

*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

HERRAMIENTAS PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CONSERVACIÓN DE PUENTES DE FÁBRICA

Trabajo realizado por:
OIHAN DE ANDRÉS JEREZ

Dirigido:
HAYDEE BLANCO WONG
YOSBEL BOFFILL ORAMA

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, septiembre de 2025

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han hecho posible la realización de este trabajo. Este proyecto, que comenzó como una idea, ha llegado a buen puerto gracias a su inestimable apoyo y colaboración.

En primer lugar, a la Universidad de Cantabria y, en particular, a la Escuela de Caminos, Canales y Puertos. El rigor académico y la excelencia de la formación recibida aquí no solo me han proporcionado los conocimientos técnicos necesarios, sino que el inmejorable ambiente estudiantil me ha acompañado y motivado a lo largo de estos años. El tiempo que he pasado en sus aulas ha marcado una etapa fundamental en mi desarrollo profesional y personal.

A mis directores, Haydee y Yosbel, por su orientación, paciencia y profesionalidad incansable. Su guía experta ha sido la brújula que ha dirigido este proyecto, y su apoyo constante ha sido fundamental en cada etapa. Agradezco de manera especial a Haydee por su cercanía, empatía y comprensión durante un periodo personal particularmente exigente, demostrando que la verdadera dirección va más allá de lo académico.

A un gran amigo, por acompañarme en la aventura a Liérganes. Su presencia y colaboración fueron clave para que el trabajo de campo, con la vergüenza de medir y fotografiar con tantos turistas alrededor, se convirtiera en una experiencia compartida y más llevadera.

Y por supuesto, a mi familia. Su confianza en mí ha sido el motor de mi perseverancia. A mis *aitites*, por su generoso apoyo financiero durante el máster, un gesto que alivió una gran presión y me permitió enfocarme completamente en mis estudios. Y a mi *aita* y *ama*, por haberme creado, criado y amado. Su apoyo incondicional, tanto emocional como físico, ha sido la base inquebrantable sobre la que se ha cimentado el desarrollo de este proyecto y la construcción de mi persona. A ellos les dedico este trabajo, como una pequeña muestra de gratitud por todo lo que me han dado.

RESUMEN

El Trabajo Fin de Máster titulado “Herramientas para la evaluación del estado de conservación de puentes de fábrica” aborda el uso de técnicas digitales avanzadas para la documentación, análisis y conservación de este tipo de infraestructuras históricas. El punto de partida es la necesidad de contar con metodologías que permitan no solo representar con precisión la geometría de los puentes, sino también integrar información sobre su comportamiento estructural y sobre los daños que presentan.

Una parte fundamental del trabajo se centra en el estado del conocimiento, donde se revisan los principales enfoques empleados en la conservación de puentes de fábrica. Se analizan aspectos como su comportamiento estructural y mecánico, los procesos patológicos más habituales, las técnicas tradicionales de inspección y las herramientas actuales para su evaluación. Se presta especial atención a la evolución de las tecnologías digitales aplicadas al patrimonio, destacando la fotogrametría y el modelado H-BIM. Esta revisión constituye la base teórica que sustenta la aplicación práctica desarrollada.

La investigación se materializa en el caso de estudio del Puente Mayor de Liérganes (Cantabria), sobre el que se realizó un levantamiento topográfico mediante fotogrametría terrestre apoyada con estación total. La experiencia de campo puso de manifiesto la importancia de una planificación precisa, tanto en la disposición de dianas y ángulos de toma de fotografías como en la elección de horarios para minimizar la presencia de turistas. Además, se comprobó que la vegetación presente en la fábrica y en su entorno dificultó la captura de datos fiables, al interferir en la visibilidad de ciertos elementos.

A partir de las fotografías se generó una nube de puntos en Agisoft Metashape, posteriormente procesada en Autodesk ReCap, y empleada como referencia para el modelado paramétrico en Autodesk Revit. El resultado fue un modelo que reproduce con fidelidad la geometría del puente e incorpora parámetros relativos a su construcción y a los daños observados durante la inspección. De este modo, se demuestra el potencial de los modelos H-BIM como bases de datos interdisciplinarias, capaces de evolucionar hacia verdaderos gemelos digitales.

El trabajo identifica asimismo una serie de limitaciones prácticas, entre las que destacan las dificultades en la alineación automática de imágenes y el impacto de la vegetación en la precisión del levantamiento topográfico. Pese a ello, la metodología se muestra robusta y transferible a otros casos, ofreciendo un procedimiento replicable para la documentación y conservación de puentes de fábrica.

ABSTRACT

The Master's Thesis entitled 'Tools for assessing the state of conservation of masonry bridges' addresses the use of advanced digital techniques for the documentation, analysis and conservation of this type of historical infrastructure. The starting point is the need for methodologies that not only accurately represent the geometry of bridges, but also integrate information about their structural behaviour and damage.

A fundamental part of the work focuses on the state of knowledge, reviewing the main approaches used in the conservation of masonry bridges. Aspects such as their structural and mechanical behaviour, the most common pathological processes, traditional inspection techniques and current tools for their assessment are analysed. Special attention is paid to the evolution of digital technologies applied to heritage, highlighting photogrammetry and H-BIM modelling. This review constitutes the theoretical basis that underpins the practical application developed.

The research took the form of a case study of the Puente Mayor bridge in Liérganes (Cantabria), which was surveyed using terrestrial photogrammetry supported by a total station. The field experience highlighted the importance of precise planning, both in terms of the placement of targets and camera angles and in the choice of times to minimise the presence of tourists. In addition, it was found that the vegetation present on the structure and in its surroundings made it difficult to capture reliable data, as it interfered with the visibility of certain elements.

A point cloud was generated from the photographs in Agisoft Metashape, subsequently processed in Autodesk ReCap, and used as a reference for parametric modelling in Autodesk Revit. The result was a model that faithfully reproduces the geometry of the bridge and incorporates parameters relating to its construction and the damage observed during the inspection. This demonstrates the potential of H-BIM models as interdisciplinary databases capable of evolving into true digital twins.

The study also identifies a number of practical limitations, including difficulties in automatic image alignment and the impact of vegetation on the accuracy of the topographic survey. Despite this, the methodology is robust and transferable to other cases, offering a replicable procedure for the documentation and conservation of masonry bridges.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESCENARIO Y MOTIVACIÓN	1
1.2. OBJETO	2
1.2.1. Objetivo principal	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	3
1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	4
CAPÍTULO 2: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	6
2.1. PUENTES DE FÁBRICA	6
2.1.1. Historia	6
2.1.2. Tipología y elementos componentes.....	9
2.1.3. Materiales constituyentes	11
2.1.3.1. Piedra.....	11
2.1.3.2. Mortero.....	12
2.1.3.3. Relleno	12
2.1.4. Comportamiento estructural y mecánico	13
2.1.4.1. Mecanismo resistente del puente	13
2.1.4.2. Interacción bóveda-relleno-típanos.....	14
2.1.4.3. Condiciones de contorno y empotramiento.....	15
2.1.4.4. Línea de presiones y comportamiento al colapso	15
2.1.5. Procesos patológicos.....	16
2.1.5.1. Deterioros en la cimentación	16
2.1.5.2. Deterioros en la subestructura.....	18
2.1.5.3. Deterioros en la superestructura.....	19
2.1.5.4. Deterioros relacionados con los materiales	23
2.1.5.5. Otros procesos patológicos relevantes	24
2.1.6. Herramientas de evaluación	24
2.1.6.1. Inspecciones y evaluación preliminar	26
2.1.6.2. Ensayos no destructivos (END) y caracterización de materiales	26
2.1.6.3. Modelado de información para el patrimonio (H-BIM).....	30
2.1.6.4. Análisis numéricos y computacionales.....	30
2.2. FOTOGRAMETRÍA	31
2.2.1. Fundamentos de la fotogrametría y el proceso " <i>Structure-from-Motion</i> " (SfM)	32
2.2.2. Adquisición de datos.....	33
2.2.2.1. Fotogrametría terrestre de rango cercano	33
2.2.2.2. Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados	34

