principalmente en zonas donde existe retención de humedad y agentes contaminantes sobre el sustrato erosionado, que incluyen los agentes biológicos (musgos y líquenes), y microbiológicos (cianobacterias, esporas fúngicas, polen, micro-algas, etc.).

Las plantas que crecen sobre los diferentes elementos constructivos, en fisuras y grietas de aleros, pretilos, muros, en la base de las columnas, entre otros de cada edificación, se clasifican según su porte biológico en herbáceas, arbustivas y arbóreas, siendo estas últimas las de mayor potencial deteriorante. Para identificar la vegetación se colectan y fotografían las plantas presentes en los elementos constructivos de las edificaciones y se comparan con ejemplares referidos en estudios anteriores, como plantas epilíticas de inmuebles patrimoniales habaneros.

En el caso de las plantas de porte arbóreo, la acción devastadora del sistema radical de las especies identificadas, muestra que los daños que ocasionaron a los elementos constructivos son de gran envergadura. Además, el follaje y las potentes raíces de las especies del género *Ficus*, que crecen en las edificaciones estudiadas, contribuyen al aumento local de la humedad en sus alrededores, y propicia la implantación y el crecimiento de otras especies, lo que refuerza el efecto antiestético producido y sobre todo el deterioro de los inmuebles.

A continuación, se relacionan algunas de las plantas invasoras identificadas que se encuentran deteriorando los elementos constructivos de los inmuebles estudiados (Figura 165).

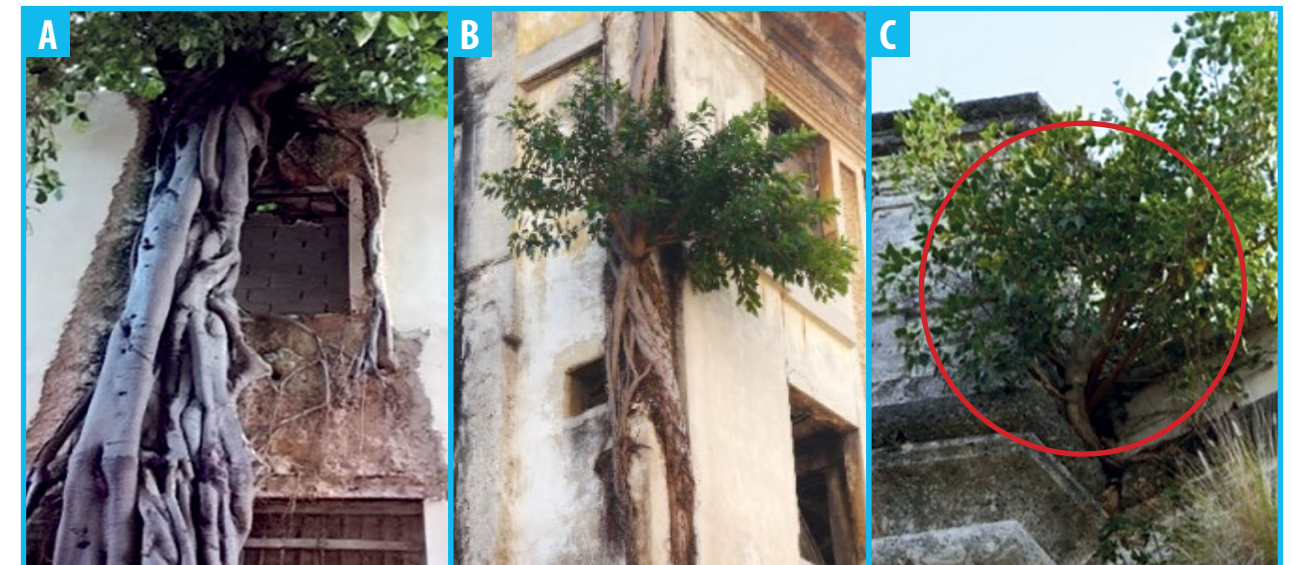


Fig. 165: Crecimiento de plantas en edificios históricos. A: *Ficus jagüey*, Convento Santa Clara de Asís. B: *Ficus benjamina* (laurel), Teatro Campoamor, C: *Ficus religiosa*, álamo en Castillo de Atarés

Las palomas y gorriones que utilizan para nidificación y refugio los techos de las edificaciones, originan con sus excrementos suciedad, fetidez y ocasionan un daño estético a la piedra, sin embargo, producen

también un daño químico mucho más agresivo fundamentalmente en las zonas horizontales, donde la deposición es mayor.

Los excrementos aportan además sustancias orgánicas que pueden ser utilizadas como nutrientes por microorganismos heterótrofos (bacterias, actinomicetos y hongos), con potencial biodeteriorante tanto para la piedra como para la madera. Esto conlleva a problemas de naturaleza estética e higiénica que también pueden afectar la salud humana (Figuras 166 y 167). La piedra deteriorada presenta mayor porosidad, por tanto, es más vulnerable a los procesos de degradación físicoquímicos que el material que no ha sufrido daño.



Fig. 166: Pichones de palomas y suciedad en la ménsula. Palacio de los Capitanes Generales

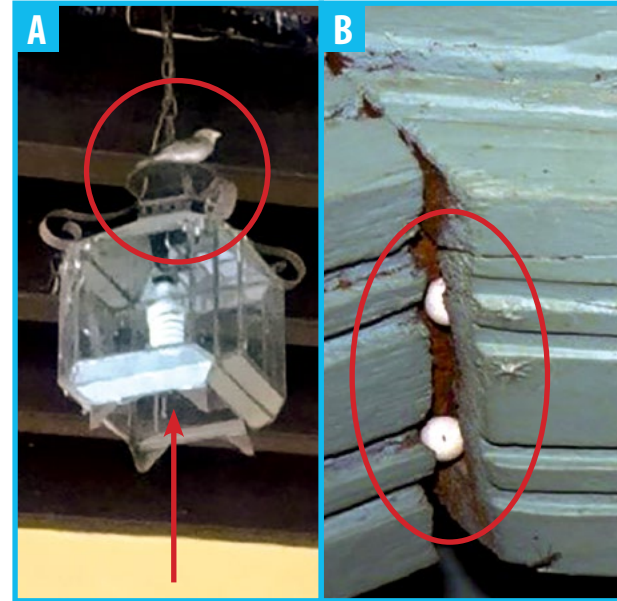


Fig. 167: Excretas de gorriones. Posturas de gorriones en la unión entre vigas de madera. **A:** Restaurante La Mina. **B:** Convento de Santa Clara de Asís

Otros de los agentes biológicos que contribuyen al deterioro de las edificaciones son los murciélagos, debido a que excretan ácidos (úricos, fosfóricos y nítricos), que reaccionan con la piedra y la madera, los cuales pueden inducir a la formación de sales produciendo efectos corrosivos y creando además problemas de naturaleza estética e higiénica, que además pueden afectar la salud humana (Figuras 168 y 169).



Fig. 168: Murciélagos en el coro alto del Convento de Santa Clara de Asís



Fig. 169: Excretas de murciélagos afectando los muros del coro alto del Convento de Santa Clara de Asís

4. METODOLOGÍAS APLICADAS PARA LA IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AGENTES BIOLÓGICOS

Conocer los agentes biológicos causantes de las alteraciones, así como los procesos y mecanismos es de gran valor para los conservadores y científicos de la conservación. Las formas de biodeterioro dependen del tipo de organismo involucrado, por tanto se hace necesario un análisis cualitativo de las muestras, es decir, la identificación de microorganismos presentes en las mismas, así como un análisis cuantitativo, que permita conocer la densidad microbiana, para determinar si juega un papel importante en el proceso de biodeterioro.

Por esta razón, se necesitan métodos apropiados para la detección y evaluación de los procesos de biodeterioro, entre los que se encuentran los análisis bioquímicos y microbiológicos. Organismos como bacterias, actinomicetos, hongos y algas no son fáciles de identificar a través del examen visual directo, por lo que su estudio incluye aislamiento, identificación y caracterización de los mecanismos de reacción de cada uno de ellos, para lo cual se requiere de la toma de muestras de las superficies que colonizan y en las cuales pueden desarrollarse.

4.1. TOMA DE MUESTRAS MEDIANTE HISOPADO DIRECTO

Este método es aplicable a superficies orgánicas e inorgánicas y permite el aislamiento de los microorganismos presentes en las alteraciones de origen biológico. El hisopo humedecido se frota fuertemente, con una ligera rotación, sobre la zona que se quiere examinar para tratar de arrastrar la mayor cantidad de microorganismos al hisopo. La superficie puede ser enmarcada con una plantilla estéril de área conocida. Los resultados se expresan después de realizar el procesamiento del hisopo de muestreo. La toma de muestra se realiza en aquellos lugares donde es evidente la alteración del sustrato, donde hay costras o biopelículas visibles (Figura 170).



Fig. 170: Detalle de zonas muestreadas mediante hisopado. Convento de San Francisco de Asís

4.2. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS TOMADAS MEDIANTE EL MÉTODO DEL HISOPADO DIRECTO

Este método permite aislar y cuantificar los microorganismos que pueden estar presentes en la superficie muestreada por el hisopo. Aislar en un medio de cultivo mediante diluciones de la muestra, los microorganismos presentes en las superficies con alteraciones de posible origen biológico. A partir de este procesamiento se realiza la depuración de cada uno de los microorganismos aislados para obtener colonias individuales y caracterizarlas desde el punto de vista fisiológico (Figuras 171 y 172).

Por otra parte, para cuantificar la cantidad de microorganismos se cuentan las colonias por placa. En el cálculo hay que considerar la cantidad de muestra inoculada y la dilución en la que se contaron las colonias. La concentración se expresa en unidades formadoras de colonias (UFC) por cm² de superficie muestreada (si se muestreó con una plantilla de superficie conocida), o por mililitros (mL).

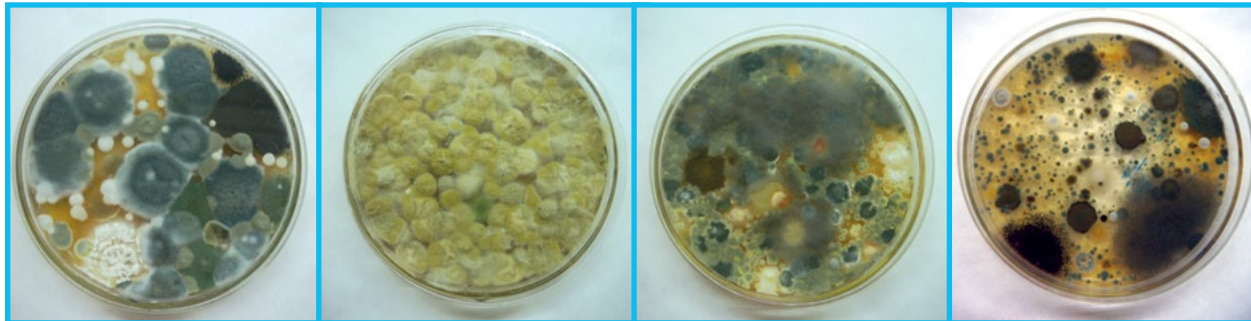


Fig. 171: Crecimientos fúngicos obtenidos en Agar extracto de malta en vigas de madera. Restaurante 1830

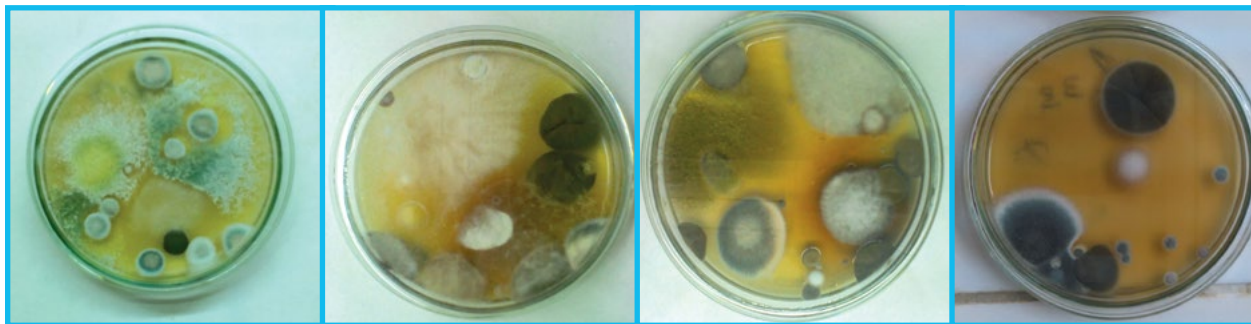


Fig. 172: Crecimientos fúngicos obtenidos en Agar extracto de malta, de las biopelículas en las superficies pétreas. Capitolio Nacional

4.3. AISLAMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE LOS MICROORGANISMOS

Este método permite aislar los microorganismos obtenidos para en un paso posterior caracterizarlos fisiológicamente. A partir de las placas obtenidas en las técnicas de procesamiento del hisopo de muestreo o en la determinación de la carga microbiana, se depuran en placas individuales cada una de las colonias de microorganismos obtenidas.

El resultado final de esta técnica es la obtención de las colonias aisladas que pueden ser identificadas por métodos convencionales de acuerdo con los manuales clásicos de taxonomía o mediante el empleo de técnicas de biología molecular.

El potencial biodeteriorante de los microorganismos aislados de elementos de madera se determina según la capacidad de hidrolizar la celulosa, el almidón, la excreción de pigmentos y la producción de ácidos. Estos métodos se fundamentan en que la actividad metabólica de los hongos es un factor importante en los procesos de biodeterioro. Al ser la madera un material orgánico, es susceptible al deterioro causado por los microorganismos.

4.4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS HONGOS DE DEGRADAR EL ALMIDÓN

Este método se aplica a los hongos aislados de elementos de madera debido a la capacidad que presentan de metabolizar el almidón (componente de reserva de la madera), y favorecer el daño en este sustrato. La técnica es cualitativa y permite conocer si la cepa aislada es o no capaz de degradar el almidón. El almidón sin hidrolizar se une con el yodo del lugol y toma una coloración azul. El almidón hidrolizado aparece como una zona clara y es el resultado de una actividad β amilásica. Las zonas pardo-rojizas indican una hidrólisis parcial (a dextrinas) y son el resultado de una actividad α -amilásica (Figura 173).

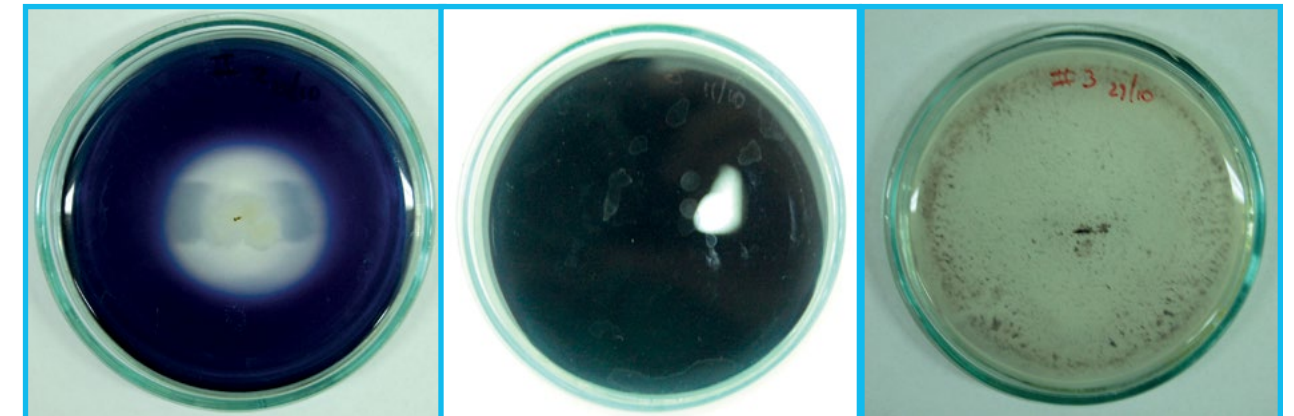


Fig. 173: Los halos de hidrólisis (zonas blancas) indican la capacidad de las cepas de degradar al almidón

4.5. DETERMINAR LA CAPACIDAD DE LOS HONGOS DE DEGRADAR A LA CELULOSA Y DE EXCRETAR PIGMENTOS

Este método se aplica a hongos aislados de elementos de madera. El método se fundamenta en que los hongos pueden metabolizar la celulosa (principal componente de la madera), y causar un daño en la estructura de este material. Además, pueden excretar pigmentos que afectan a este material desde el punto de vista estético. La técnica es cualitativa y demuestra la posible capacidad de la cepa aislada de degradar a la celulosa y de excretar pigmentos. La excreción de pigmentos se puede observar en el reverso del papel Whatman utilizado como fuente de carbono (Figura 174).

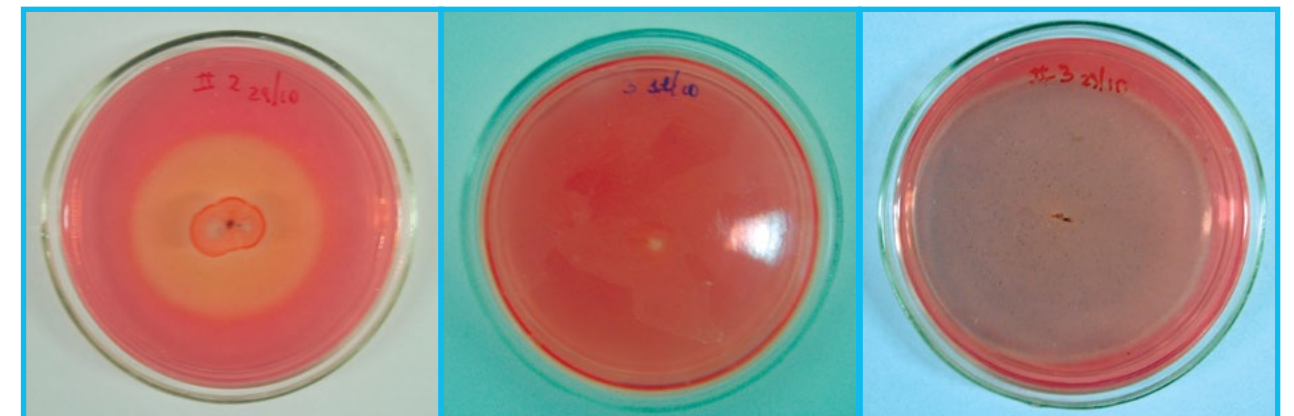


Fig. 174: Los halos de hidrólisis (zonas claras) indican la capacidad de las cepas de degradar a la celulosa

4.6. DETERMINAR LA CAPACIDAD DE LOS HONGOS DE EXCRETAR ÁCIDOS AL MEDIO DE CULTIVO

Este método es aplicable a hongos aislados de superficies orgánicas e inorgánicas. El mismo se fundamenta en que la degradación del sustrato generalmente se corresponde con una acidificación debido a la disminución del pH. Los hongos producen ácidos orgánicos e inorgánicos, que pueden formar complejos de quelación con los cationes presentes en el sustrato al reaccionar directamente con las moléculas del material. La técnica es cualitativa y determina si la cepa aislada es capaz de excretar ácidos al medio de cultivo. Dicha excreción se puede observar visualmente como un cambio de color de indicador rojo fenol, de rojo a amarillo.

4.7. CONTAMINACIÓN EN AMBIENTES INTERIORES

La evaluación de la concentración microbiana en ambientes interiores y exteriores de inmuebles para determinar su nivel de contaminación es importante por el daño o el biodeterioro que pueden causar los microorganismos en los diferentes materiales. En condiciones climáticas adecuadas, la microbiota del ambiente puede coexistir con los materiales y con las personas en un ecosistema específico sin causar daño. Sin embargo, con el incremento de la temperatura y de la humedad relativa, los microorganismos pueden acelerar la colonización de los sustratos e incluso, pueden afectar la salud de las personas en contacto con este ambiente.

Los estudios microbiológicos ambientales permiten identificar y cuantificar las bacterias y los hongos que predominan en un ambiente determinado. El aire del ambiente puede ser muestreado mediante métodos de sedimentación, impactación, filtración o centrifugación. El método de sedimentación aplicado en edificios históricos en Cuba se fundamenta en la técnica descrita por Omeliansky (1940), modificado por Bogomolova (2009) que permite estimar la concentración de hongos y bacterias. De esta forma se puede evaluar el grado de contaminación del aire, según la escala que sugiere el método.

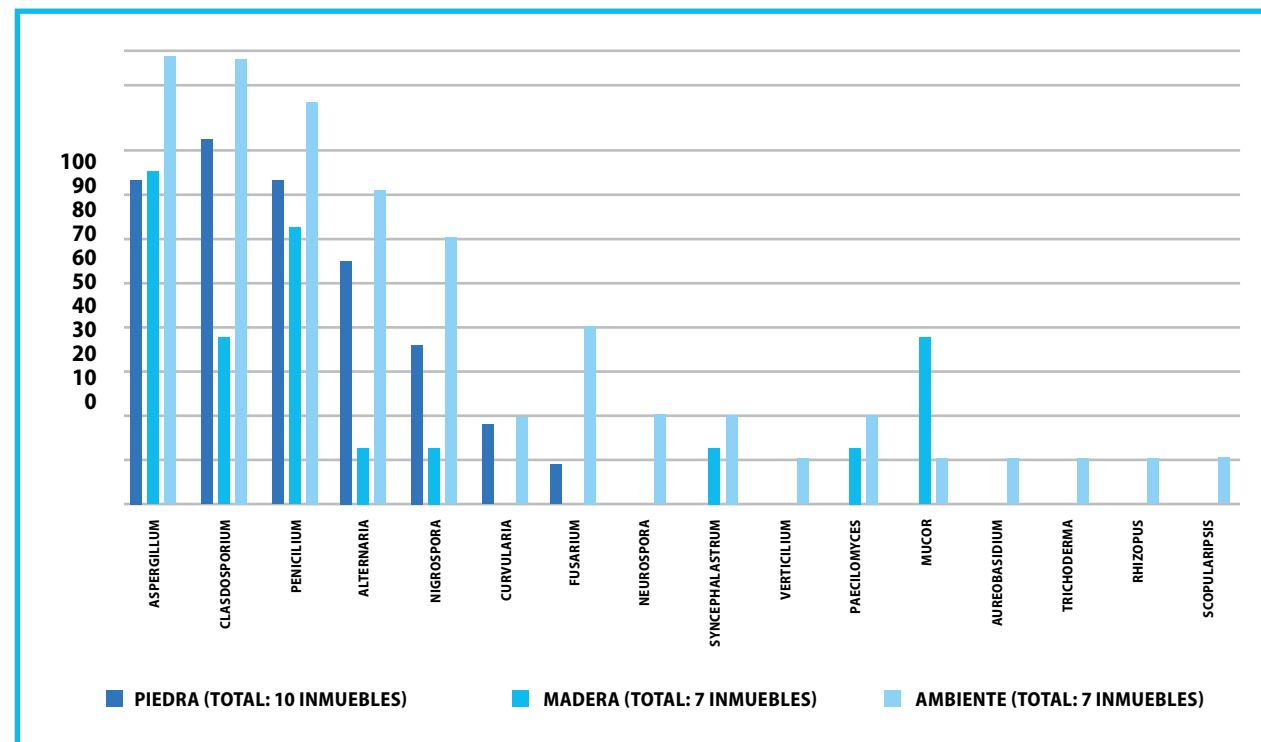


Fig. 175: Frecuencias relativas de los géneros fúngicos aislados de muestras tomadas en piedra, madera o ambiente de edificios históricos de La Habana

Un análisis de la frecuencia relativa de los géneros fúngicos aislados en los edificios estudiados en La Habana mediante el método de sedimentación, muestra que existe una variedad de esporas fúngicas en el ambiente, pero solo una parte de ella, bajo determinadas condiciones, puede llegar a desarrollarse y afectar los bienes culturales (Figura 175). Los géneros *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Penicillium* fueron los detectados con mayor frecuencia relativa en el ambiente, sobre las superficies pétreas y en los elementos de madera.

La identificación de las especies maderables presentes, así como la caracterización de los organismos causantes del deterioro en los inmuebles patrimoniales, permiten un acercamiento hacia los principales agentes de biodeterioro de los materiales pétreos y maderas bajo las condiciones climáticas en Cuba. Estos resultados permiten alcanzar claridad y comprensión de estos procesos, con el fin de poder establecer una política de intervención y restauración de los inmuebles que pueden sufrir algún tipo de daño debido a organismos vivos. Sirven además como punto de referencia y partida para futuras investigaciones en esta área del conocimiento, aún muy incipiente en el patrimonio edificado cubano y en regiones de clima tropical, en las cuales estos procesos tienen características muy peculiares.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bogomolova, Evgenia and Irina Kirtsideli. "Airborne Fungi in Four Stations of the St. Petersburg Underground Railway System." *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 63, no. 2, 2009, pp. 156-160
- Caneva, Giulia et al. *La Biología en la Restauración*. vol. 5, Editorial Nerea, 2000.
- Carreras, R. et al. *Árboles y Maderas de Baracoa, Cuba. Fichas Anatómicas para su Identificación*. 2013.
- Carreras, R and Dechamps, R. *Anatomía de La Madera de 157 Especies Forestales que Crecen en Cuba Y Sus Usos Tecnológicos, Históricos Y Culturales*. Tervuren, 1995.
- Dutrecq, Anselmo. "Guía Práctica Para La Lucha Contra Las Termitas Subterráneas en La Habana (Cuba)." OHCH, 2006.
- J., Benito. "Agentes Destruyores de La Madera. Actuaciones de Conservación para la Habitabilidad del Patrimonio Arquitectónico de La Habana Vieja". FOCAD 2010 - 2012.
- Pérez, Alina Cuza. "Plantas Epilíticas Deteriorantes de La Fortaleza San Carlos de La Cabaña". *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 2009, pp. 219-222.
- Pérez, Alina Cuza et al. "Maderas que Fueron Usadas en la Construcción de Edificaciones Coloniales del Centro Histórico de La Habana Vieja, Cuba". *Anales del Museo de América*, vol. 13, 2005, pp. 359-375.
- Rodríguez, J. C. "Caracterización de La Microbiota del Ambiente del Depósito del Museo Nacional de La Música en Época de Lluvia". Facultad de Biología, Tesis en opción al grado de Máster en Ciencias, 2014.
- Metodología de diagnóstico y evaluación de tratamientos para la conservación de los edificios históricos. Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico. Editorial Comares, 2003.

CAPÍTULO V: TÉCNICAS DE LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

AUTOR
PEDRO RAMÓN CUÉTARA PÉREZ

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural aprobada en París por la UNESCO el 16 de noviembre de 1972, las obras arquitectónicas de valor universal excepcional desde el punto de vista histórico, artístico o científico, están consideradas dentro del conjunto que conforman el patrimonio cultural de una nación. A partir de este concepto se puede definir al patrimonio arquitectónico como el conjunto de bienes edificados, de cualquier naturaleza, a los que cada sociedad atribuye o en los que cada sociedad reconoce un valor histórico y cultural.

La propia heterogeneidad del concepto patrimonio diversifica de una manera muy amplia los métodos y técnicas destinados para su propio estudio. Se convierte así en el campo o disciplina más difícil de documentar e investigar debido a la gran cantidad de variables que intervienen. Para una documentación íntegra del patrimonio deben colaborar especialistas de varias disciplinas, y trabajar como un equipo multidisciplinario en virtud de la salvaguarda del mismo.

La restauración y preservación del patrimonio arquitectónico requiere acciones que mantengan su integridad, tanto física como inmaterial. Mientras mayor sea el conocimiento que se tenga del mismo, más ciertas serán las soluciones a corto y largo plazo. Para ello se hace necesario un estudio profundo del inmueble, desde la investigación histórica, hasta el análisis de la estructura y su sistema constructivo.

Uno de los métodos fundamentales del registro y la documentación de los bienes inmuebles son los levantamientos arquitectónicos, entendido como procesos donde se recoge toda la información geométrica de la obra en el momento que se analiza. Por eso, esta disciplina en sí debe considerarse como un método de investigación, pues sus resultados nos ofrecen siempre un mejor conocimiento del patrimonio arquitectónico. Estos estudios, junto con las investigaciones históricas, son el inicio para otras acciones: diagnósticos estructurales y de materiales, las posibles refuncionalizaciones, futuros proyectos, entre otras.

El levantamiento arquitectónico nace en el Renacimiento, a partir del interés que despierta el estudio de la arquitectura romana, pero el verdadero desarrollo de la disciplina ocurre a lo largo de los siglos XVIII y XIX, que es cuando se aborda el estudio y clasificación de la arquitectura histórica. En esos siglos este proceso tuvo una función taxonómica, semejante a la que usaron los naturalistas de la misma época, los cuales centraron sus esfuerzos en realizar una clasificación completa de los seres vivos y utilizaron el dibujo como la herramienta descriptiva fundamental de su trabajo científico.

Los arquitectos, con un objetivo similar al de los naturalistas, trataron también de establecer una clasificación completa de la arquitectura histórica que ordenase en el tiempo y agrupase por tipologías todas las obras conservadas hasta esos años. Para realizar esta clasificación era necesario definir las características tipológicas de los diferentes estilos reconocidos, mediante el dibujo de los monumentos más importantes y significativos. La arquitectura europea del nuevo clasicismo en el siglo XVIII y la de los estilos neo-medievalistas en el XIX, tienen en el trabajo de estudio y levantamiento de la arquitectura de épocas anteriores, su mejor fuente de inspiración.

El trabajo más significativo de esa época, por su precisión y valores estéticos, es la “Pianta Grande di Roma” del arquitecto y topógrafo italiano Giambattista Nolli (1701-1756) (Figura 176), el cual constituye uno de los referentes más importantes en la historia de la producción cartográfica. Asimismo, sobresaliente por su indudable calidad artística, es de inestimable valor documental debido a la cantidad y exactitud de la información que contiene el plano de la ciudad.



Fig. 176: “Pianta Grande di Roma”, Giambattista Nolli, 1748 (Fuente: The Interactive Nolli Map Website).

Junto con el avance tecnológico en el Siglo XIX y XX, y gracias a la invención y desarrollo de nuevos métodos y dispositivos para la medición, se enriqueció el trabajo del personal dedicado al estudio de la arquitectura histórica. En la segunda mitad del Siglo XX, la creación y surgimiento de la informática, y más adelante la utilización de software CAD (Computer Aided Design), marcaron un gran cambio para el análisis y procesamiento de los datos recogidos.

En la actualidad existen dos métodos fundamentales para diferenciar los sistemas de medición: el método directo y el método indirecto. El método directo es donde el operador selecciona *in situ* qué documentar y realiza una medición directa con herramientas como la cinta métrica o estaciones totales. El método indirecto por su parte, por medio de la fotogrametría y el escáner láser, permite tomar gran cantidad de datos de todo el conjunto edificado.

El método indirecto y las técnicas de levantamiento arquitectónico digital tienen un nivel de complejidad muy superior comparado con el método directo tradicional. No obstante, por las características de las tecnologías que se utilizan, este obstáculo se compensa por mayor cantidad de información geométrica y colorimétrica, menor tiempo en la toma de datos y mayor grado de precisión. Debido principalmente al uso y gestión de la información en tres dimensiones.

2. EL ESCÁNER LÁSER TERRESTRE PARA EL LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO

La documentación arquitectónica 3D permite obtener la distribución en el espacio de las superficies externas de un objeto. Por lo tanto, los sensores tridimensionales son herramientas que permiten generar una reproducción digital con alto grado de precisión. El escáner láser terrestre (TLS) es un sensor activo que permite determinar la distancia de un emisor láser no invasivo a un objeto, y la salida de este proceso es un modelo tridimensional altamente detallado, llamado nubes de puntos.

En la actualidad existen muchos modelos de dispositivos láser, diferenciados principalmente por la especialización, para volúmenes de tamaño pequeño o mediano, aproximadamente de menos de 1 m³. Los escáneres se basan en el principio de medición por triangulación, y para volúmenes superiores se utilizan sensores de medición del tiempo de vuelo (TOF– siglas en inglés). Otras de las diferencias de estos dispositivos es la plataforma desde donde opera: escáner aéreo, terrestre o móvil.

El funcionamiento de los TLS, ubicados sobre una plataforma estática (trípode), es a partir de la emisión de un láser o haz de luz desde el dispositivo. Este láser hace contacto con alguna superficie marcando un punto, y retorna hacia el emisor con la información de la ubicación exacta donde hizo contacto, convirtiendo la herramienta esta vez en un receptor. De esta forma, cada láser emitido equivale a un punto en el espacio con coordenadas x; y; z, y cada punto está referenciado a la posición del TLS.

El tiempo que demora el haz de luz en ir y regresar es calculado por la herramienta y así se logra determinar la distancia y localización del punto. Los valores RGB (red, green, blue– siglas en inglés), de las superficies escaneadas son obtenidos a partir de fotografías tomadas por el mismo escáner láser, posterior al proceso de escaneado. El equipo, al mismo tiempo que emite el láser, gira sobre su base 180° horizontalmente, y un dispositivo que posee un sistema de espejos ubicado en la parte alta y central, gira 360° verticalmente.

Esos puntos marcados en el espacio llegan a ser tantos como permita la configuración del equipo en el momento del escaneado. Captan de esa forma la geometría exacta de las superficies, formando la llamada nube de puntos, que no es más que el conjunto de millones de puntos obtenidos en un posicionamiento. El TLS se ubica en tantos lugares como sea necesario para recoger toda la información del edificio, de forma tal que exista un solapamiento entre una nube y otra, superior a 50%. Posteriormente se unen en un único sistema de coordenadas y el resultado es un volumen digital tridimensional geoméricamente idéntico al objeto que se documentó.