2.2.3.	Generación y procesamiento de modelos 3D para análisis estructural	34
2.2.4.	Aplicaciones en la evaluación y gestión de puentes de fábrica	35
2.2.4.1.	Documentación geométrica y patrimonial	35
2.2.4.2.	Detección y mapeo de deterioros	36
2.2.4.3.	Preparación de modelos para análisis estructural	36
2.2.4.4.	Monitorización de deterioros y gemelos digitales	36
2.2.5.	Consideraciones y desafíos	37
2.3.	DIGITALIZACIÓN	38
2.3.1.	Introducción	38
2.3.2.	Building Information Modeling (BIM)	39
2.3.2.1.	Definición y alcance	39
2.3.2.2.	Principios y beneficios generales	40
2.3.2.3.	Dimensiones del BIM	42
2.3.2.4.	Niveles de Desarrollo (LoD)	43
2.3.2.5.	Software BIM relevante	43
2.3.3.	Heritage-BIM (H-BIM)	44
2.3.3.1.	Introducción	44
2.3.3.2.	Particularidades y desafíos	45
2.3.3.3.	Flujo de trabajo y metodologías específicas	46
2.3.3.4.	Aplicaciones en la evaluación del patrimonio	48
2.3.3.5.	Beneficios	49
2.3.3.6.	Desafíos y perspectivas futuras	50
CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO		52
3.1.	PRESENTACIÓN DEL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	52
3.2.	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y CONSTRUCTIVAS	53
3.3.	INSPECCIONES	54
3.3.1.	Inspección básica	54
3.3.2.	Fichas de procesos patológicos	55
3.4.	METODOLOGÍA DESARROLLADA	58
3.5.	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	58
3.6.	MODELADO DEL PUENTE	61
3.6.1.	Generación de la nube de puntos mediante Agisoft Metashape	61
3.6.2.	Edición de la nube de puntos mediante Autodesk ReCap	64
3.6.3.	Modelado mediante Autodesk Revit	66
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES		70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72
ANEXO 1: FICHAS DE PROCESOS PATOLÓGICOS		76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Puente de fábrica en arco más antiguo de España (superior) [2] y puente de arco apuntado (inferior) [3].	7
Figura 2-2: Ponte Vecchio - Florencia [4].	7
Figura 2-3: Pont Neuf – París [5].	8
Figura 2-4: Pont Séjourné, un puente ferroviario de la línea de vía estrecha de Cerdagne [6].	8
Figura 2-5: Principales constituyentes y geometría de un puente arco de obra de fábrica [9].	9
Figura 2-6: Puente de Toledo – Madrid [10].	10
Figura 2-7: Pont Valentré – Cahors [11].	11
Figura 2-8: Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas de fábrica [12].	12
Figura 2-9: Respuesta de un puente arco de obra de fábrica a la sobrecarga aplicada [9].	13
Figura 2-10: Sección transversal. Esquema resistente transversal en un puente arco de obra de fábrica [9].	14
Figura 2-11: Esquema aproximado de la línea de presiones (thrust line) en un arco de obra de fábrica. Situación próxima al colapso [9].	15
Figura 2-12: Socavación en pila [13].	16
Figura 2-13: Esquema de procesos patológicos.	17
Figura 2-14: Pérdida de sillares en pie de pila [13].	18
Figura 2-15: Efecto del giro de estribo (superior) y de pila (inferior) en una bóveda [13].	19
Figura 2-16: Diferente comportamiento estructural entre el estribo y aleta [13].	19
Figura 2-17: Grietas por diferente rigidez entre bóveda-boquilla (izquierda) y entre bóveda-tímpano (derecha) [13].	20
Figura 2-18: Triarticulación en clave y arranques en bóvedas de fábrica [13].	20
Figura 2-19: Grieta diagonal en bóveda de fábrica debido a asientos diferenciales de la cimentación [13].	20
Figura 2-20: Deslizamiento de dovelas (izquierda) y humedades y eflorescencias (derecha) en bóvedas de fábrica [13].	21
Figura 2-21: Patologías habituales en los tímpanos [12].	22
Figura 2-22: Lavado de llagas en bóveda de sillería [13].	23
Figura 2-23: Agrietamiento de pared de ladrillo por el crecimiento de buddleja [14].	24
Figura 2-24: Esquema de herramientas de evaluación.	25
Figura 2-25: Vista general de la nube de puntos del puente romano de Ávila obtenida con TLS [16].	26
Figura 2-26: Puente de Cernadela: (a) Modelo de alambre 3D de toda la estructura, (b) modelo detallado de la segunda bóveda del puente con la posición de la cámara y los	

rayos de intersección de algunos puntos y (c) grietas medidas en los muros de los tímpanos [17].	27
Figura 2-27: Información geométrica del puente de Cernadela obtenida mediante GPR [17].	27
Figura 2-28: Ensayos MASW en el puente romano de Ávila: a) configuración; b) detalle del equipo utilizado y; c) momento en que se excita el relleno [16].	28
Figura 2-29: Ensayo de deformabilidad in situ mediante gatos planos [18].	29
Figura 2-30: Sensores de monitorización: (sup. izq.) sensor de nivel de presión diferencial, (sup. der.) transductor de desplazamiento, (inf. izq.) transductor de desplazamiento óptico y (inf. der.) celda de presión total circular [19].	29
Figura 2-31: Puente de Ízbor: nube de puntos y modelo BIM [20].	30
Figura 2-32: Esquema de adquisición de imágenes superpuestas para SfM [22].	32
Figura 2-33: Dos protocolos para el funcionamiento y la recogida de imágenes con UAV [25].	34
Figura 2-34: Marco de gemelos digitales para la supervisión de la salud de puentes: (a) parte física; (b) parte digital; (c) servicio; (d) conjunto de datos; y (e) conexiones [25].	37
Figura 2-35: Diagrama esquemático de un sondeo GPR [27].	38
Figura 2-36: Representación visual del concepto BIM [31].	40
Figura 2-37: Procesos de creación de modelos BIM en edificios nuevos o existentes en función del BIM disponible y preexistente y de las fases del ciclo de vida [29].	41
Figura 2-38: Simulación de la secuencia de construcción de un edificio [28].	42
Figura 2-39: Diagrama de flujo del método de construcción manual de la librería H-BIM [34].	47
Figura 2-40: Objetos paramétricos H-BIM: Mapeo de deterioro de bóvedas [36].	49
Figura 3-1: Ubicación del Puente Mayor en Liérganes [38].	52
Figura 3-2: Fotografía panorámica general del Puente Mayor de Liérganes.	54
Figura 3-3: Dimensiones principales del Puente Mayor de Liérganes.	54
Figura 3-4: Procesos patológicos identificados en el Puente Mayor de Liérganes.	58
Figura 3-5: Medición de posición de diana mediante estación total.	59
Figura 3-6: Trabajo de campo con turistas en el Puente Mayor de Liérganes.	59
Figura 3-7: Fotos del Puente Mayor de Liérganes tomadas desde diferentes ángulos.	60
Figura 3-8: Nube de puntos, posición de dianas y posición y dirección de la cámara en el Puente Mayor de Liérganes.	61
Figura 3-9: Importación de fotos a Metashape.	62
Figura 3-10: Importación de coordenadas a Metashape.	62
Figura 3-11: Posicionamiento de marcadores en fotografía en Metashape.	63
Figura 3-12: Alineamiento de fotografías (izquierda) y creación de nube densa de puntos (derecha) en Metashape.	63
Figura 3-13: Nube densa de puntos del Puente Mayor de Liérganes.	64
Figura 3-14: Importación de nube de puntos (sup. izq.), desactivación de la opción de perspectiva (inf. izq.) y selección de puntos para su eliminación (derecha) en ReCap.	65