El principal aporte y beneficio del trabajo con esta técnica es la obtención de gran cantidad de información precisa de la geometría del inmueble, además de la creación de un archivo digital, que puede ser utilizada para la reconstrucción del inmueble en caso de catástrofes naturales, incendios, la acción humana o los años de exposición. El tiempo de la toma de datos, comparado con otros métodos de medición es considerablemente menor, lo cual agiliza los procesos y las estrategias en los proyectos de restauración.

El trabajo a partir de un modelo de puntos tridimensional, se posibilita que los especialistas involucrados en el proceso de investigación trabajen con gran cantidad de datos. Del mismo modo, analizar la morfología de los elementos poco accesibles sin ayuda de otros medios, y la posesión de información previa a otros estudios. Lo anterior resulta ventajoso porque posibilita emitir criterios certeros, lo cual deriva en un ahorro de tiempo, de fuerza de trabajo o logístico.

Desde el volumen de datos se pueden extraer las vistas tradicionales para el levantamiento: planta, cortes o secciones, así como fachadas o elevaciones. Esto sucede gracias a la extracción de ortoimágenes que son fotos generadas en proyección ortogonal, extraídas de la nube de puntos geoméricamente exacta al modelo original. La exportación hacia el programa AutoCAD de una ortoimagen, y la correspondiente restitución gráfica, convierte todo el proceso en una información más accesible para otros trabajos.

3. TRABAJO CON LAS ORTOIMÁGENES

La ortoimagen es un tipo de información que se extrae de las nubes de puntos. Son fotos ortogonales de una vista del modelo tridimensional de puntos, determinada por los especialistas en función de las necesidades del trabajo. Como dichas nubes de puntos reflejan la realidad en el momento en que se escaneó, estas se importan al AutoCAD con la escala real, lo cual facilita en gran medida el análisis geométrico del edificio y restitución gráfica. El nivel de detalle de estas ortoimágenes está condicionado por la configuración que, en un inicio, fue dispuesto en el TLS.

La extracción de esas imágenes ortogonales depende de varios pasos que se deben realizar previamente: una selección de puntos dentro de la nube que represente el elemento y la modificación del sistema de coordenadas de global a local. Cuando se unen todas las nubes en un conjunto, los sistemas de coordenadas de cada nube se modifican y toman la referencia de la primera posición del TLS, de esta forma queda definido un sistema de coordenadas universal (UCS- siglas en inglés), para todo el modelo. Para las ortoimágenes se crea un sistema de coordenadas nuevo (local), donde el eje z (elevación) quede en dirección del espectador, el eje x representa el largo y el eje y, el alto de la imagen.

Este tipo de información se utiliza para la restitución gráfica principalmente de elevaciones y cortes. En aquellas fachadas donde se observan muchos elementos decorativos, el uso de la ortoimagen resulta ser de mucha ayuda. El TLS permite escanear estos detalles en una mayor resolución, lo que permite captar la morfología del mismo y posibilita realizar el dibujo correspondiente en el programa AutoCAD (Figuras 177 y 178).

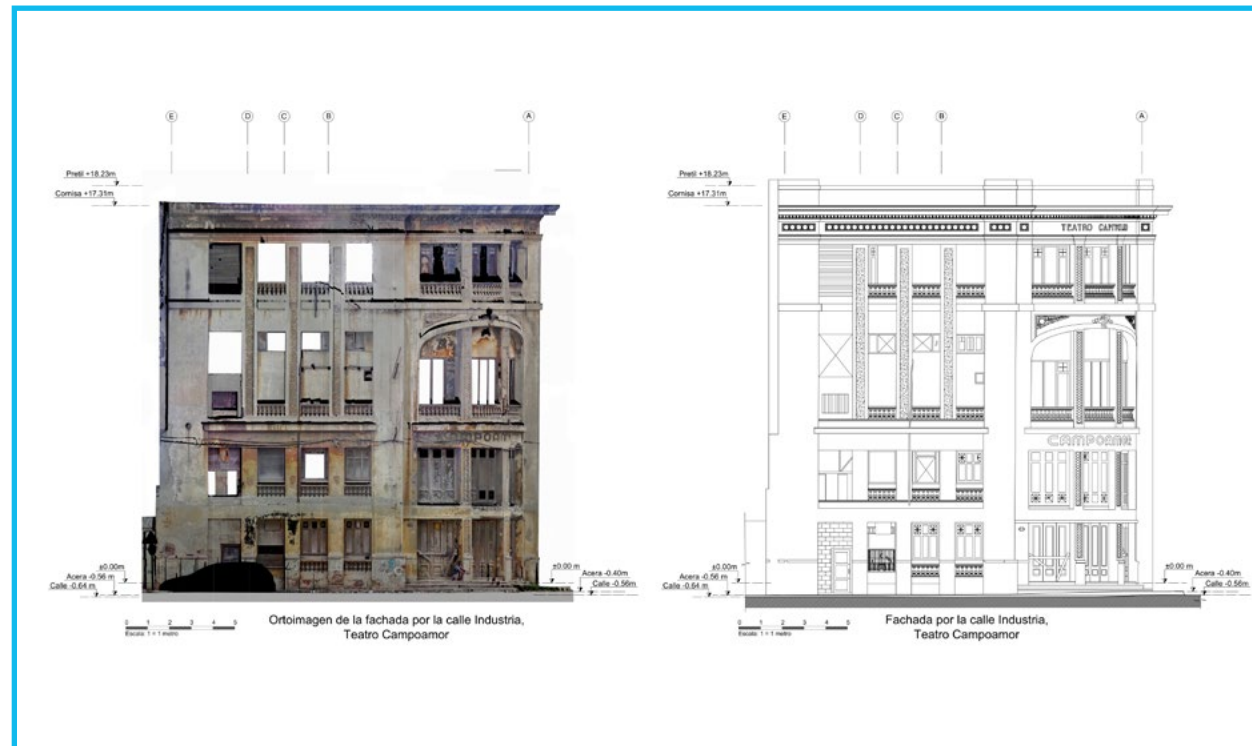


Fig. 177: Ortoimagen y restitución gráfica de la fachada por la calle Industria, para el proyecto de restauración. Teatro Campoamor

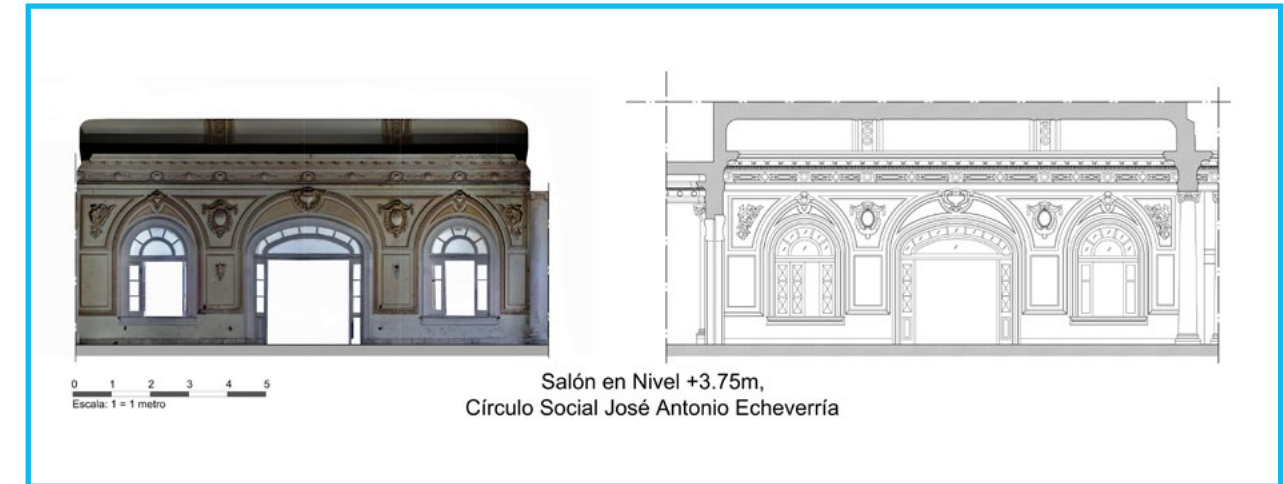


Fig. 178: Ortoimagen y restitución gráfica de los detalles decorativos de las paredes para la reproducción de los detalles ornamentales. Círculo Social José Antonio Echeverría

Otros de los usos es la creación de modelos tridimensionales de objetos de menor tamaño, a base de mallas poligonales, que pueden ser utilizados para la impresión en 3D, y la creación de moldes para la reproducción en otros materiales como el yeso. También, la realización de animaciones virtuales para la valorización del patrimonio arquitectónico mediante videos, multimedias, realidad virtual, realidad aumentada, y otros (Figura 179).

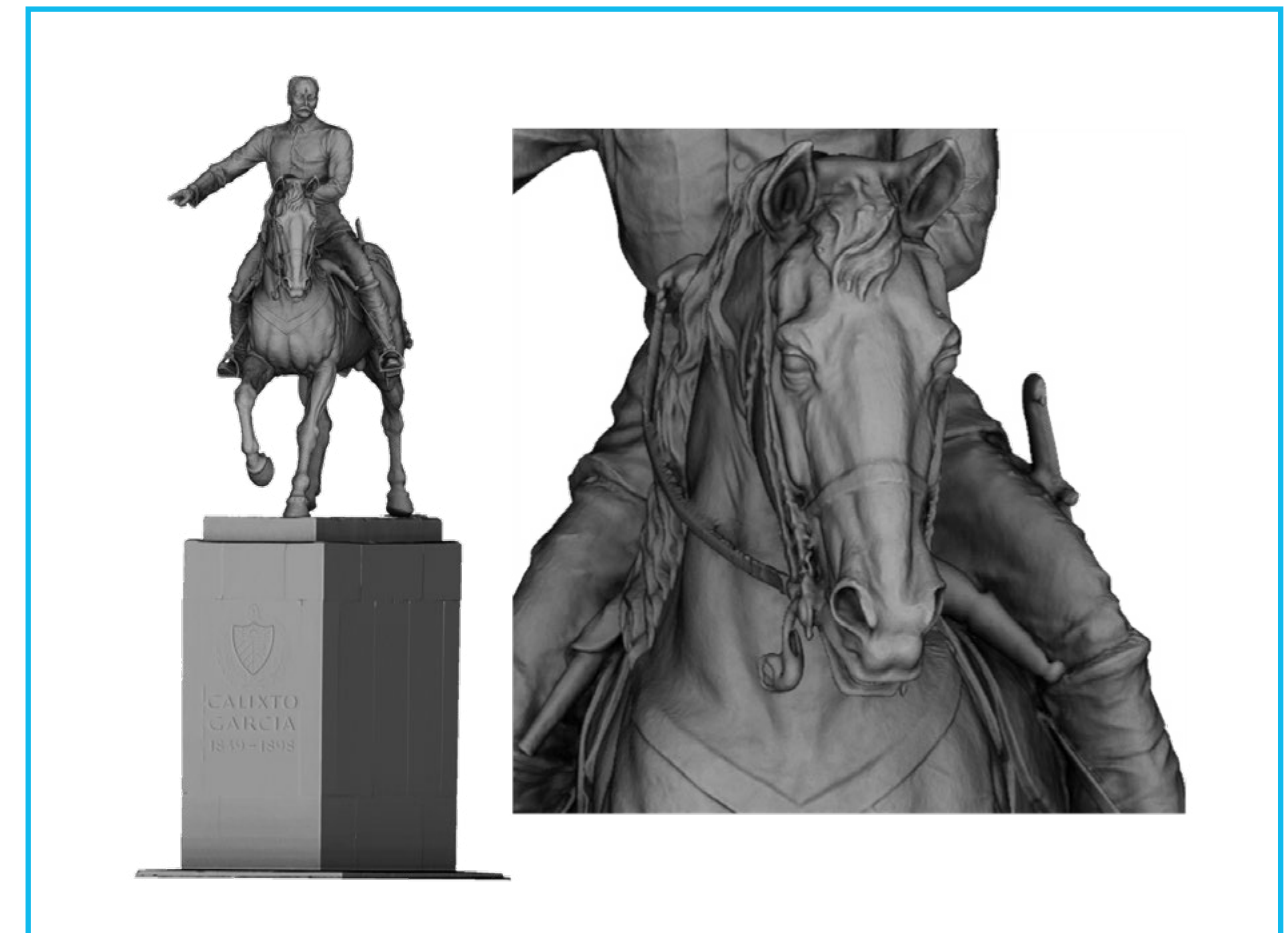


Fig. 179: Malla triangular del Monumento Calixto García, obtenido a partir de levantamiento con TLS

4. ESTUDIO DE CASO CONVENTO DE SANTA CLARA DE ASÍS

El Convento de Santa Clara de Asís se encuentra limitado por las calles Cuba, Sol, Luz y Habana, en el Centro Histórico de La Habana Vieja. Es un conjunto de muros tapiales y extensos techos que abarca cuatro pequeñas manzanas, cada una de ellas convertidas en cuatro claustros. Sus obras comenzaron en el año 1638 y terminaron a mediados del siglo XVIII, para convertirse en el primer monasterio de monjas de Cuba en la entonces Villa de San Cristóbal de La Habana (Figuras 180, 181 y 182).



Fig. 180: Convento de Santa Clara de Asís, fachada por la calle Cuba, año 1930. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

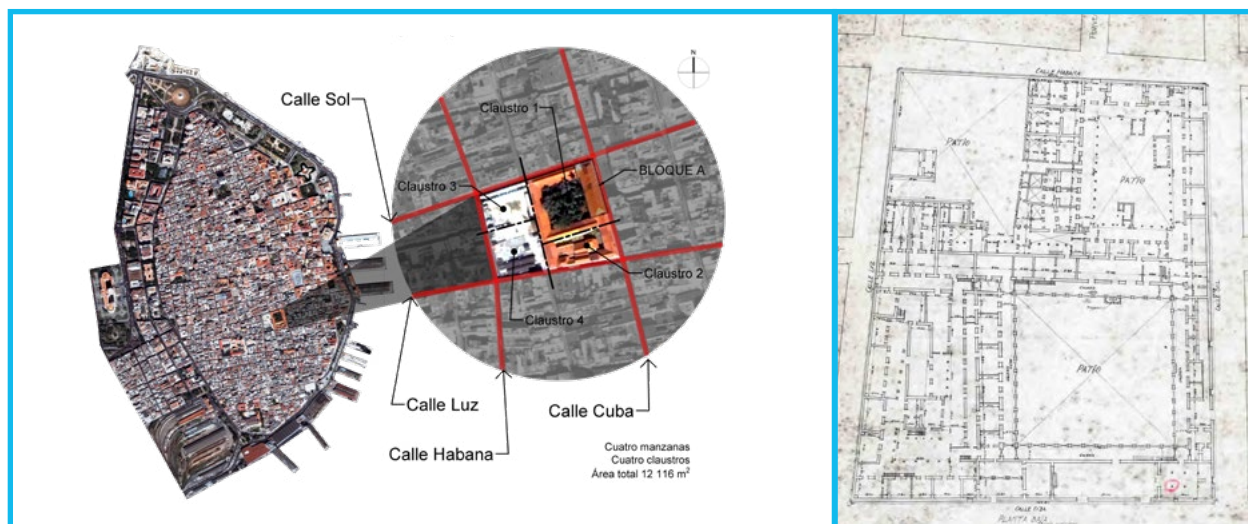
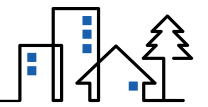


Fig. 181: Ubicación del Convento de Santa Clara de Asís. Fuente: Elaboración propia.

Fig. 182: Plano del Convento, año 1924. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH



La iglesia se abrió al culto poco antes de 1643. La misma fue construida paralela a la calle Cuba, en forma de un nave y carente de motivos decorativos. El techo, en cambio, resulta atractivo por su majestuosidad y elaborada decoración. Está formado por pares y nudillos de gruesos maderos que producen un efecto vigoroso y funcional. La torre es de tres cuerpos y cubierta apiramidada, intercalada entre la iglesia y el convento, fue construida por el maestro Pedro Hernández de Santiago a principios del siglo XVIII. El puntal de la misma suma la altura de los dos niveles que definen la edificación. El techo es de armadura de madera y está considerado como el más grande de Cuba. Tiene grandes piezas combinadas con trabajo artesanal, que demuestra los recursos que fueron dedicados a la obra. Actualmente presenta escasos vanos, sobre todo para la calle Cuba, aparentemente tapiados con posterioridad a 1930.

El área del coro se encuentra en los límites del edificio, adyacente a la intersección de las calles Cuba y Sol. El coro alto, ubicado en el nivel superior, resulta más interesante que el inferior. Su techo, también de armadura, continuo al de la Iglesia, presenta piezas muy semejantes en cuanto al diseño a las del local contiguo.