Figura 3-15: Nube de puntos procesada del Puente Mayor de Liérganes.	65
Figura 3-16: Propiedades del tipo “tímpano” hecho a medida para el Puente Mayor de Liérganes.	66
Figura 3-17: Ajuste de los objetos paramétricos a la nube de puntos de Puente Mayor de Liérganes.	66
Figura 3-18: Modelo tridimensional del Puente Mayor de Liérganes.	67
Figura 3-19: Creación (izquierda) y visualización (derecha) de parámetros de datos generales.	67
Figura 3-20: Visualización de información paramétrica en el tímpano sur del Puente Mayor de Liérganes.	68
Figura 3-21: Listado de parámetros asociados a inspecciones (izquierda) y ejemplo de su cumplimentación en la bóveda mayor (derecha).	68
Figura 3-22: Visualización de parámetros asociados a inspecciones en la bóveda mayor del Puente Mayor de Liérganes.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ficha de inspección básica del Puente Mayor de Liérganes.....	55
Tabla 2: Ficha 1 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	76
Tabla 3: Ficha 2 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	78
Tabla 4: Ficha 3 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	80
Tabla 5: Ficha 4 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	82
Tabla 6: Ficha 5 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	84
Tabla 7: Ficha 6 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	86
Tabla 8: Ficha 7 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	88
Tabla 9: Ficha 8 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.	90
Tabla 10: Ficha 9 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.....	92
Tabla 11: Ficha 10 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.....	94
Tabla 12: Ficha 11 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.....	96
Tabla 13: Ficha 12 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.....	98
Tabla 14: Ficha 13 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.....	100

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ESCENARIO Y MOTIVACIÓN

La era contemporánea se define, en gran medida, por la digitalización masiva, un fenómeno que ha permeado y transformado cada faceta de la vida humana. Desde la comunicación personal y el comercio hasta la gestión de infraestructura crítica, la capacidad de capturar, procesar y almacenar datos de forma digital ha revolucionado la forma en que interactuamos con nuestro entorno. Este cambio de paradigma, que migra del mundo analógico al digital, no solo ha incrementado la velocidad y accesibilidad de la información, sino que también ha sentado las bases para la innovación en todos los sectores, permitiendo la creación de herramientas y metodologías que, hasta hace poco, eran impensables.

En el ámbito de la ingeniería y la arquitectura, esta revolución se manifiesta con particular intensidad a través de la metodología *Building Information Modeling* (BIM). Este, más que un simple software, representa un proceso holístico de gestión de información que permite a los profesionales del sector de la construcción crear modelos virtuales paramétricos de edificios. A diferencia de los métodos tradicionales de dibujo en 2D, un modelo BIM integra geometría, relaciones espaciales, propiedades de los materiales y datos de gestión del proyecto en una única base de datos inteligente. Esto fomenta una colaboración sin precedentes entre todos los actores del proyecto, desde diseñadores y constructores hasta gestores de instalaciones. La implementación de BIM se ha convertido en una necesidad creciente en la industria, ya que promete una mayor eficiencia, la reducción de errores de diseño y construcción, y una mejor coordinación, lo que conduce a una significativa optimización de los recursos a lo largo de todo el ciclo de vida de un activo.

Paralelamente a esta tendencia de modernización, existe un imperativo global por la conservación del patrimonio cultural. Monumentos históricos, estructuras tradicionales y obras de ingeniería antiguas son testigos silenciosos de la evolución de las sociedades. Su preservación no es solo una cuestión de valor arquitectónico, sino que es fundamental para la identidad cultural y la investigación histórica. No obstante, su naturaleza compleja y a menudo irregular, así como la falta de documentación precisa, representan un desafío considerable para su mantenimiento y restauración. Aquí es donde la digitalización y el BIM convergen, dando lugar a un campo especializado conocido como *Heritage-BIM* (H-BIM). Este enfoque adapta la metodología BIM a las particularidades del patrimonio cultural, integrando datos de levantamientos 3D (como fotogrametría y escaneo láser) con información histórica, material y patológica para

crear modelos digitales que no solo representan la forma de la estructura, sino que también documentan su estado de conservación.

El éxito de este proceso de digitalización, tanto en la construcción moderna como en la gestión del patrimonio, reside en un pilar fundamental: la creación y gestión de bases de datos sólidas y coherentes. Un modelo BIM o H-BIM no es valioso por su representación 3D en sí misma, sino por la riqueza de la información que alberga. Estas bases de datos actúan como un gemelo digital de la estructura real, permitiendo un análisis integral y la toma de decisiones eficiente. A través de ellas, es posible monitorizar el comportamiento estructural a lo largo del tiempo, identificar de manera proactiva zonas de riesgo o deterioro, y simular el impacto de intervenciones de conservación antes de llevarlas a cabo físicamente. De este modo, la información estructurada se convierte en el motor que impulsa un enfoque proactivo y basado en evidencia para la gestión del patrimonio, garantizando que su valor no solo se preserve para las generaciones futuras, sino que también se comprenda y se gestione de la manera más eficaz posible. Esta es la motivación central que impulsa la presente investigación: la necesidad de integrar y optimizar estas tecnologías para el análisis y la conservación de nuestro legado.

1.2. OBJETO

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la utilidad y eficacia de las herramientas de fotogrametría y la metodología BIM, aplicándolas al caso concreto del Puente Mayor de Liérganes. A través de esta aplicación práctica, se busca crear un modelo digital que no solo represente la geometría del puente con gran precisión, sino que también integre información multidisciplinaria, como datos de materiales, procesos patológicos y su estado de conservación, para que sirva como una base de datos inteligente para futuros análisis y toma de decisiones.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo principal de este trabajo, se establecen los siguientes objetivos específicos, que guiarán la metodología y el desarrollo de la investigación:

Marco Teórico y Diagnóstico del Patrimonio de Fábrica

- Comprender la naturaleza de los puentes de fábrica y sus procesos patológicos: Investigar la historia, tipologías constructivas, materiales constitutivos y los sistemas estructurales de los puentes de fábrica. Se analizarán las causas y manifestaciones de los procesos de deterioro más comunes, como la erosión, la socavación y las grietas, para sentar las bases de un diagnóstico preciso.
- Identificar las herramientas de evaluación no destructiva (END): Examinar las tecnologías y metodologías de evaluación no invasivas aplicadas al patrimonio construido. Se hará un énfasis especial en el escaneo 3D y la fotogrametría como herramientas para la documentación geométrica de alta precisión.

Fundamentos de la Metodología de Modelado Digital

- Desarrollar los fundamentos de la fotogrametría: Explicar los principios teóricos de la fotogrametría y la técnica *Structure-from-Motion* (SfM). Se detallarán los flujos de trabajo, desde la captura de imágenes hasta la generación de nubes de puntos densas y modelos 3D texturizados.

- Aclarar la metodología BIM y su adaptación al patrimonio: Profundizar en los conceptos clave de la metodología *Building Information Modeling* (BIM), más allá de ser una herramienta de software. Se explicará su evolución hacia el *Heritage-BIM* (H-BIM), destacando sus particularidades, desafíos y el valor que aporta a la documentación del patrimonio cultural, al permitir la integración de información histórica y del estado de conservación en un modelo paramétrico.

Aplicación Práctica y Creación del Modelo

- Capturar la geometría del Puente Mayor de Liérganes: Llevar a cabo una campaña de adquisición de datos para obtener un levantamiento geométrico del puente mediante fotogrametría. Este proceso permitirá crear una representación digital fiel del estado actual de la estructura, con un nivel de detalle que capture las irregularidades y patologías existentes.
- Construir un modelo H-BIM integral del puente: Desarrollar un modelo H-BIM del Puente Mayor de Liérganes utilizando los datos geométricos adquiridos. Este modelo servirá como una base de datos centralizada que incorporará información multidisciplinaria, como las propiedades de los materiales, la identificación y catalogación de daños (grietas, desprendimientos, etc.), y los datos dimensionales de los elementos estructurales.

1.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El desarrollo de este trabajo puede vincularse de manera directa con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Agenda 2030 de Naciones Unidas, en especial aquellos relacionados con la infraestructura, la sostenibilidad urbana y la acción climática.

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

El empleo de herramientas digitales como la fotogrametría terrestre, la edición de nubes de puntos y el modelado en entornos BIM contribuye al fortalecimiento de infraestructuras resilientes y a la promoción de la innovación tecnológica en el ámbito de la conservación patrimonial. La generación de modelos precisos y parametrizados no solo permite documentar con mayor fidelidad los puentes históricos, sino también planificar actuaciones de conservación de manera más eficiente, optimizando recursos y garantizando la seguridad estructural.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

La preservación del Puente Mayor de Liérganes y la aplicación de metodologías avanzadas para la evaluación de su estado de conservación se alinean con el objetivo de proteger el patrimonio cultural y natural dentro de un marco de desarrollo urbano sostenible. Este tipo de actuaciones favorece la integración equilibrada del patrimonio en el entorno social y turístico de las ciudades, asegurando que infraestructuras históricas continúen siendo parte activa de la identidad cultural y del paisaje urbano.

ODS 13: Acción por el clima

La conservación preventiva y el seguimiento del estado estructural de puentes históricos como el de Liérganes resultan esenciales para mejorar su resiliencia frente a los efectos del cambio climático. Fenómenos como lluvias intensas, crecidas de ríos o variaciones

extremas de temperatura pueden acelerar la degradación de estas infraestructuras. Disponer de modelos digitales precisos y actualizados permite anticipar riesgos y planificar intervenciones adaptativas, contribuyendo a la mitigación de los impactos climáticos sobre el patrimonio construido.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente trabajo de investigación se estructura en cuatro capítulos principales, organizados de manera que desarrollan un conocimiento progresivo que va desde el marco teórico y la revisión de la literatura hasta la aplicación práctica en un caso de estudio.

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo inicial establece el marco conceptual y motivacional del proyecto. Se profundiza en el contexto actual de la digitalización, destacando su impacto transformador en múltiples sectores y, de manera específica, en el ámbito de la ingeniería y la arquitectura a través de la metodología BIM. Se argumenta la vital importancia de la conservación del patrimonio cultural y cómo la integración de tecnologías modernas puede potenciar esta labor. A partir de este escenario, se definen los objetivos de la investigación: el objetivo principal, que consiste en evaluar la utilidad de la fotogrametría y BIM en un caso real, y los objetivos específicos, que guían el camino metodológico a seguir. Finalmente, se presenta un mapa detallado de la organización del documento, que servirá como guía para el lector a lo largo de todo el trabajo.

Capítulo 2: Estado Actual del Conocimiento

Este capítulo constituye el pilar teórico de la investigación, proporcionando la base de conocimientos necesaria para el desarrollo del trabajo. Se divide en tres subapartados:

- Puentes de fábrica: Se realiza una revisión histórica, analizando la evolución de los puentes de fábrica y clasificando sus tipologías y elementos componentes. Se estudian en profundidad los materiales constituyentes (piedra, mortero y relleno) y sus propiedades mecánicas, así como el complejo comportamiento estructural de estas estructuras. Se detalla la tipología de los procesos patológicos que los afectan, desde los deterioros en la cimentación hasta los relacionados con los materiales. Por último, se exponen las herramientas de evaluación más relevantes, incluyendo inspecciones, ensayos no destructivos y el modelado de información para el patrimonio (H-BIM), sentando las bases de la metodología a aplicar.
- Fotogrametría: Se abordan los fundamentos teóricos de la fotogrametría, prestando especial atención al proceso "*Structure-from-Motion*" (SfM). Se describen las técnicas de adquisición de datos tanto terrestres como con drones, y se explican los procesos de generación de modelos 3D a partir de nubes de puntos densas. Finalmente, se revisan las aplicaciones de la fotogrametría en la evaluación de puentes de fábrica, como la documentación geométrica, el mapeo de deterioros y la creación de gemelos digitales para la monitorización.
- Digitalización: Se introduce la metodología BIM, definiendo su alcance, principios y beneficios. Se analizan las dimensiones del BIM y los niveles de desarrollo (LoD), que son fundamentales para la gestión de la información del modelo. Posteriormente, se aborda la adaptación de esta metodología al patrimonio cultural, dando lugar al Heritage-BIM (H-BIM). Se exploran las particularidades

del H-BIM, sus flujos de trabajo específicos y el valor añadido que proporciona en la documentación y gestión de estructuras históricas.

Capítulo 3: Caso de Estudio

Este capítulo transita de la teoría a la práctica, aplicando la metodología descrita al Puente Mayor de Liérganes. Se inicia con una presentación detallada del puente, sus características geométricas y constructivas. Se describen las inspecciones y el levantamiento topográfico realizados, que sirvieron como punto de partida para la adquisición de datos. El núcleo de este capítulo es la explicación del proceso de modelado del puente, donde se detalla cómo se utilizaron las herramientas de fotogrametría para obtener una representación precisa de la geometría y cómo esta se integró en un modelo H-BIM que contiene información multidisciplinaria.

Capítulo 4: Conclusiones

Este capítulo final sintetiza los resultados y hallazgos clave de la investigación. Se evalúa la utilidad y la eficacia de las herramientas de fotogrametría y BIM para la documentación, el análisis y la gestión de puentes históricos, basándose en la experiencia práctica con el caso de estudio. Se discuten las limitaciones y los beneficios de este enfoque en comparación con los métodos tradicionales, y se plantean posibles líneas de investigación futuras que podrían surgir a partir de los resultados obtenidos.

Referencias Bibliográficas

Este apartado contiene un listado organizado de todas las fuentes de información que se han consultado y utilizado para fundamentar y dar soporte a este trabajo.

CAPÍTULO 2: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

2.1. PUENTES DE FÁBRICA

2.1.1. Historia

El conocimiento profundo de los puentes requiere atender a su historia, pues las preguntas estructurales y funcionales que se planteaban sus constructores en el pasado no difieren tanto de las actuales. Comprender con qué medios y soluciones contaban, así como los condicionantes culturales y técnicos del momento, permite valorar tanto la eficacia técnica como la respuesta simbólica y estética de cada puente en su contexto histórico.