Las galerías en planta baja y planta alta no poseen grandes diferencias, excepto en la estructura vertical. La inferior son columnas redondas con su capitel sobrio y arcos de medio punto, y en la superior son pies derechos de madera quienes soportan el techo. El entepiso está compuesto por vigas de madera y tablazón, mientras que la estructura que cubre la galería de la planta alta, continuando la pendiente del techo de la iglesia, es un techo inclinado a un agua. Escaso de decoraciones y ornamentos en general, lo que más llama la atención son los grandes espacios, los gruesos muros y los elementos de madera, siendo los techos de armadura los más llamativos.

En 1922 las monjas se trasladaron para otro lugar de la ciudad, y el convento se vendió en un millón de pesos a particulares, siendo adquirido por el Estado al año siguiente por dos millones de pesos, en donde posteriormente se instalaron las oficinas de la Secretaría de Obras Públicas. Este hecho provocó innumerables protestas de la prensa y la opinión pública por el manifiesto latrocinio que implicó la operación.

Dos de sus cuatro claustros fueron intervenidos con una restauración general entre 1985 y 1992, readaptándolos para usos administrativos, culturales y de alojamiento bajo el proyecto general del Arq. Daniel Taboada. El primer claustro es el más importante de los cuatro. Está conformado por un amplio patio, rodeado de galerías delimitadas por robustas arcadas de mampuesto en la planta baja, que contrasta con los sencillos pies derechos de madera de la planta alta, además de la presencia de la iglesia (Figura 183). Exteriormente el conjunto es muy sencillo, carece de decoraciones y sus vanos son planos y escasos, como correspondía a las construcciones de la época.

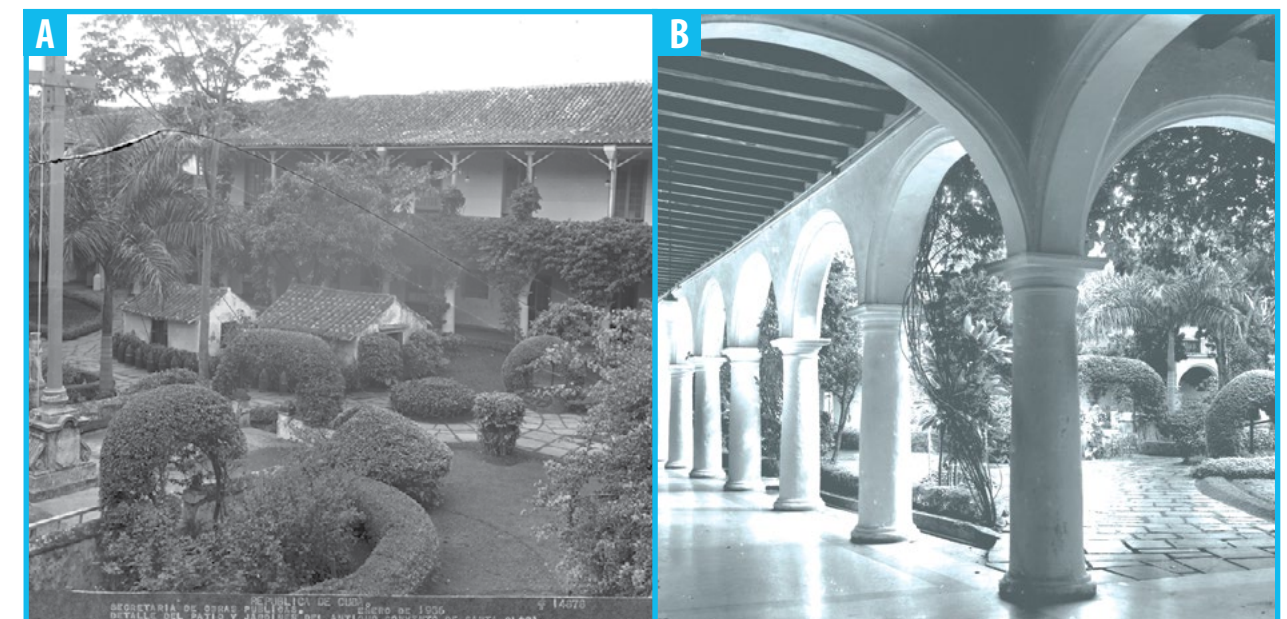


Fig. 183: Interior del primer claustro del Convento de Santa Clara de Asís, año 1936. **A:** Patio central.

B: Galería de planta baja. Fuente: Centro de Documentación Arq. Fernando Salinas, Restaura, OHCH

4.1. TRABAJOS DE LEVANTAMIENTO

Los trabajos se realizaron en el primer claustro. Debido a las amplias dimensiones del conjunto, fue necesario dividir en cuatro las áreas de estudio con el objetivo de lograr una mejor organización del trabajo y la documentación. De esta forma fue seccionado en bloques que corresponden a cada lado del polígono, siendo el bloque A el correspondiente a la ubicación de la iglesia.

Para el levantamiento arquitectónico del bloque de la iglesia se utilizó un escáner láser. Los diferentes modos de trabajo o configuraciones dependieron de las necesidades de los especialistas involucrados, los requerimientos del levantamiento arquitectónico y de las condiciones del lugar. De esta manera se definen los tiempos escaneado en cada posicionamiento y la calidad de la información final, siendo directamente proporcional cada variable. Estos aspectos son muy importantes a tener en cuenta porque influyen en el procesamiento digital, siendo necesario para ello de equipos de cómputo potentes y con amplia capacidad de almacenamiento. En proyectos grandes la gestión de los datos juega un papel muy importante en la velocidad de los procesos, y la viabilidad de las transferencias de datos.

Para obtener un modelo general de la estructura de la iglesia, fue necesario realizar levantamiento con el TLS, tanto en el interior como el exterior, para un total de 117 posiciones. Se configuraron la resolución y la calidad durante el barrido en "Alta" (High), además de la adquisición de fotos. Esta configuración en el TLS implica que, a los 10 metros de la ubicación del emisor, la distancia máxima de error entre los puntos marcados por el láser es de 6 mm. Con esta programación de trabajo, el tiempo de demora aproximado es de 10 minutos por cada posicionamiento.

Posterior al proceso de escaneado, se inicia el trabajo de procesamiento digital, el cual consta de las siguientes etapas:

- Filtrado de las nubes de puntos
- Eliminación del ruido
- Registro o unión de las nubes en un sistema de coordenadas general (Figuras 184 y 185)

A la información resultante se le extraen todos los datos necesarios para formar parte de las diferentes etapas del proyecto: diagnóstico patológico, proyectos de apuntalamiento, restauración, información geográfica, entre otras requeridas durante la intervención de la obra.

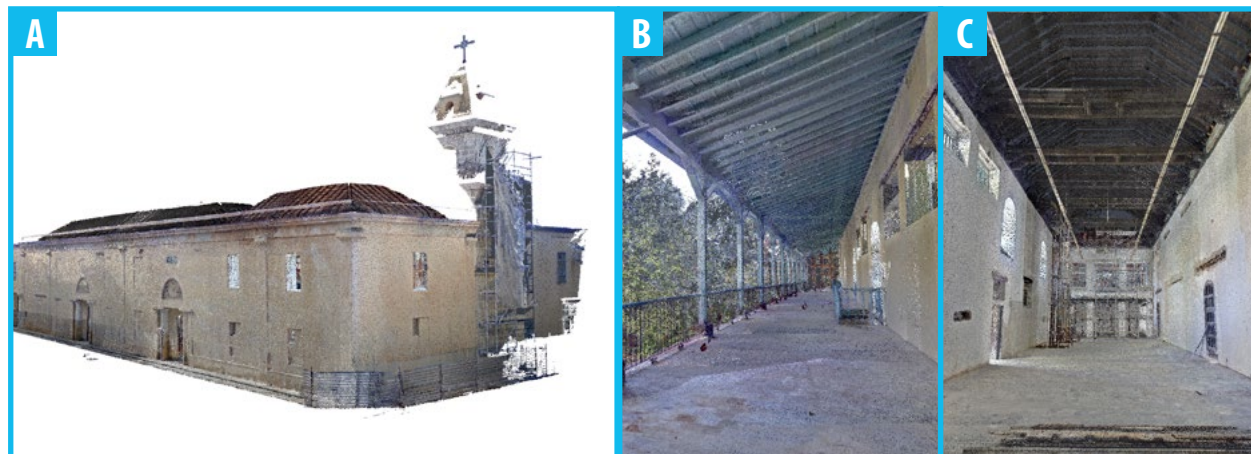


Fig. 184: Imágenes obtenidas a partir de la unión de las nubes de punto. **A:** Fachada exterior entre las calles Cuba y Sol. **B:** Galería de circulación en planta alta. **C:** Interior de la iglesia

Para el análisis de la geometría del Bloque A se extrajeron ortoimágenes de las vistas más comunes para la representación de la arquitectura. Estas serían la planimetría en planta baja y planta alta (Figuras 186 y 187), la elevación principal por la calle Cuba, cortes longitudinales, y cortes transversales (Figuras 188, 189 y 190).