Desde tiempos remotos hasta bien entrado el siglo XIX, el puente de fábrica en arco de piedra constituyó la tipología predominante para construcciones duraderas. Aunque su origen es incierto y se remonta a Asia, alcanzó su plenitud formal y estructural con la ingeniería romana, cuyo modelo perduraría durante siglos con escasas variaciones. Los componentes fundamentales —arco de dovelas, calzada, relleno intermedio y tímpanos laterales— permanecieron casi invariables durante más de dos milenios, lo que da cuenta de su eficacia constructiva. [1]

Durante la Edad Media se introdujo el arco apuntado, influenciado por la arquitectura gótica, aunque desde un punto de vista estructural no resultaba óptimo para el equilibrio de esfuerzos en puentes de piedra. La geometría antifunicular de cargas, que idealmente debería guiar la forma del arco, se alejaba de estas configuraciones. Más adecuadas eran las formas circulares o elípticas de varios centros, ya exploradas en algunos ejemplos romanos y renacentistas. El Ponte Vecchio de Florencia (1345) (Figura 2-2), con su innovadora relación flecha/luz, ejemplifica un avance técnico que requirió mayor precisión en el tallado de dovelas y en la rigidez de la cimbra. [1]



Figura 2-1: Puente de fábrica en arco más antiguo de España (superior) [2] y puente de arco apuntado (inferior) [3].



Figura 2-2: Ponte Vecchio - Florencia [4].

El Renacimiento supuso un punto de inflexión al incorporar una dimensión estética más consciente: los grandes arquitectos participaron activamente en el diseño de puentes, aportando ornamentación y rigor compositivo (Figura 2-3). Los puentes se convirtieron en elementos arquitectónicos completos, donde el juego de luces y sombras, el retranqueo de arcos y el tratamiento de paramentos y tajamares adquirieron importancia visual. En Francia, se definieron rasgos "clásicos" como el uso de arcos en "*anse de panier*", cornisas marcadas y tajamares salientes, consolidando un lenguaje formal que influyó en toda Europa. [1]



Figura 2-3: Pont Neuf – París [5].

En paralelo, la evolución del conocimiento estructural avanzó desde el método empírico hacia una base científica. Autores como Alberti (*De re aedificatoria*, 1452) y Palladio (*I Quattro Libri dell'Architettura*, 1570), y más tarde Gautier y Blondel, comenzaron a establecer reglas normativas de dimensionamiento. La cimentación, sin embargo, se mantuvo como el punto más débil de estas construcciones, debido a las dificultades técnicas para trabajar en cauces fluviales no regulados. Aun así, se desarrollaron métodos ingeniosos para cimentar en seco mediante recintos de pilotes de madera y bombas de achique, aunque las avenidas seguían causando colapsos frecuentes. [1]

Durante los siglos XVIII y XIX, los puentes de fábrica no solo siguieron construyéndose en calzadas y acueductos, sino también en los nacientes ferrocarriles y en grandes viaductos y acueductos navegables (Figura 2-4). Las obras de Sejourné supusieron una renovación técnica notable: utilizó bóvedas de espesor variable, cimbras extremadamente rígidas y eliminó la continuidad estructural, mediante bóvedas separadas, para aligerar peso y mejorar comportamiento estructural. Estas soluciones fueron ampliamente imitadas. La necesidad de adaptar el trazado ferroviario a terrenos difíciles impulsó la construcción de numerosos viaductos de fábrica en toda Europa, a menudo de una, dos o tres plantas, con grandes pilas y arcos de hasta 30 metros de luz. [1]



Figura 2-4: Pont Séjourné, un puente ferroviario de la línea de vía estrecha de Cerdagne [6].

2.1.2. Tipología y elementos componentes

Los puentes arco de obra de fábrica se caracterizan por una compleja interacción entre elementos estructurales y no estructurales, cuya disposición y materialización condicionan tanto el comportamiento mecánico como su durabilidad a lo largo del tiempo.

El arco o bóveda constituye el elemento resistente principal. Está formado por dovelas (*voussoirs*) de piedra en forma de cuña o por hileras de ladrillos (Figura 2-5), y su geometría define la luz y la flecha del puente. En el caso de los arcos de dovelas, estas se disponen simétricamente respecto a la clave, cuya función es principalmente simbólica y estética, más que estructural. En los arcos de ladrillo, la curvatura se consigue mediante variaciones en el espesor del mortero, y su ejecución permite reducir la necesidad de cimbra durante la construcción. [7]

La plataforma es el elemento funcional más visible, ya que constituye la superficie por la que transcurre el tráfico rodado o ferroviario. Se encuentra sobre el relleno y puede estar equipada con pavimentos, aceras, balasto o vías de ferrocarril, dependiendo del uso actual del puente. [8]

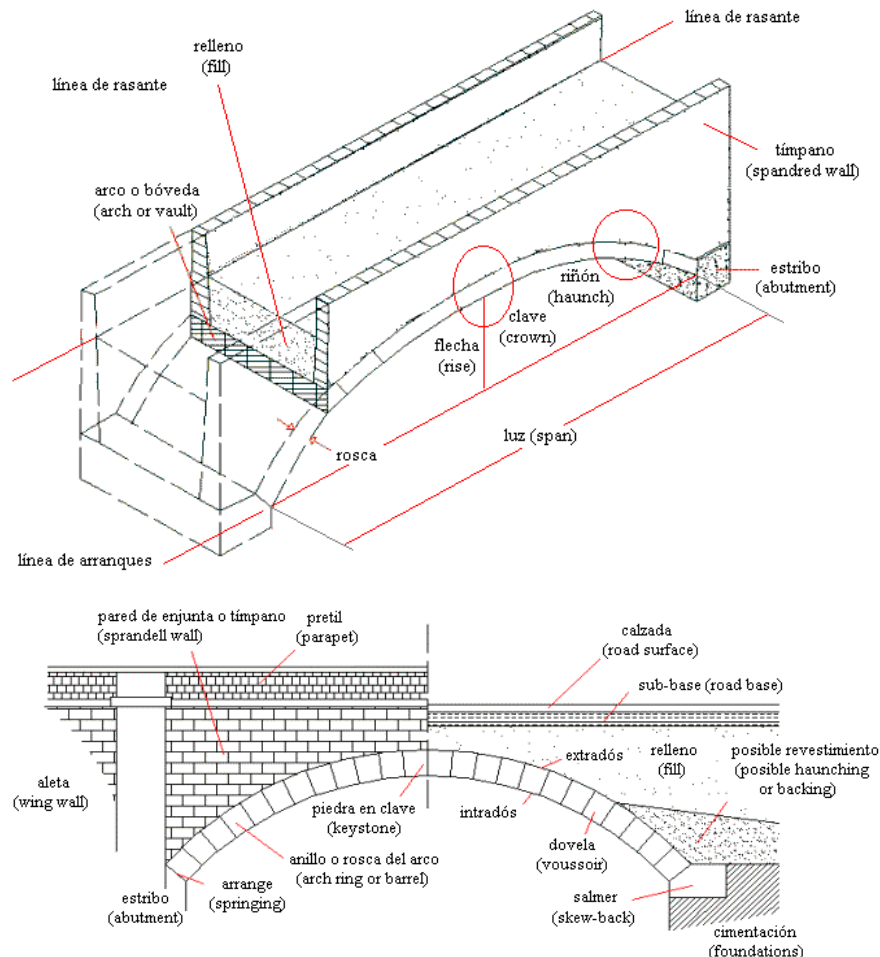


Figura 2-5: Principales constituyentes y geometría de un puente arco de obra de fábrica [9].