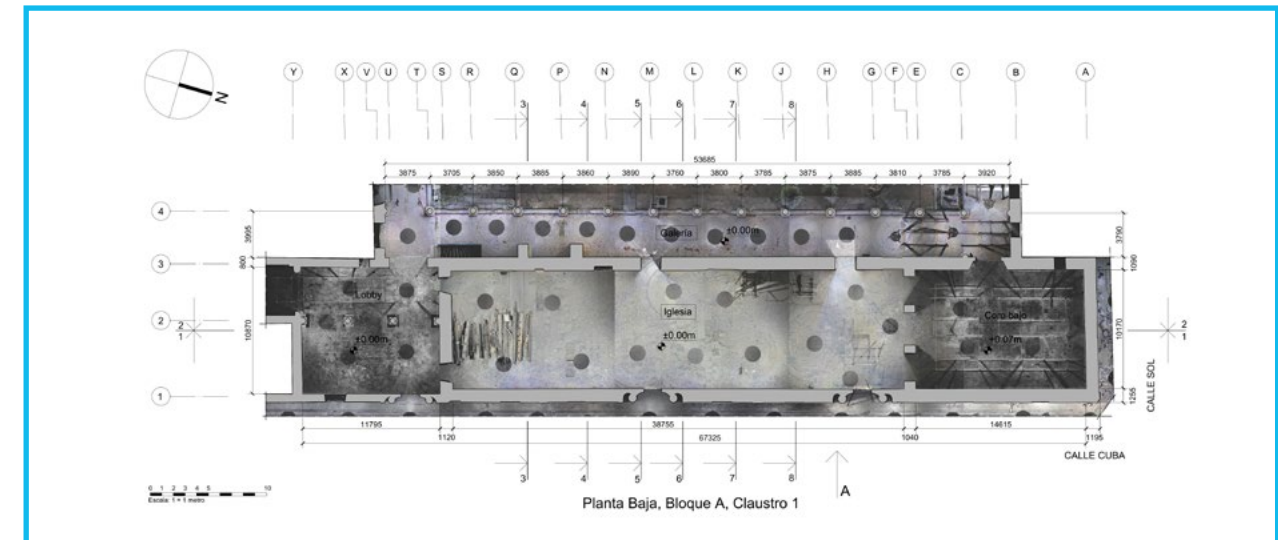


Fig. 185: Ortoimagen obtenida de la planta baja, bloque A, primer claustro

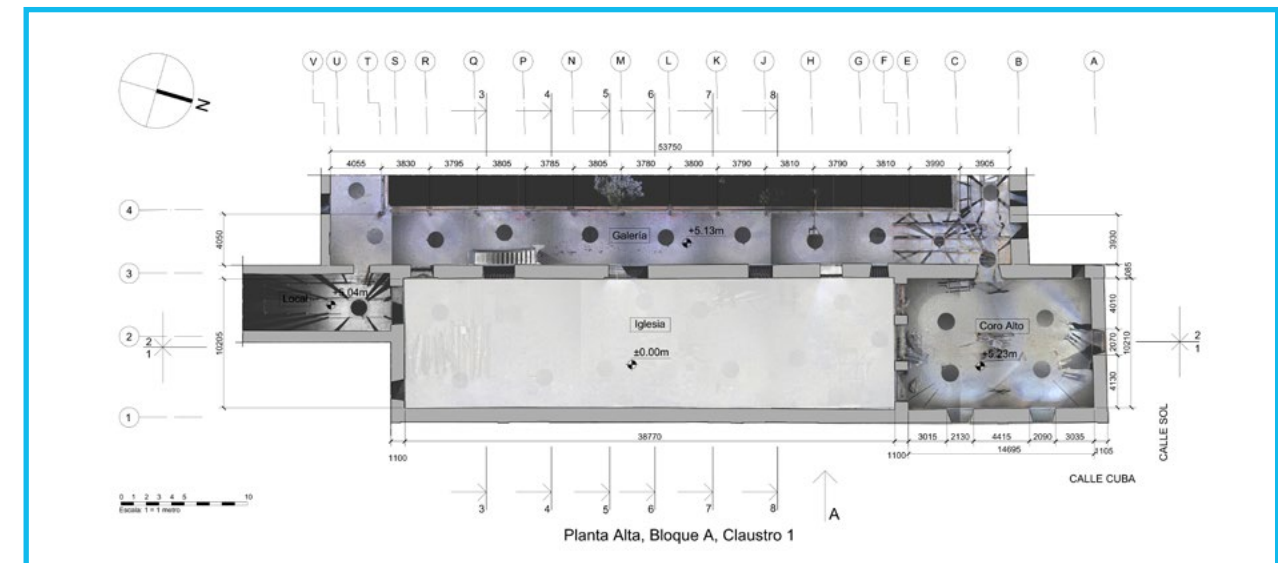


Fig. 186: Ortoimagen obtenida de la planta alta, bloque A, primer claustro

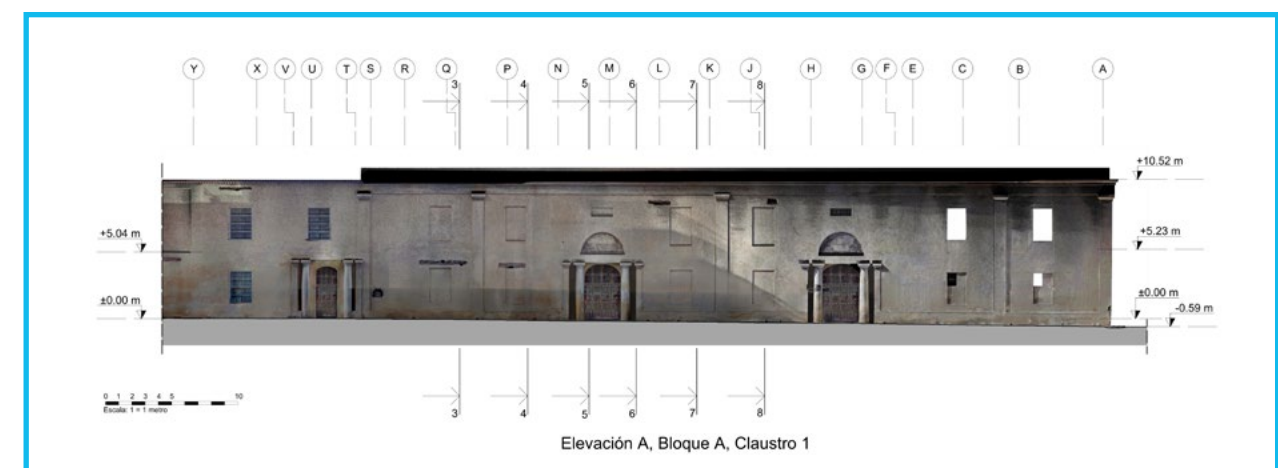


Fig. 187: Ortoimagen obtenida de la elevación A, bloque A, primer claustro

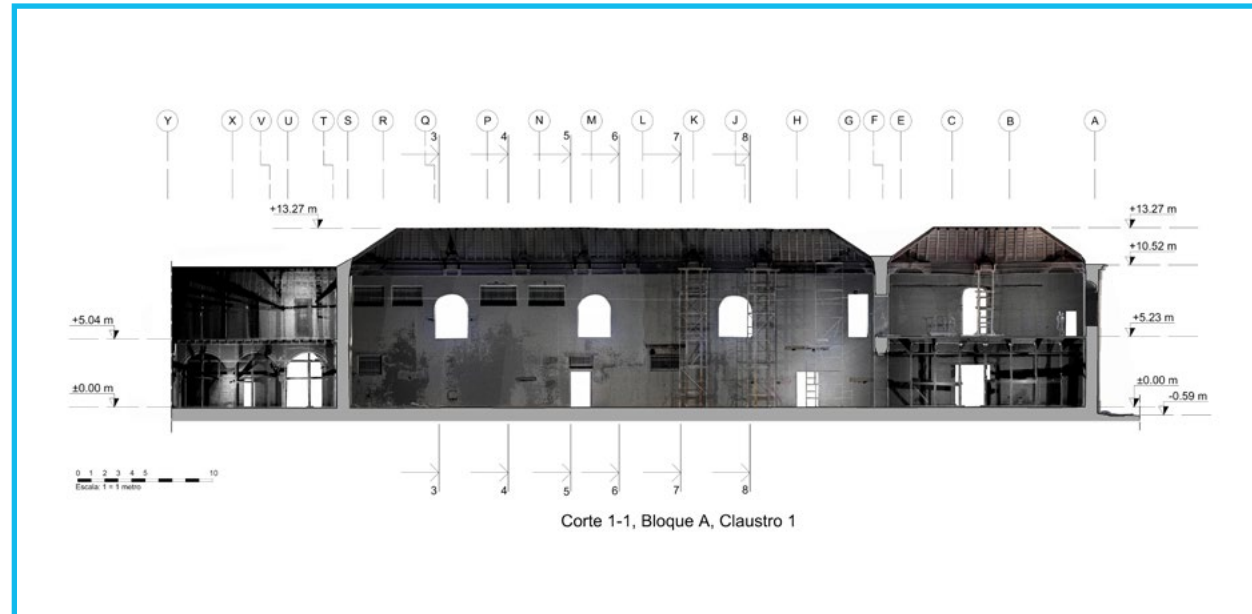


Fig. 188: Ortoimagen obtenida del corte 1-1, bloque A, primer claustro

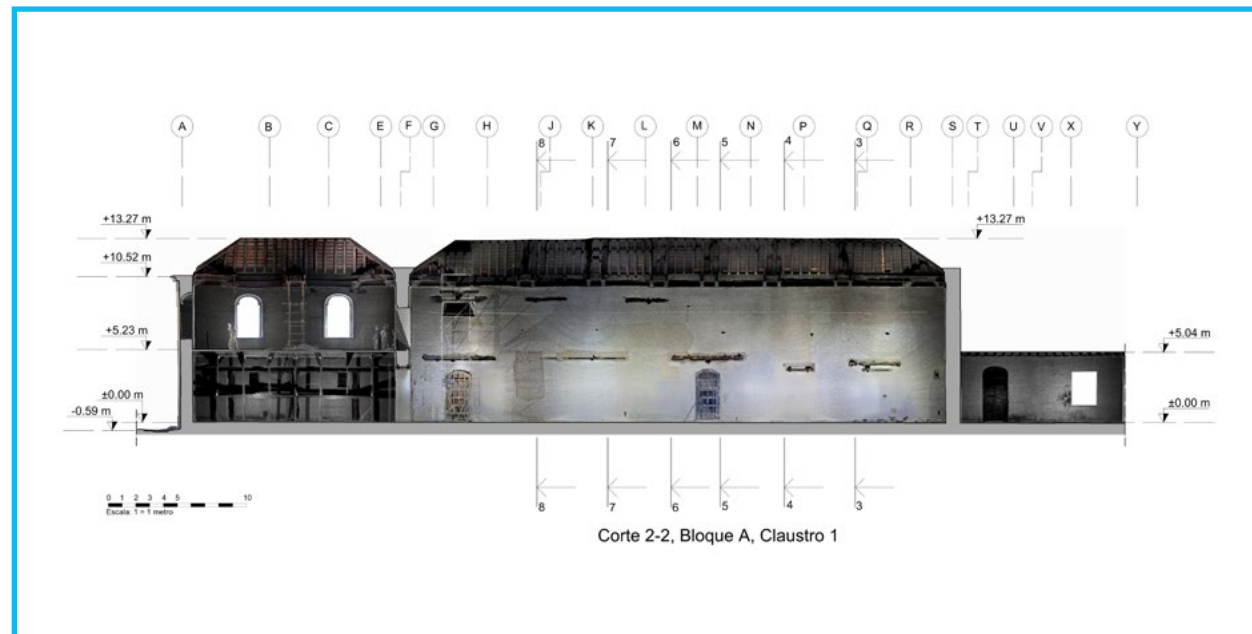


Fig. 189: Ortoimagen obtenida del corte 2-2, bloque A, primer claustro

La posibilidad de importación de las ortoimágenes a la plataforma AutoCAD permite determinar con precisión las dimensiones planimétricas y alométricas del conjunto, así como los espesores de los muros, la ubicación y medidas de los vanos, entre otros muchos datos que pueden ser posteriormente empleados por los especialistas para el avance del proyecto. La información visual obtenida refleja que la disposición de los espacios en ambas plantas del bloque A del primer claustro son muy semejantes, solo presentan diferente geometría el lobby y el local que se sitúa justamente encima de él.

Se extrajeron también seis ortoimágenes de cortes transversales, ubicadas a propósito para analizar los tirantes pareados del techo. Esta información permitió conocer los ángulos de inclinación de los techos que cubren tanto la iglesia como la galería de la planta alta, así como el peralte de las piezas que lo componen, y a la altura que se encuentran (Figura 191).

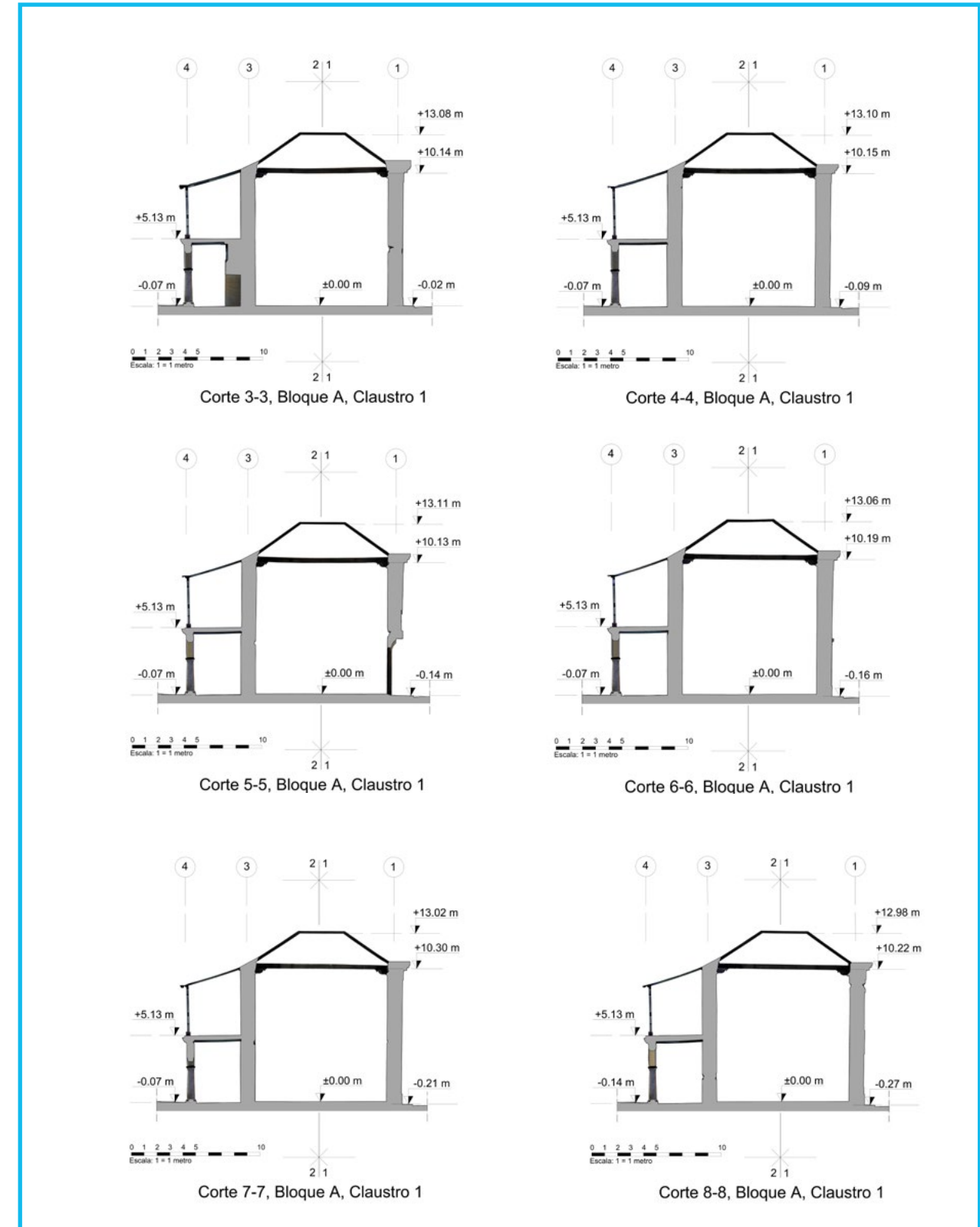


Fig. 190: Diferentes cortes transversales aplicados al bloque A, primer claustro

Una aplicación que aporta valor a los resultados obtenidos del escáner láser, es la posibilidad de estimar con elevada precisión las áreas o espacios de las estructuras verticales de una obra. De esta forma es posible cuantificar la cantidad de materiales de construcción a emplear, lo que incrementa la eficiencia y aprovechamiento en los espacios durante el proceso de restauración (Figura 192).

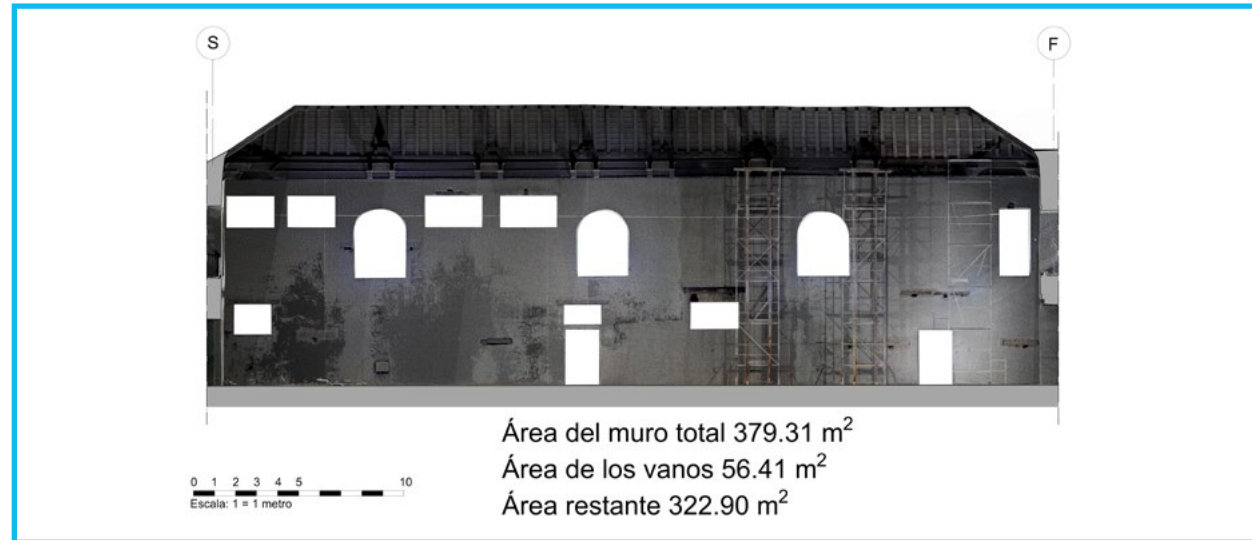


Fig. 191: Cálculo del área del muro de la iglesia correspondiente al eje 3, mediante la aplicación de la herramienta “área” en el programa AutoCAD

Uno de los elementos más importantes de todo el conjunto es el techo de armadura de la iglesia. El mismo se ubica a una altura de 13 metros sobre el nivel del piso de la iglesia y para el levantamiento de la estructura de madera y los decorados, es imperativo el empleo del TLS. A partir de la información de las nubes de puntos y las ortoimágenes generadas, se obtuvieron las dimensiones reales de los elementos estructurales que conforman el forjado, así como el análisis de su estructura y geometría. Esto permite reducir costos asociados al empleo de medios de acceso, herramientas de medición, y personal técnico y profesional adicional.

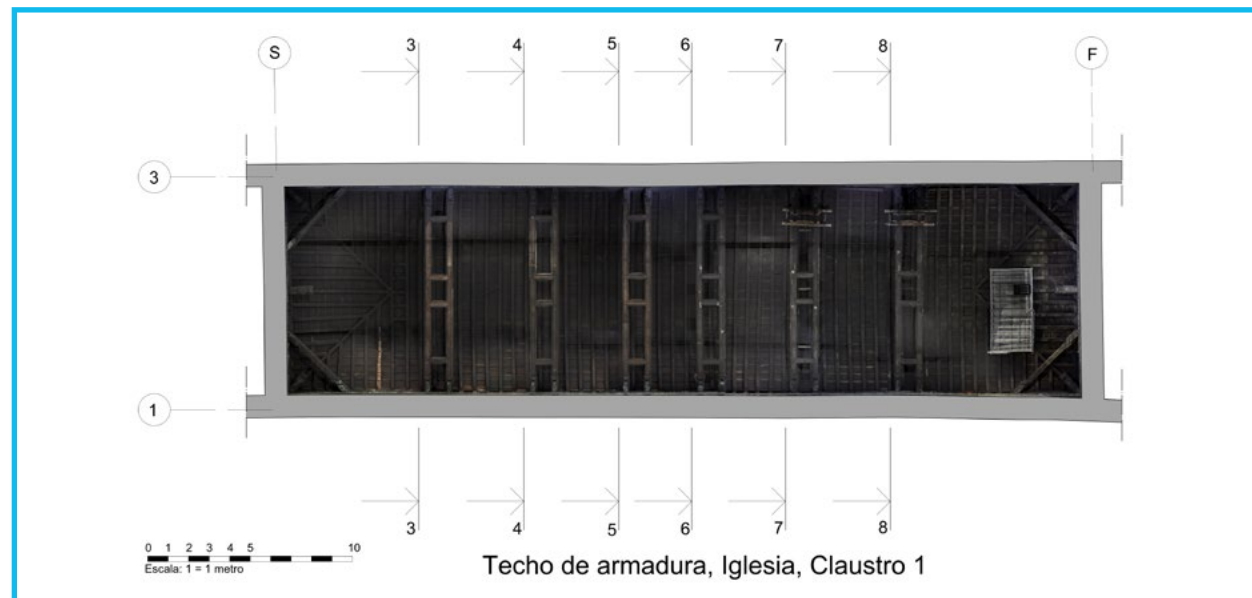


Fig. 192: Ortoimagen obtenida de la planta del techo de armadura de la iglesia, bloque A, primer claustro

La estructura del forjado de la iglesia se compone de un sistema de pares y nudillos, con seis tirantes pareados, cuadrales en cada esquina, además de canes estructurales y decorativos. A través de la generación de ortoimágenes fue posible seccionar la estructura y restituirla gráficamente en AutoCAD (Figuras 193, 194, 195 y 196), en donde se plasmó toda la decoración de las piezas. Esto facilita en futuros proyectos de restauración, la creación de piezas gemelas para conservar los valores patrimoniales y estéticos de la obra.