El relleno (Figura 2-5), situado entre el extradós del arco y la plataforma, cumple una doble función: proporcionar una superficie horizontal de tránsito y colaborar estructuralmente transmitiendo cargas hacia el arco. Se distingue entre un primer estrato

de material cementado o *backing*, que se encuentra directamente sobre el extradós y que puede alcanzar hasta $4/5$ de la altura del arco, y un segundo estrato superior más suelto (*granular backfill*), que soporta directamente la plataforma [8]. En terminología española, el término relleno engloba todo este conjunto de materiales, cuyo comportamiento mecánico depende de factores como el grado de compactación o saturación. Su desconocimiento ha llevado, en ocasiones, a subestimar su contribución estructural [7].

Los estribos y, en caso de puentes de más de un vano, las pilas, son los apoyos principales del puente (Figura 2-5). A menudo están integrados en las márgenes del cauce y permiten la transición con el terreno natural. Las pilas pueden incluir tajamares (*cutwaters*) en su parte aguas arriba o aguas abajo, con el fin de mejorar el comportamiento hidráulico y reducir la erosión. Estas formas triangulares o curvadas pueden prolongarse hasta el nivel de plataforma, facilitando zonas de refugio o ensanchamiento del tablero, como en el puente de Toledo en Madrid (Figura 2-6). [8]

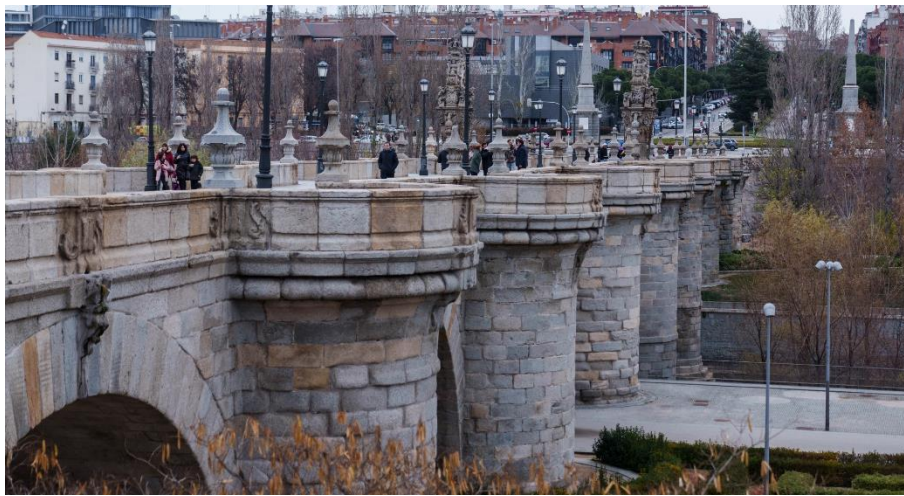


Figura 2-6: Puente de Toledo – Madrid [10].

En la base de la estructura se encuentran las cimentaciones (Figura 2-5), cuyas tipologías son muy diversas: superficiales, profundas, sobre roca, emparrillado de madera o cama de grava. Su diseño dependía en el pasado de métodos empíricos y una limitada comprensión del comportamiento del terreno, por lo que hoy en día son un foco de incertidumbre importante en el análisis estructural de puentes históricos [7].

En algunos casos, existen elementos estructurales adicionales entre el arco y el relleno, como revestimientos o costillajes internos, que ayudan a rigidizar la estructura y a reducir las presiones laterales sobre los tímpanos. Estas soluciones son especialmente frecuentes en puentes de varios vanos o con arcos poco rebajados. [7]

Por último, algunos puentes históricos presentan torres sobre estribos o pilas (Figura 2-7), originalmente con funciones defensivas o de control de peaje, que con el tiempo han adquirido también un valor simbólico o monumental. [8]



Figura 2-7: Pont Valentré – Cahors [11].

2.1.3. Materiales constituyentes

Los puentes de fábrica son estructuras compuestas por una variedad de materiales que, en su conjunto, garantizan la integridad y estabilidad de la construcción. Estos materiales, seleccionados y dispuestos con gran precisión en los métodos tradicionales, son esenciales tanto para el análisis estructural como para la preservación del patrimonio. Los principales componentes materiales son la piedra, el mortero y el relleno [8].

El dimensionamiento de un puente de fábrica, es decir, la determinación del tamaño y el espesor de sus componentes, está intrínsecamente ligado a la elección de estos materiales [8]. La calidad y resistencia de la piedra determinaban directamente el espesor necesario del arco y de los estribos. Una piedra de mayor resistencia a la compresión permitía construir arcos más delgados, mientras que la piedra de menor calidad o con más defectos requería secciones más gruesas para garantizar la estabilidad [8]. De forma similar, la resistencia del mortero influía en la separación entre sillares, ya que un mortero de menor calidad requería juntas más estrechas y una mayor superficie de contacto entre las piedras para distribuir las cargas de manera efectiva, o la utilización de sillares de mayores dimensiones para reducir el número de juntas y mejorar el comportamiento del conjunto [12]. El relleno, por su parte, al ser un componente que transmite las cargas de tráfico al arco y ejerce un empuje sobre los tímpanos, influye en la estabilidad global. La densidad y el ángulo de rozamiento del relleno son parámetros que se tienen en cuenta en el diseño, ya que un relleno más pesado o con propiedades menos favorables podría requerir un arco más robusto para contrarrestar el empuje lateral y la carga vertical adicional [12]. Así, la correcta selección y combinación de estos tres materiales era un factor determinante en las dimensiones finales de la estructura, buscando un equilibrio entre la resistencia, la durabilidad y la eficiencia constructiva [8].

2.1.3.1. Piedra

La piedra es el material fundamental y más visible de los puentes de fábrica. Su elección no era arbitraria, sino que dependía de su resistencia, durabilidad y disponibilidad local [8]. La piedra se utilizaba en forma de sillares para los paramentos, y en particular para la clave y las dovelas del arco, los tímpanos, las pilas y los estribos, que son los elementos portantes de la estructura [12].

Los sillares se cortaban y labraban con gran esmero para que encajasen perfectamente, minimizando las juntas y asegurando que las presiones se transmitieran de manera eficiente a través del arco, una característica clave del comportamiento de estas estructuras [12]. La sillería consiste en bloques de piedra bien escuadrados (Figura 2-8), mientras que la mampostería utiliza piedras irregulares unidas por mortero. Ambas técnicas se empleaban según la función estructural y el acabado deseado del puente [8].

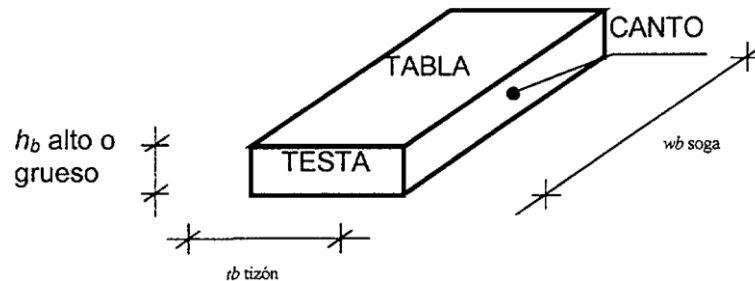


Figura 2-8: Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas de fábrica [12].

El uso de piedra de alta calidad en los elementos resistentes como las dovelas es crucial, ya que estas partes deben soportar grandes esfuerzos de compresión. En los criterios de comprobación estructural, se considera la resistencia a compresión de la fábrica, que no solo depende de la piedra individual, sino también de la calidad de la unión con el mortero y de la geometría de los bloques [12].

2.1.3.2. Mortero

El mortero es un componente vital, aunque a menudo menos visible. Aunque su principal función es rellenar las juntas entre las piedras, su calidad y propiedades influyen directamente en el comportamiento estructural del conjunto [12]. El mortero tradicional, a base de cal, confería a las juntas un comportamiento compresivo que era más flexible que el de la piedra, permitiendo que la estructura se adaptara a ligeros movimientos y asentamientos sin fallar de manera frágil [8].

En la ingeniería moderna, el análisis de los puentes de fábrica tiene en cuenta las propiedades mecánicas del mortero, ya que su resistencia y rigidez son parámetros clave en los modelos de cálculo. El mortero de juntas es fundamental para el comportamiento no lineal de estas estructuras, ya que puede considerarse un elemento con resistencia limitada a la tracción y que actúa como amortiguador de tensiones. Para el análisis, el mortero se modela con propiedades mecánicas que reflejan su capacidad de trabajar a compresión y su baja o nula resistencia a la tracción. [12]

2.1.3.3. Relleno

El relleno, conocido también como relleno de trasdós, es el material que se encuentra sobre el intradós del arco y bajo el pavimento. A diferencia de lo que se piensa, el relleno no es simplemente una carga muerta, sino un componente activo que juega un papel crucial en el comportamiento del puente [12]. Su función principal es transmitir las cargas de tráfico hacia el arco, distribuyéndolas de manera más uniforme y evitando concentraciones de tensión. El relleno también puede ofrecer un efecto estabilizador al proporcionar un confinamiento lateral al arco y a los tímpanos, lo que aumenta su resistencia a la carga [8].

Generalmente compuesto por una mezcla de tierra, escombros o cascotes, el relleno tiene un peso significativo que debe ser considerado en el análisis estructural. Su

densidad y ángulo de rozamiento interno son parámetros esenciales para modelar su empuje sobre los tímpanos y su interacción con el arco, especialmente en las zonas cercanas a la clave [12]. Un relleno bien compactado aumenta la rigidez del conjunto y mejora el rendimiento estructural del puente [8]. El análisis de estas estructuras tiene en cuenta que la rigidez del arco no puede ser ignorada, ya que en la mayoría de los casos es mayor que la rigidez del relleno [12].

2.1.4. Comportamiento estructural y mecánico

Los puentes de fábrica de arco presentan un comportamiento estructural complejo, resultado de la interacción entre varios elementos: el propio arco, el relleno, los tímpanos, las cimentaciones y las cargas aplicadas. Este comportamiento se fundamenta en tres aspectos clave que definen la mecánica de estas estructuras [12]:

- Trabajo por forma: Se trata de estructuras masivas cuyo principal mecanismo resistente es el arco. En condiciones ideales, el esfuerzo predominante es el axil de compresión, lo que permite que la estructura trabaje de forma eficiente. Sin embargo, esta dominancia del axil puede verse comprometida si la directriz del arco no está bien ajustada o si las sobrecargas variables adquieren una magnitud significativa respecto a las cargas permanentes.
- Materiales sin capacidad de tracción: La fábrica es un material heterogéneo, anisótropo y discontinuo, incapaz de resistir tracciones. Esta característica condiciona fuertemente el comportamiento frente a flexiones o tensiones no axiales, ya que la aparición de tracciones provoca fisuración, pérdida de sección y disminución de la rigidez estructural efectiva.
- Heterogeneidad estructural: El puente de fábrica está compuesto por elementos estructurales distintos (arco, relleno, tímpanos, enjutas, cimentaciones), cada uno con una función diferente en el equilibrio global del conjunto.

2.1.4.1. Mecanismo resistente del puente

La Figura 2-9 representa esquemáticamente el comportamiento estructural de un puente de fábrica sometido a su peso propio y una sobrecarga puntual aplicada en la zona crítica (entre 1/3 y 1/5 de la luz del vano) [7]. Este tipo de carga, común en el tráfico rodado, pone de manifiesto la importancia del diseño antifunicular del arco, es decir, aquel que permite que la línea de presiones coincida con la geometría del mismo, generando exclusivamente compresiones [12].

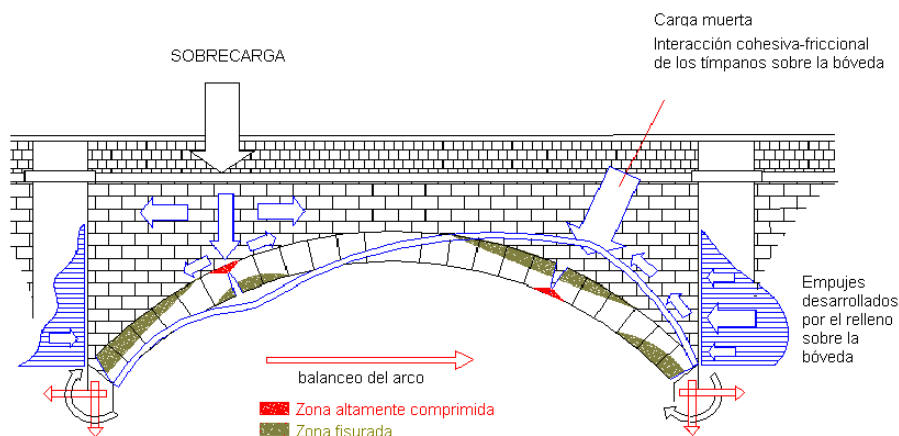


Figura 2-9: Respuesta de un puente arco de obra de fábrica a la sobrecarga aplicada [9].

La carga permanente actúa directamente sobre el arco, generando un estado funicular de cargas [12]. Por su parte, las sobrecargas, que pueden ser puntuales o distribuidas, se transmiten desde la calzada hasta la bóveda a través del relleno. Este material actúa como agente de reparto, transformando las cargas localizadas en distribuciones más amplias sobre el trasdós de la bóveda, suavizando los efectos negativos de cargas concentradas [7].

Este fenómeno de reparto es crucial, pues las cargas concentradas en zonas sensibles como los riñones del arco pueden generar momentos flectores, que a su vez inducen tracciones en una estructura que no las puede resistir. En consecuencia, un cono de reparto amplio disminuye significativamente el riesgo de fisuración. De ahí la importancia de conocer con precisión la magnitud y ubicación de las sobrecargas. [12]

2.1.4.2. Interacción bóveda-relleno-tímpanos

Además del reparto vertical de cargas, el relleno genera empujes horizontales sobre la bóveda y los tímpanos [12]. El empuje longitudinal que recibe la bóveda es generalmente beneficioso, ya que contribuye a estabilizarla frente a cargas excéntricas o mal alineadas. Para que este efecto sea positivo, el relleno debe estar adecuadamente confinado [7].

La magnitud del empuje horizontal depende de los movimientos relativos entre bóveda y tímpanos. En condiciones normales, estos movimientos son pequeños y puede asumirse un empuje al reposo. Sin embargo, en situaciones cercanas al colapso, se producen desplazamientos importantes que activan el empuje activo (cuando hay separación) o el empuje pasivo (cuando hay acercamiento). [12]

En tales situaciones extremas, la bóveda y los tímpanos pueden actuar casi de forma independiente [12]. De hecho, aunque tradicionalmente se ha despreciado la rigidez adicional que los tímpanos pueden aportar (como si fueran vigas de gran canto), diversos ensayos han demostrado que esta interacción puede ser estructuralmente significativa [7].