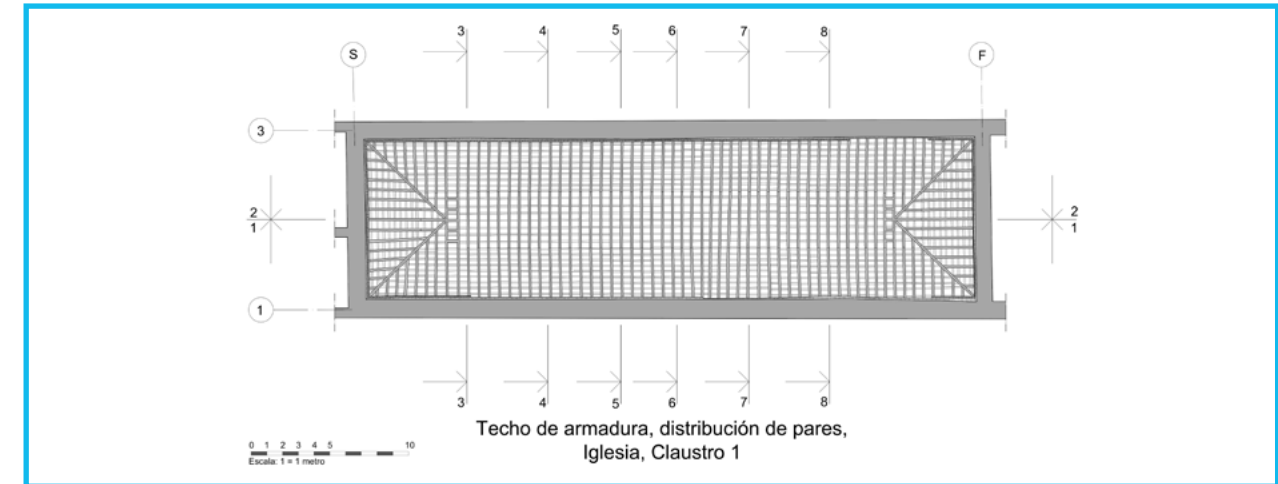


Fig. 193: Planta del techo de armadura de la iglesia donde se muestra la distribución de los pares

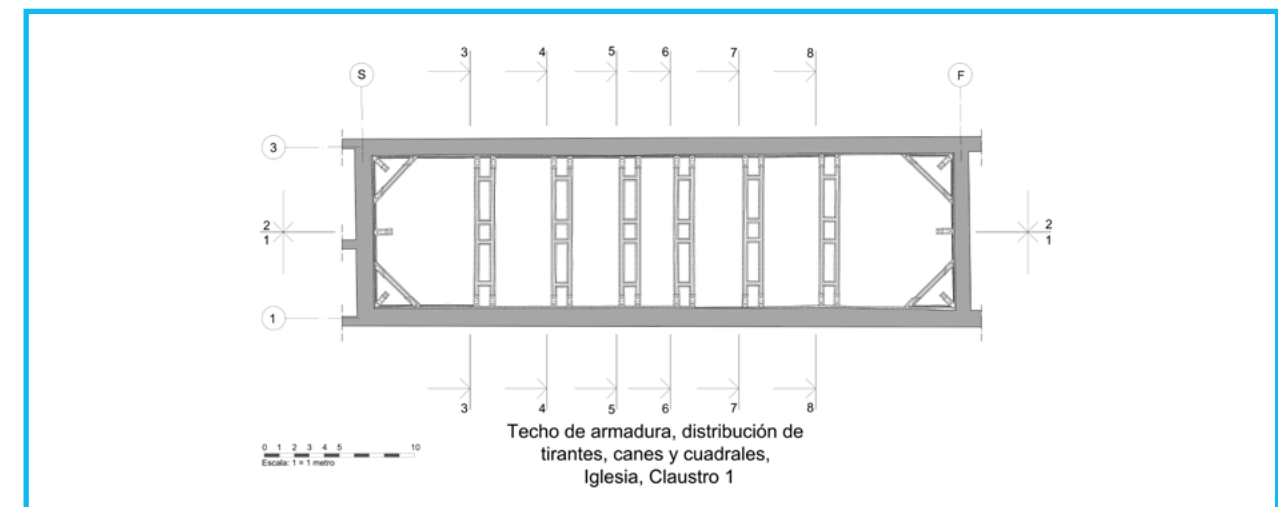


Fig. 194: Planta del techo de armadura de la iglesia con la distribución de los tirantes, canes y cuadrales

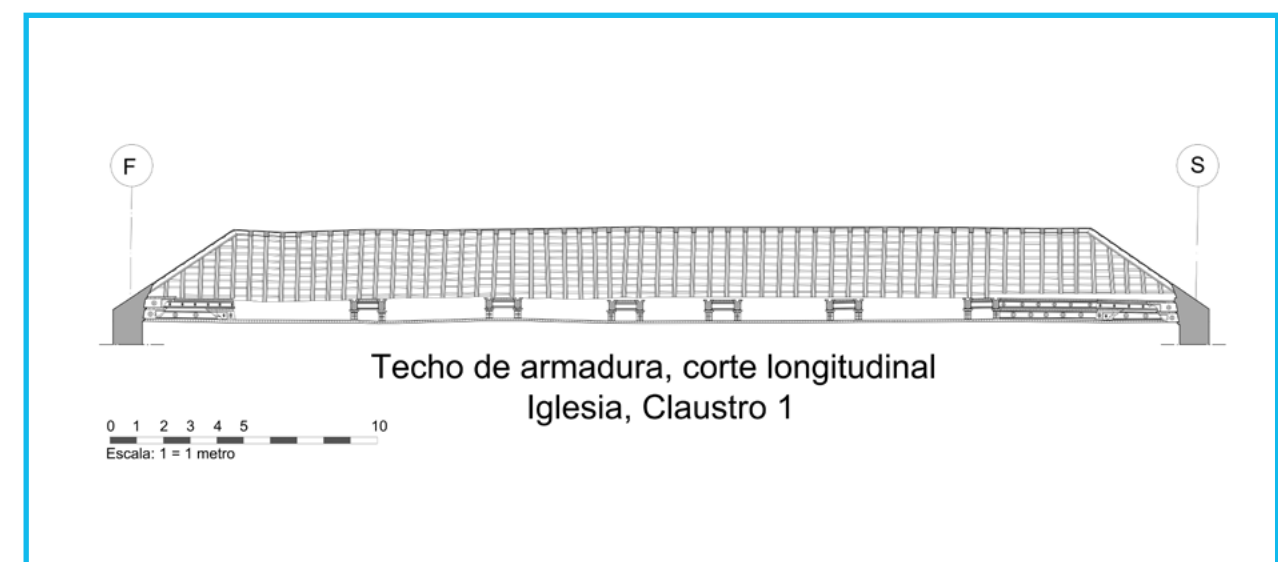


Fig. 195: Corte longitudinal, restitución en AutoCAD

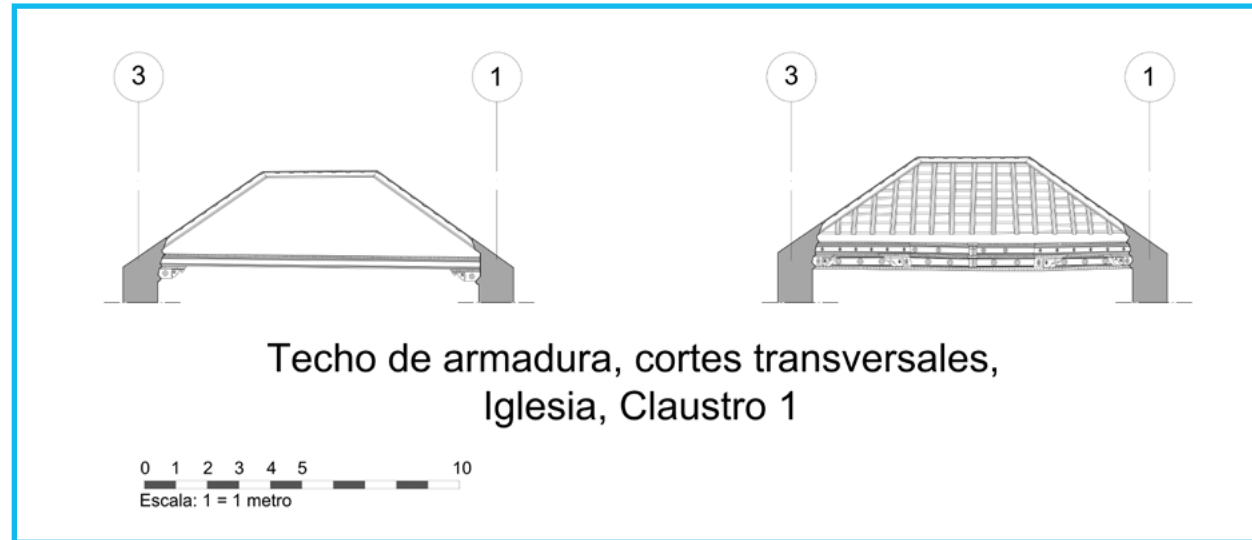


Fig. 196: Cortes transversales, restitución en AutoCAD

La generación de ortoimágenes y planos de AutoCAD posibilitan la realización de modelos tridimensionales, lo que permite que la información visual sea más accesible al público. Estos modelos en 3D, elaborados con las medidas reales para que el producto final no presente imperfecciones, son también una herramienta en los proyectos de restauración, así como para animaciones virtuales y videos promocionales. Seguidamente se muestran los resultados gráficos del 3D obtenido del techo de la iglesia (Figura 197)

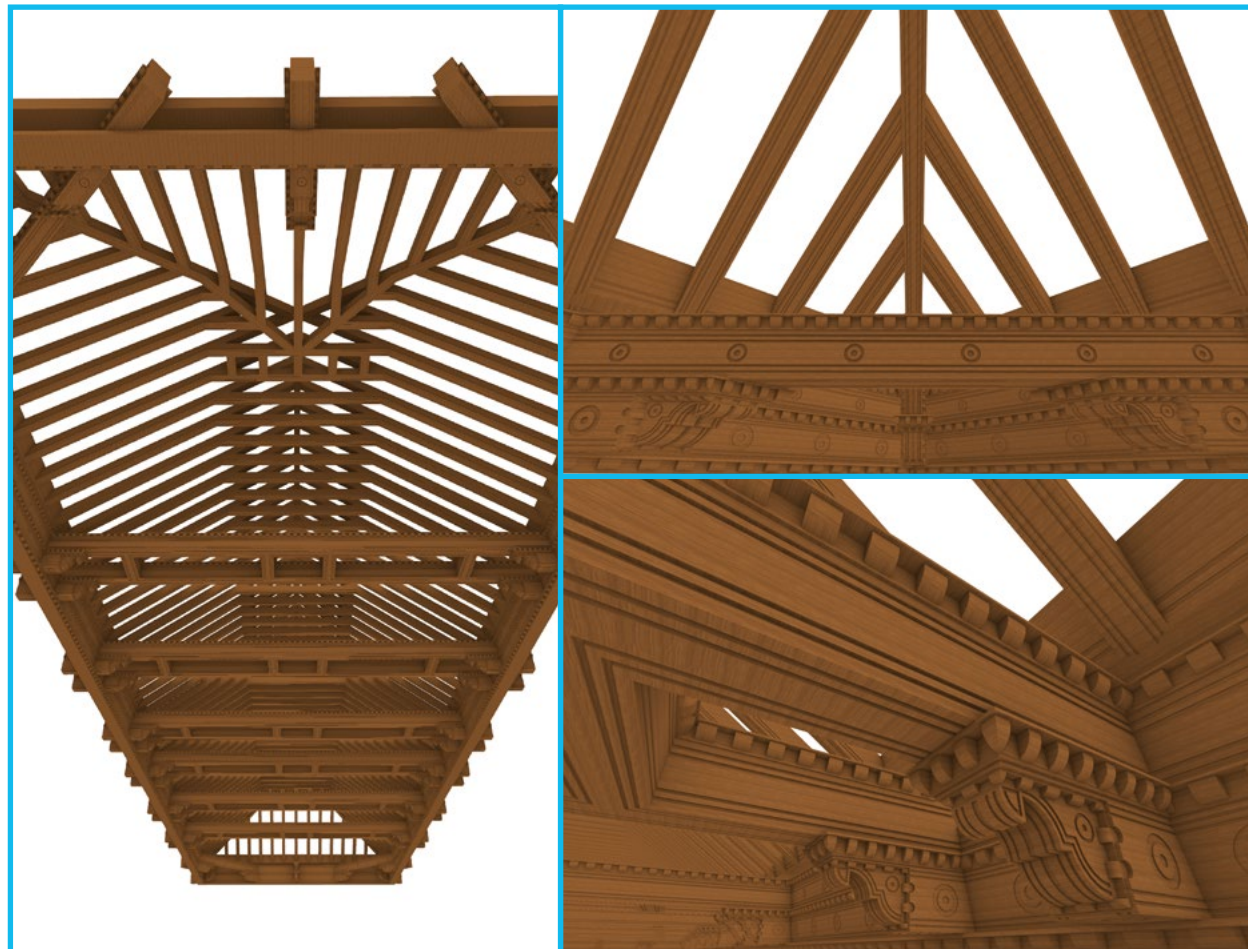


Fig. 197: Modelos tridimensionales obtenidos del techo de la iglesia

4.2. LAS NUBES DE PUNTOS PARA EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural de un edificio, las nubes de puntos resultan ser una herramienta de gran importancia. Con el uso de las ortoimágenes se determinan las dimensiones de aquellos elementos que no son de fácil acceso, como los techos de armadura, con lo cual es posible identificar problemas estructurales no detectables a simple vista, como pueden ser desviaciones en la verticalidad y/u horizontalidad de los elementos.

Muchas edificaciones patrimoniales han sufrido con los años de explotación los efectos y el ataque de agentes externos como el clima, los desastres naturales, los cambios físicos por la propia naturaleza de sus materiales, las acciones provocadas por el hombre, etc. Esto ha resultado en modificaciones en la estructura del edificio, siendo el desplome de los muros una situación muy común que puede culminar en derrumbe y pérdida de la integridad del conjunto.

Con las nubes de puntos se pueden realizar Modelos Digitales de Elevación (DEM- siglas en inglés). Estos son imágenes que muestran por medio de escalas de colores, variaciones en los elementos que se estudien. Para detectar estos movimientos se utilizan las posiciones de los puntos de las nubes, los cuales contienen la información de posición (coordenadas x, y, z) real obtenida por el escáner láser.

El procedimiento para extraer un DEM es muy parecido al de la extracción de ortoimágenes. Se emplea el mismo sistema de coordenadas local que para la ortoimagen, se modifican los valores RGB de los puntos por valores de profundidad y se le otorga a la selección un sistema de colores para diferenciar los diferentes niveles. Cada color representa la ubicación de los puntos con referencia al sistema de coordenadas local utilizado. De esta forma se puede observar si el elemento tiene variaciones de verticalidad.

Esta herramienta fue utilizada en el muro de la iglesia de la fachada por la calle Cuba. En el modelo de elevación se aprecia la variación en la verticalidad del muro, identificada por las diferencias de colores (Figura 198), más acentuados en la zona hacia donde cruzan los ejes F y E. Para evaluar con exactitud la magnitud del desplome del muro en toda su extensión, se realizaron secciones transversales a una distancia de cinco metros entre cada uno, para un total de 12 secciones. La sección 1.10 muestra una diferencia de 21 cm entre la base del muro y su parte más alta (Figura 199).

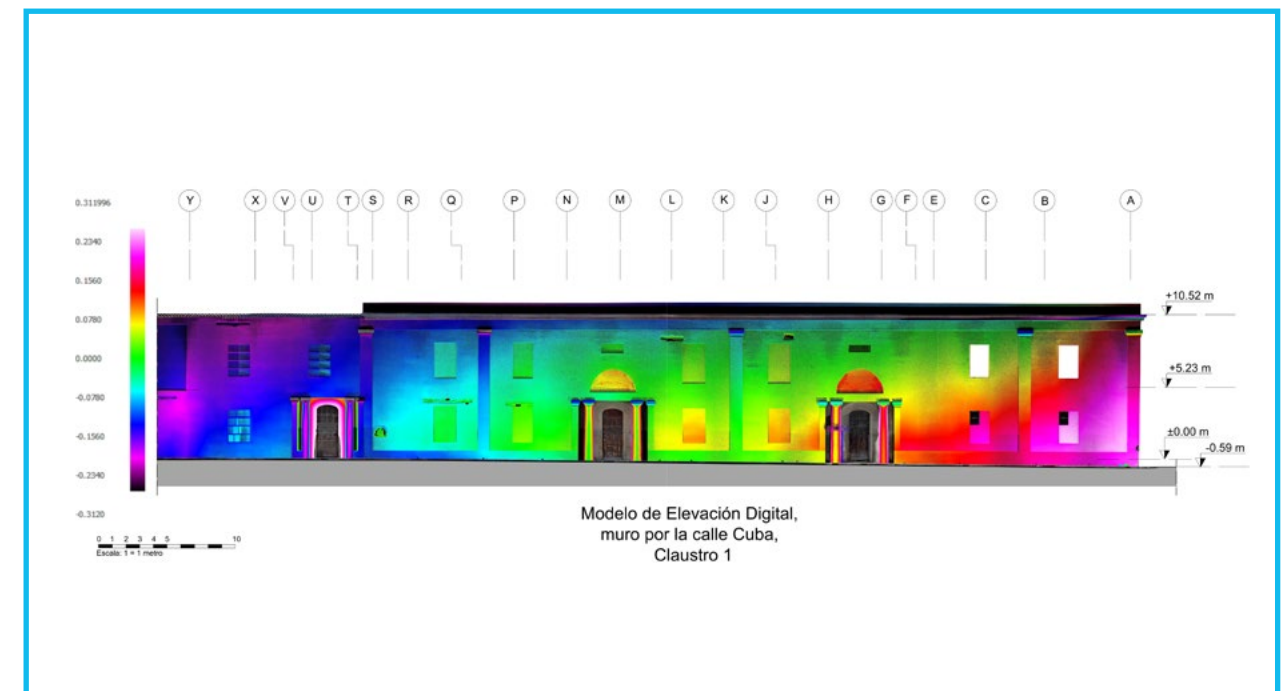


Fig. 198: Modelo de Elevación Digital donde se reflejan las variaciones en la verticalidad del muro hacia la calle Cuba, primer claustro

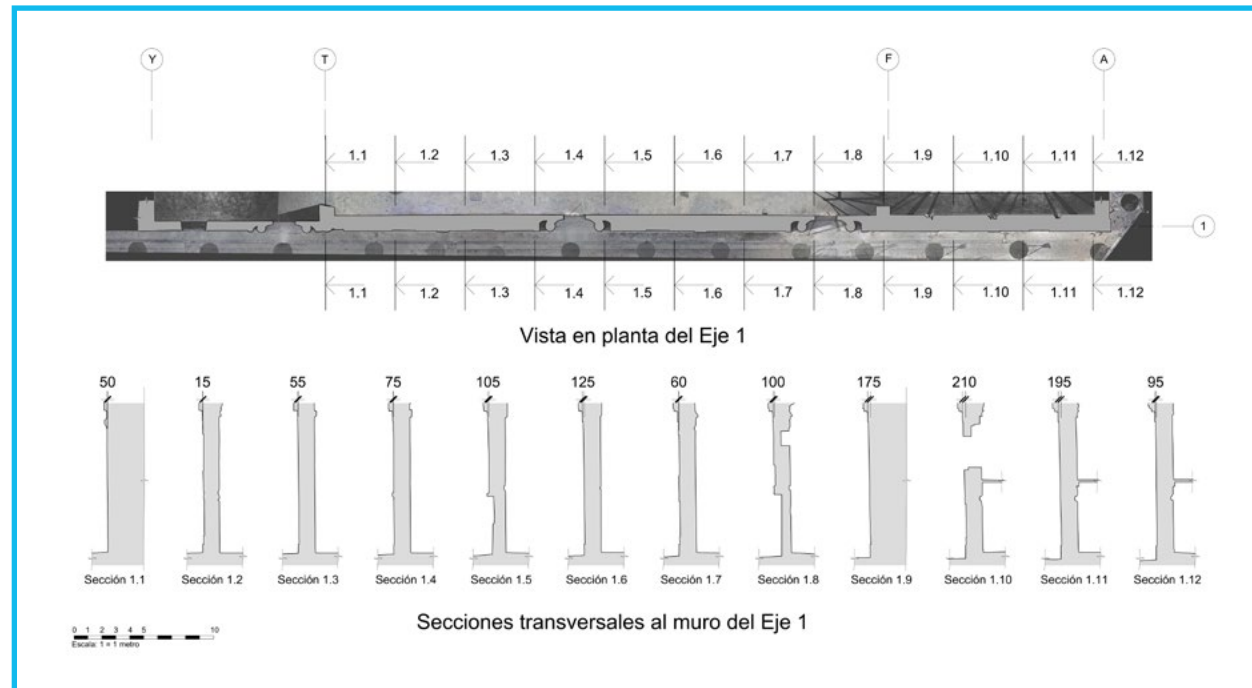


Fig. 199: Secciones transversales al muro de la iglesia hacia la calle Cuba, primer claustro

Para el análisis integral de la estructura de la iglesia, se incluyeron ortoimágenes transversales con el propósito de calcular la deformación de algunas de sus piezas. Para esto se empleó el programa AutoCAD como herramienta para medir y comparar las diferencias. Los cortes fueron ubicados para analizar también los tirantes pareados y de esta forma evaluar la existencia de deformaciones en el forjado.

En AutoCAD se trazó una línea horizontal sobre la ortoimagen, a partir del inicio de cada tirante desde el eje 1 hasta el otro extremo. Este método permitió determinar el valor de la deformación real de las piezas. Para el análisis en los pares del techo de la galería, se empleó la misma metodología (Figura 200).

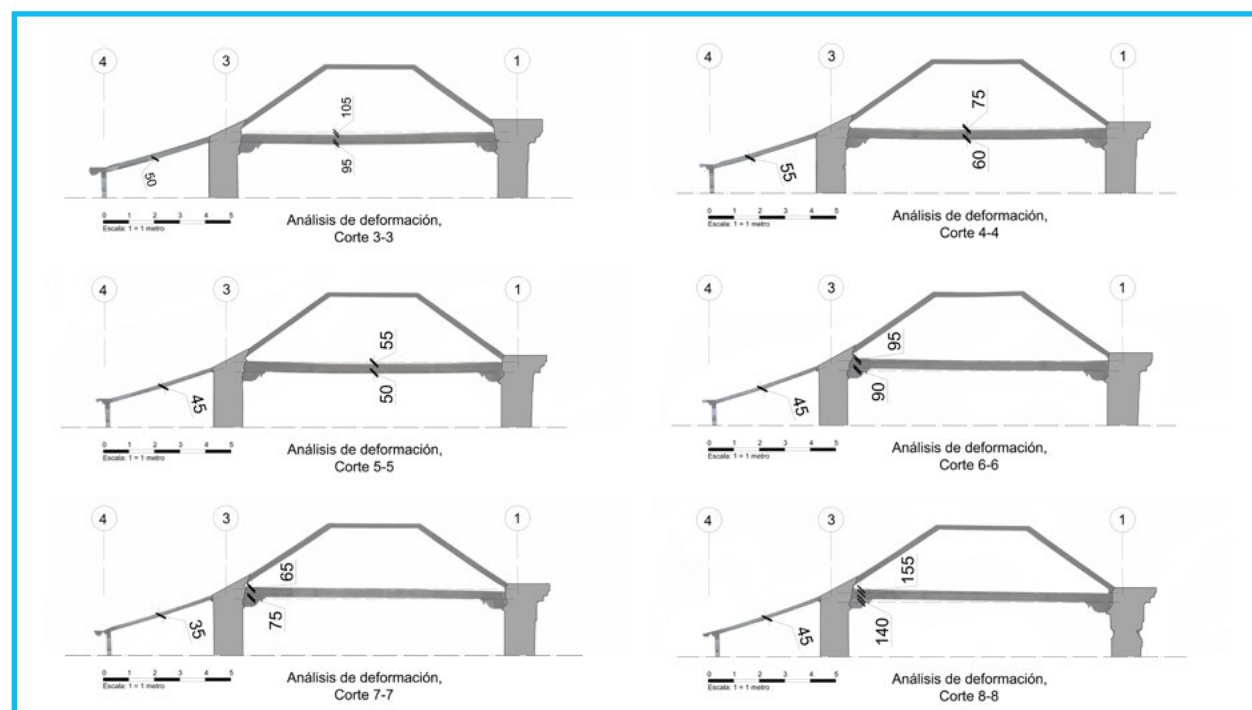


Fig. 200: Análisis de deformación de la estructura del forjado de la iglesia, primer claustro

En los resultados obtenidos se refleja que los tirantes pareados en el corte 8-8, son los que más deformación tienen en todo el conjunto. Con respecto al forjado de la galería en planta alta, el corte 4-4 muestra las deformaciones presentes en los elementos de madera que los conforman.

En un proyecto de levantamiento, con el uso de la tecnología escáner láser terrestre, la información resultante adquiere mucho valor debido al volumen de datos tridimensionales obtenidos del conjunto edificado, y el ahorro de tiempo en la adquisición de los mismos. La gestión correcta de esa información y las diferentes interpretaciones que pueden extraerse de la misma, permiten resultados más completos y detallados.

Estos aspectos agilizan los procesos de restauración, así mismo, con el conocimiento geométrico preciso del inmueble se consiguen soluciones constructivas mucho más eficientes.

5. LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL PARA LA DOCUMENTACIÓN PATRIMONIAL

Etimológicamente, el término fotogrametría proviene de tres palabras griegas: photos que significa luz; gramma que significa dibujo o escritura; y metrón que significa medir. Se puede entender como la ciencia que permite determinar las propiedades métricas y geométricas de los objetos y sus situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas.

Es una técnica indirecta debido a que las mediciones no se efectúan sobre el objeto, sino sobre imágenes del mismo. Se apoya fundamentalmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva, y de la visión estereoscópica que posee naturalmente el ser humano.

La técnica surge a mediados del Siglo XIX cuando Aimé Laussedat (1819-1907) presentó el primer ejemplo de fotogrametría: análisis de fotografías para la creación de mapas topográficos. En 1858 realizó su primer mapa a partir de fotos aéreas y terrestres. Con la difusión de las cámaras de 35 mm, entre los años 60 y 70 del siglo xx, se desarrollaron los instrumentos fototeodolitos y estereógrafos, así como los procedimientos para documentar obras arquitectónicas.

En los años 90, el desarrollo de la fotografía digital permitió el uso de la informática para procesar las imágenes. Con la difusión de los escáneres láser a principio del siglo xxi, hubo una disminución del uso de las técnicas fotogramétricas. En 2005 y 2006 la formulación y utilización de algoritmos de automatización, y el uso de softwares fotogramétricos especiales, permitieron la obtención de nubes de puntos densas con la misma exactitud que los escáneres láser.

En la actualidad esta disciplina se aplica en diversas áreas de trabajo, no solo en la documentación de obras patrimoniales muebles e inmuebles, sino también en el mundo artístico y la creación de videojuegos. Esto ha estado influenciado por el desarrollo de programas y sistemas informáticos más avanzados, y el uso de diferentes plataformas para la toma de las imágenes.

El resultado de este proceso es un modelo de malla triangular en tres dimensiones de los objetos. La documentación óptima con el método fotogramétrico depende de muchos factores. Debido a que se basa en fotografías, se deben asegurar aspectos como: valores correctos de exposición en las imágenes tomadas, correcto enfoque de la escena y baja sensibilidad ISO. De esta forma el software reproducirá un modelo digital muy fiel a la realidad.

5.1. APLICACIONES FOTOGAMÉTRICAS EN OBRAS DEL CENTRO HISTÓRICO DE LA HABANA

5.1.1. Aljibe del Convento de Santa Clara de Asís

Los aljibes fueron creados en la época colonial para recoger el agua de las lluvias que caían de los techos de los edificios, a través de caños de ladrillos. En el Convento de Santa Clara de Asís, se ubica un aljibe en el patio del primer claustro, el cual se compone de un estanque de muros y pisos de mampostería revocados y cubiertos con una sólida bóveda de sillería, con una capacidad de 60 000 litros. Justo en el medio se ubicó un volumen de piedra esculpido de manera que decorase todo el conjunto (Figura 201).



Fig. 201: Aljibe del Convento de Santa Clara de Asís

En el desarrollo del trabajo se tomaron 607 fotografías alrededor del volumen, con un solapamiento entre ella del 70 % al 80 %. Esto permite que los algoritmos matemáticos que construyen el modelo reconozcan los puntos comunes de cada imagen, y construyan la nube de puntos a partir de ellos. Se utilizó una cámara Nikon D750 con un lente 24 mm f1.8, montada sobre un trípode, con disparador remoto para evitar trepidaciones.

En el software se divide todo el proceso en varias etapas: la primera es alinear las fotos buscando los puntos homólogos de cada imagen para crear una nube de puntos dispersa o ligera, posteriormente, utilizando el mismo método, se crea una nube de puntos densa, lo que facilita en mayor medida el cálculo de una malla triangular a partir de esos puntos. Para finalizar, esa malla se texturiza a partir de las propias fotografías, obteniendo como resultado un modelo tridimensional texturizado (Figura 202).

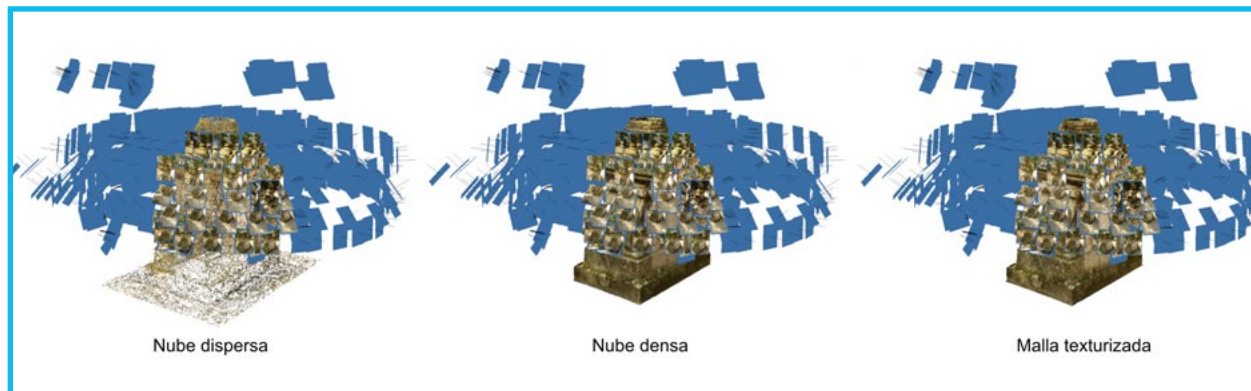
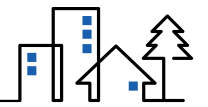


Fig. 202: Proceso que muestra las diferentes etapas de creación de la ortofoto

La nube de puntos creada, igual que las obtenidas por el TLS, tiene un sistema de coordenadas x; y; z, y cada punto tiene información de posición en el espacio referenciado a ese sistema. Para escalar el modelo a las medidas reales se utilizaron las nubes de puntos del TLS del mismo aljibe, es decir, anterior a la toma de fotografías se escaneó para captar toda la geometría del lugar. Con el uso de puntos comunes predeterminados, se unieron los dos tipos de información en un solo sistema de coordenadas (Figura 203).



Poder trabajar con ambos tipos de información en un solo sistema de coordenadas facilita la integración de información de diferentes técnicas en un solo modelo, y permite el estudio tanto desde el punto de vista colorimétrico, como geométrico del aljibe en su totalidad. Para ello se extrajeron de forma ortogonal las vistas más comunes utilizadas para la visualización de la arquitectura, en este caso específico la vista en planta y cuatro cortes hacia cada cara del volumen de piedra (Figuras 204, 205). De esta forma es posible determinar las dimensiones del volumen escultórico, realizar proyectos de restauración y servir como herramienta al diagnóstico en la determinación de las áreas afectadas y las diferentes formas de patologías presentes como pátinas de origen biológico, erosión, entre otras (Figura 206).



Fig. 203: Nube de puntos del TLS (escala de grises), y nube de puntos obtenidas por la fotogrametría (color) unidas en solo sistema de coordenadas

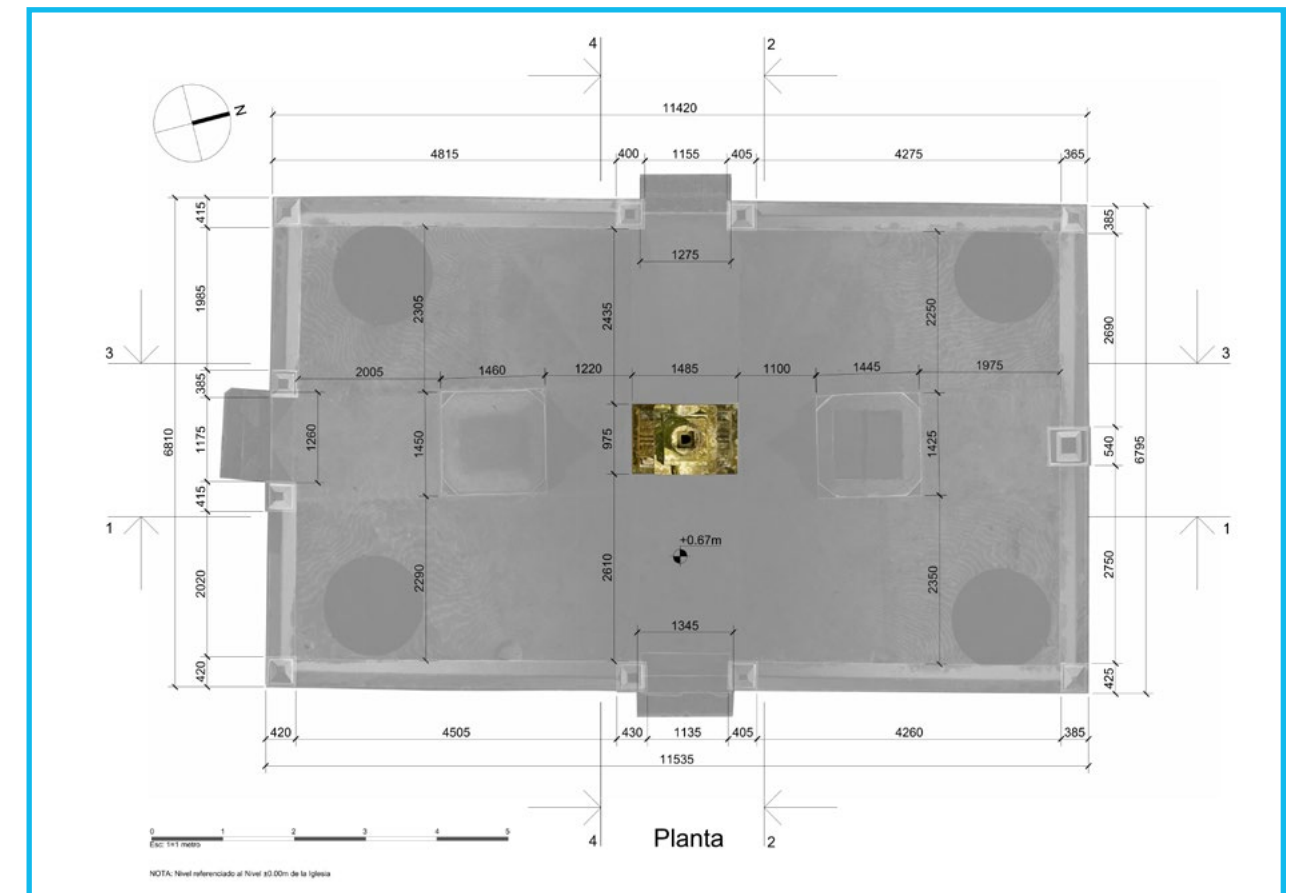


Fig. 204: Vista en planta del aljibe

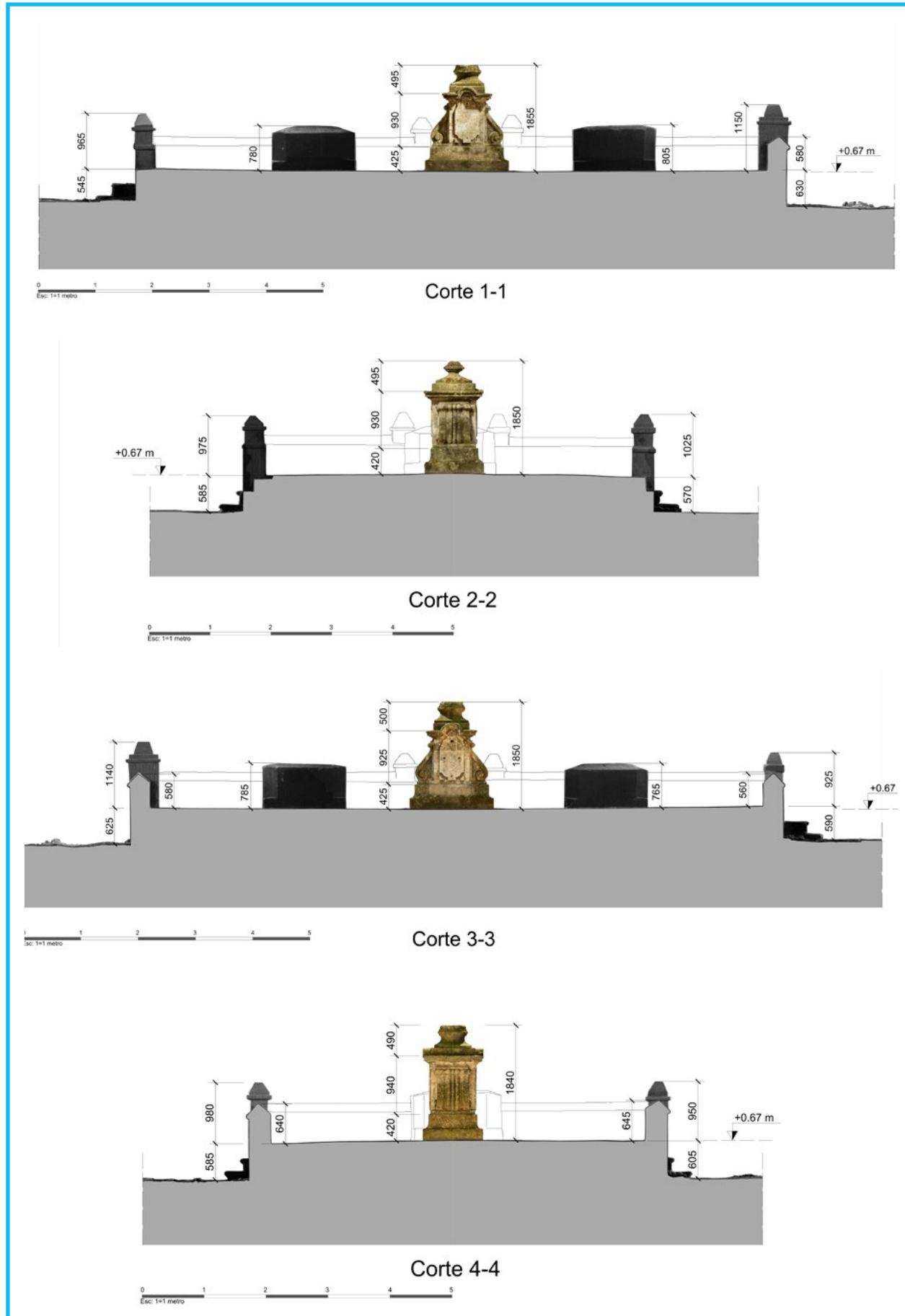


Fig. 205: Cortes del aljibe



Fig. 206: Modelo tridimensional de la escultura en piedra del aljibe obtenido mediante el levantamiento fotogramétrico, vista en perspectiva y ortogonal

5.1.2. Otros ejemplos de fotogrametría aplicada a la conservación

Mural de la calle Mercaderes entre Empedrado y O'Reilly: Obra que muestra 67 personalidades de la cultura, reproducida con el propósito de contribuir en las soluciones conceptuales del Hotel Catedral (Figura 207).



Fig. 207: Ortofoto del mural de las personalidades en la calle Mercaderes



Fig. 208: Modelos tridimensionales de los bustos de los mártires de historia. Palacio de los Capitanes Generales

Bustos en mármol de los mártires de historia: ubicados en el Museo de la Ciudad, Palacio de los Capitanes Generales, este trabajo fotogramétrico fue realizado con el objetivo de reproducirlos igualmente en mármol mediante impresión 3D, para colocarlos como objeto expositivo en el Capitolio Nacional (Figura 208).

La protección, salvaguarda y valorización del patrimonio arquitectónico es imperativo, por eso, investigar y conocer en profundidad, desde el punto de vista morfológico, las obras edificadas, permite acatar acciones que prevengan mayores desgracias y así preservarlas para futuras generaciones. La fotogrametría y el escáner láser terrestre, favorecidos con el desarrollo tecnológico a través de los años, han revolucionado los trabajos de documentación. La gran ventaja que tiene trabajar con este tipo de información es el registro y levantamiento del bien patrimonial, el punto de partida para cualquier trabajo de restauración, la creación de un archivo digital que se almacene en base de datos como memoria histórica, la valorización del bien por medio de videos o imágenes promocionales, y la accesibilidad del patrimonio a sectores de la población no especializada.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Almagro Gorbea, A. (2004). Levantamiento Arquitectónico. Granada: Universidad de Granada.
- Angás Pajas, J. (s.f.). Valorización, difusión y estandarización de la documentación geométrica del patrimonio. En Ministerio de Cultura (coord.). Documentación gráfica del patrimonio. España: Ministerio de Cultura.

- Angás Pajas, J., & Alfredo Serreta, O. (2012). Métodos, técnicas y estándares para la documentación geométrica del patrimonio cultural. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 38-42.
- Azkarate, Agustín, M. J. Ruíz de Ael, and Alberto Santana. "El patrimonio arquitectónico." País Vasco: Ediciones UPV. EHU. Recuperado de: <http://cort.as/-ICEt> (2003).
- Corso Sarmiento, J. M. (2015). Gestión y explotación de la información TLS de 3D a 2D y 2.5D. Análisis, selección y síntesis a partir de la tecnología Escáner Láser Terrestre. (Tesis inédita de doctorado), Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, Barcelona.
- Cuevas Toraya, J. D. I. (2001). 500 años de construcciones en Cuba. La Habana: Chavín, Servicios gráficos y editoriales.
- Machín, Teresa Larumbe. "El lenguaje posmoderno de Nolli. Apuntes de un viaje a través del tiempo."
- Latorre, Pablo, and Leandro Cámara. "El levantamiento para la restauración: No hay método sin herramientas". *Loggia, Arquitectura & Restauración* 22-23 (2010): 16-37.
- Montells de Bobes, Anna, and Raúl Rubio de la Torre. Estudio y levantamiento arquitectónico con láser 3D de la iglesia de Sant Pere de Rodes. BS thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- Díaz, Hernán Porras, Jhon Jairo Cáceres Jiménez, and Elver Omar Gallo Lancheros. "Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre". *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento* 18.41 (2014): 134-153.
- Vieja, P. M. P. L. R. I. D. L. H. (2009). Regulaciones Urbanísticas Ciudad de La Habana. Centro Histórico La Habana Vieja. La Habana: Ediciones Boloña.
- Weiss, J. (1978). Techos coloniales cubanos. La Habana: Editorial Arte y Literatura.

RESUMEN BIOGRÁFICO DE LOS AUTORES

NIURKA FERNÁNDEZ MUÑOZ

- Graduada de Ingeniería Geofísica en el Instituto Politécnico de Kazajastán en el año 1988.
- Realizó una maestría en Conservación del Patrimonio Construido en la Universidad Tecnológica de La Habana en el 2006. Ha participado en diversos cursos de postgrado, seminarios, eventos, encuentros de geofísica y de diagnóstico.
- Ha sido tutora de tesis de estudiantes de Geofísica, Ingeniería Civil de Cuba y de los Institutos de Arquitectos y Aparejadores de España.
- Desde el año 2001 se desempeña como Especialista Principal del Taller de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa RESTAURA en la Oficina del Historiador de La Habana.

NAYELIS SÁNCHEZ RUIZ

- Graduada de Ingeniería Civil en la Universidad Tecnológica de La Habana 2018.
- Proyectista en la Empresa RESTAURA durante dos años y medio, luego Especialista de Diagnóstico en la propia empresa hasta la actualidad.
- Ha estado involucrada en el desarrollo de proyectos, asistencias técnicas, controles de autor, informes de diagnóstico en diversos tipos de obras como viviendas, hoteles, entidades gastronómicas, museos, oficinas, centros de desarrollo social, etc.
- Ponente de "Técnicas de diagnóstico para la identificación de deterioros en los elementos constructivos. Restaurante La Mina" en las Jornadas Técnicas Restaura 2021.
- Coordinadora del Proyecto de Colaboración Internacional HERIFIND desde 2021.

ROBERTO CASTELLÁ BELLO

- Graduado de Ingeniería Civil en la Universidad Politécnica de La Habana en el año 2021.
- Se ha desempeñado como especialista en formación en el Departamento de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa RESTAURA, así como Proyectista General.
- Ha participado como co-autor de artículos de investigación publicados por el Taller de Diagnóstico y Levantamiento.

ÁNGELA DIOMEDES ALMEYDA RODRÍGUEZ

- Graduada de la especialidad de Materiales de la Construcción en el Instituto Técnico de la Construcción José Martí en el año 1978.
- Se inicia profesionalmente en el Centro Técnico de Materiales de la Construcción realizando trabajos de investigación de materiales.
- Participa en la publicación de la *Revista ICIDCA*.
- Actualmente se desempeña como Especialista de Proyecto, posee experiencia avalada en deterioro de estructuras. Ha participado en diversos proyectos de cooperación internacional, así como en el desarrollo de eventos, cursos y diversas publicaciones técnicas.

EDREY BERRIO ALAYO

- Graduado de la Escuela Gaspar Melchor de Jovellanos de la Oficina del Historiador de La Habana, en el año 1998.
- Se especializa en obras de restauración y deterioro de estructuras. Ha estado involucrado en cursos sobre Bóvedas extremeñas en las ciudades de Mérida y Badajoz, en Extremadura, España; así como diversos cursos sobre métodos de restauración y consolidación.
- Actualmente es Especialista en Diagnóstico de edificaciones.

ALBERTO HERNÁNDEZ OROZA

- Graduado de Ingeniería Química en la Universidad Tecnológica de La Habana, en el 2007 y Máster en Gestión Ambiental en la temática de impacto de la contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio.
- Desde el 2016 dirige el Taller de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa RESTAURA, donde se coordinan y procesan diversas actividades de investigación, docencia y proyectos para la conservación del Centro Histórico de La Habana.
- Miembro de la Red de Prevención del Efecto de Cambio Climático (Red PREVECI) en la Infraestructura de Iberoamérica.
- Miembro de la Asociación Iberoamericana de Patologías, Recuperación y Calidad de las Construcciones (ALCONPAT).

RAFAEL GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

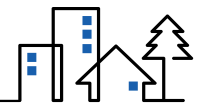
- Graduado en la especialidad de edificaciones en el Instituto Superior Pedagógico, en 1992.
- Jefe del Departamento de Diagnóstico de Estructuras Militares en el Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción (CITEC), de la Unión de Construcciones Militares.
- Se desempeña como Especialista Superior en el Taller de Diagnóstico y Levantamiento. Autor de diversos artículos de investigación relacionados con la construcción.

PATRICIA BRAÑA NUEZ

- Graduada de Ingeniería Civil en la Universidad Politécnica de La Habana, con experiencia profesional e investigativa en el diagnóstico estructural de edificaciones al ejercer como Especialista en Proyectos e Ingeniería en RESTAURA.
- Mostrada competencia en análisis y diseño estructural, específicamente en ingeniería sísmica, con publicaciones al respecto, así como del diagnóstico de edificaciones patrimoniales. Se especializa en temas que abordan el desarrollo sostenible y el cambio climático.
- En la actualidad cursa un Máster en Diseño, Ingeniería y Análisis Metropolitano.

ALINA ROMEO SÁEZ

- Licenciada en Biología en la Universidad de La Habana, en 1986 y Máster en Conservación del Patrimonio Cultural en La Universidad de Las Artes, en 2019.
- Labora desde el año 2008 como especialista en el Departamento de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa RESTAURA.



- Diagnostica el estado de conservación de la madera y elementos pétreos presentes en las edificaciones. Ha participado como autora o coautora en eventos nacionales e internacionales, y diversas publicaciones sobre la biología en la conservación del patrimonio cultural. Colabora en actividades docentes en tutoría de tesis de grado y adiestramiento a recién graduados.

BETZAIDA RODRÍGUEZ ROSALES

- Graduada de Microbiología en la Universidad de La Habana, en el año 2008.
- Máster en Conservación del Patrimonio Cultural. Especialista en biodeterioro con estancias de investigación en España.
- Ha participado en tres proyectos nacionales y dos internacionales de investigación con la Universidad Pablo de Olavide en Sevilla. Investigadora adjunta del Taller de Diagnóstico y Levantamiento de la Empresa RESTAURA.
- Actualmente se desempeña como Profesora e Investigadora del Departamento de Ciencias Aplicadas de la Facultad de Artes de la Conservación del Patrimonio Cultural de la Universidad de las Artes.

PEDRO RAMÓN CUÉTARA PÉREZ

- Licenciado en Preservación y Gestión del Patrimonio Histórico Cultural, en el Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, en el año 2007.
- Ha realizado cursos de postgrado en Levantamiento, Calificación y Documentación de Edificios Patrimoniales, Tecnologías Digitales en el Patrimonio y Levantamiento Digital y Modelación 3D.
- Se desempeña como Especialista Superior de Proyectos e Ingeniería en el Taller de Diagnóstico y Levantamiento. Ha realizado diversas publicaciones en revistas internacionales y libros, así como participado en proyectos de colaboración internacional.

La contribución de la Federación de Rusia, a través del PNUD, coadyuva al mejoramiento de las condiciones de vida de la población capitalina de sus áreas centrales. También propicia el fortalecimiento de las capacidades de gestión, intervención y conocimiento de instituciones clave que trabajan la reducción del riesgo de desastre en el sector de la vivienda. La experiencia puede ser extendida a otras áreas de La Habana y del país.

El trabajo realizado y sistematizado por la Oficina del Historiador de La Habana, por más de veinte años, es un ejemplo de la voluntad política del Gobierno de Cuba de implementar metodologías de trabajo que permitan la identificación temprana del estado técnico de las edificaciones de la capital, para la toma oportuna de decisiones en función de proteger a la población.

Al preparar este libro hemos querido poner a disposición del lector una serie de herramientas y metodologías para el diagnóstico de edificaciones y el levantamiento arquitectónico. A través de cinco capítulos se abordan las temáticas relacionadas con los sistemas constructivos basados en madera, piedra, hormigón armado y acero; la importancia de las investigaciones biológicas del estudio patológico de las edificaciones para su conservación, y las metodologías para realizar levantamientos arquitectónicos a partir del empleo de herramientas modernas como escáner láser y fotogrametría digital.

Los procedimientos de trabajo e investigación presentados por los autores han sido avalados internacionalmente mediante publicaciones en revistas especializadas en estas materias, de alto factor de impacto, así como en seminarios, cursos, conferencias y proyectos de colaboración e intercambio técnico entre universidades y centros de investigación de diversos países. La implementación de estas técnicas se evidencia en los resultados alcanzados en la conservación del Centro Histórico de La Habana.

**¡Por una Habana resiliente, enfrentando grandes retos
y preparando a las entidades y comunidades!**



Con el apoyo financiero
de la Federación de Rusia



EDICIONES BOLOÑA
PUBLICACIONES DE LA OFICINA DEL HISTORIADOR

ISBN: 978-959-272-1