La Figura 2-10 ilustra el empuje lateral que el relleno ejerce sobre los tímpanos. Este empuje debe ser resistido por las paredes de enjuta, cuyo diseño y capacidad deben tenerse en cuenta en cualquier evaluación estructural. [7]

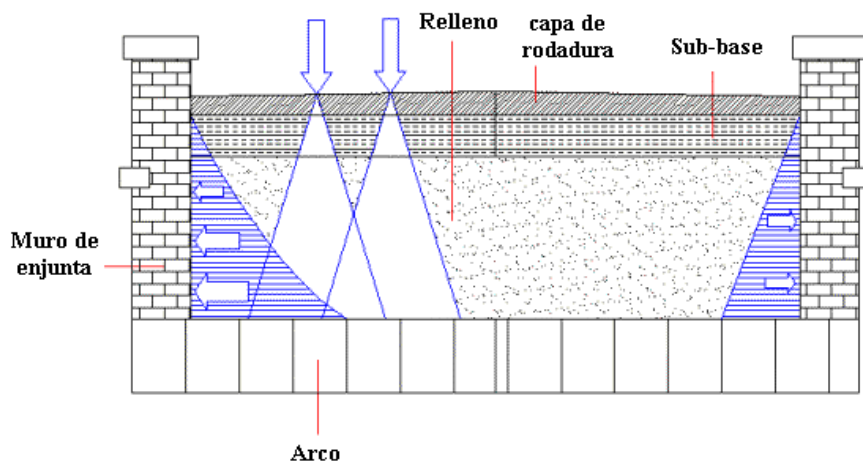


Figura 2-10: Sección transversal. Esquema resistente transversal en un puente arco de obra de fábrica [9].

2.1.4.3. Condiciones de contorno y empotramiento

La forma en que el arco se conecta con la cimentación condiciona de manera crítica su comportamiento estructural. En ocasiones, el arranque real del arco no se produce directamente en la cimentación, sino en una zona superior donde empieza el relleno suelto, debido a la existencia de un revestimiento cementado. [12]

En la Figura 2-9, se ha supuesto un empotramiento perfecto en los estribos, lo que implica que estos deben recoger fuerzas horizontales, verticales y momentos flectores [12]. Sin embargo, esta condición ideal no siempre se da. Algunos factores que impiden considerar un empotramiento real son [7]:

- Ausencia del relleno cementado.
- Descimbrado inadecuado, que genera descenso en la clave y cambios en la configuración del arco (biarticulado o triarticulado).
- Formación de rótulas en los arranques por sobrecargas elevadas o eventos accidentales (sísmicos o hidrológicos).

Durante ensayos experimentales [7], se ha observado que la falta de empotramiento impide formar un mecanismo de colapso completo, compuesto por cuatro rótulas plásticas, al girar las secciones de arranque.

2.1.4.4. Línea de presiones y comportamiento al colapso

Una forma de analizar el comportamiento estructural de la bóveda es mediante el estudio de la línea de presiones, que representa la trayectoria de las fuerzas internas en equilibrio [12]. La Figura 2-11 muestra una línea de presiones bajo una combinación de cargas críticas.

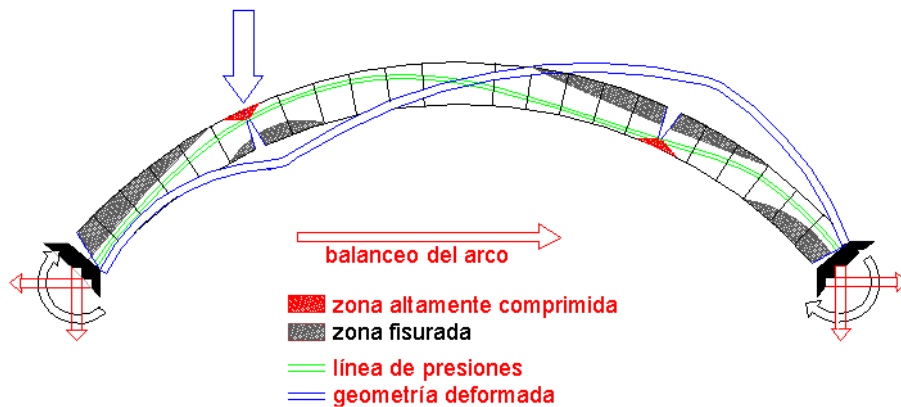


Figura 2-11: Esquema aproximado de la línea de presiones (thrust line) en un arco de obra de fábrica. Situación próxima al colapso [9].

En el caso ideal de una carga perfectamente distribuida y una directriz antifunicular, la línea de presiones pasaría por el centro de gravedad de cada sección del arco, evitando así la aparición de momentos flectores. Sin embargo, cuando se aplican sobrecargas no uniformes, la resultante se desvía del centro de la sección, generando excentricidades que producen flexión. [12]

Esta excentricidad provoca un reparto desigual de tensiones en la sección de la bóveda, con zonas que tienden a comprimirse más y otras en las que pueden aparecer tensiones de tracción. Dado que la fábrica no puede resistir tracción, estas áreas se fisuran, lo que conduce a una reducción de rigidez y a una redistribución progresiva de las tensiones hacia las zonas comprimidas. [7]

Si este fenómeno progresa, puede llegar a producirse una fisuración completa de la sección, lo que da lugar a la formación de una rótula plástica. La aparición sucesiva de varias rótulas a lo largo del arco provoca la pérdida de hiperestatismo y puede desembocar en un mecanismo de colapso, que define el límite resistente de la estructura. [7]

2.1.5. Procesos patológicos

Los puentes de fábrica, como elementos de infraestructura con una larga historia, están sujetos a una serie de procesos patológicos que comprometen su integridad estructural y funcionalidad a lo largo del tiempo. La comprensión de estos deterioros es fundamental para su correcta inspección, evaluación y, en última instancia, para la implementación de medidas de mantenimiento y rehabilitación adecuadas. La detección temprana de los procesos patológicos permite optimizar las inversiones y garantizar la seguridad de los usuarios.

La gestión de la conservación de puentes es una práctica consolidada que implica inspecciones sistemáticas para detectar deterioros a tiempo. Esto permite un seguimiento adecuado y la puesta en marcha de un mantenimiento preventivo o una rehabilitación cuando sea necesario. La diversidad de estas estructuras en edad, tipología, luces, dimensiones y materiales genera una gran complejidad en su gestión.

Los deterioros en puentes pueden relacionarse con diversos factores [13], incluyendo el proyecto original, la geometría de la sección transversal, la edad de la estructura y los mecanismos generales de deterioro. La vulnerabilidad frente a sismos también es un aspecto que considerar en la evaluación de su estado.

2.1.5.1. Deterioros en la cimentación

Los cimientos son la base de cualquier infraestructura, como es el caso de los puentes y, por lo tanto, su deterioro puede traer consigo consecuencias graves para la estabilidad de toda la estructura. Los procesos patológicos en los cimientos de puentes de fábrica están intrínsecamente ligados a la interacción con el terreno y a las condiciones hidrológicas. [13]

Uno de los principales problemas es la socavación (Figura 2-12). Este fenómeno se produce por la erosión del lecho y las márgenes de un cauce alrededor de los cimientos, pilas y estribos debido a la acción del flujo de agua. La socavación reduce la capacidad portante del terreno de cimentación, pudiendo provocar asentamientos diferenciales, inclinaciones e incluso el colapso de la estructura. Es crucial una inspección regular del cauce y sus particularidades, incluyendo inspecciones subacuáticas si es necesario.



Figura 2-12: Socavación en pila [13].

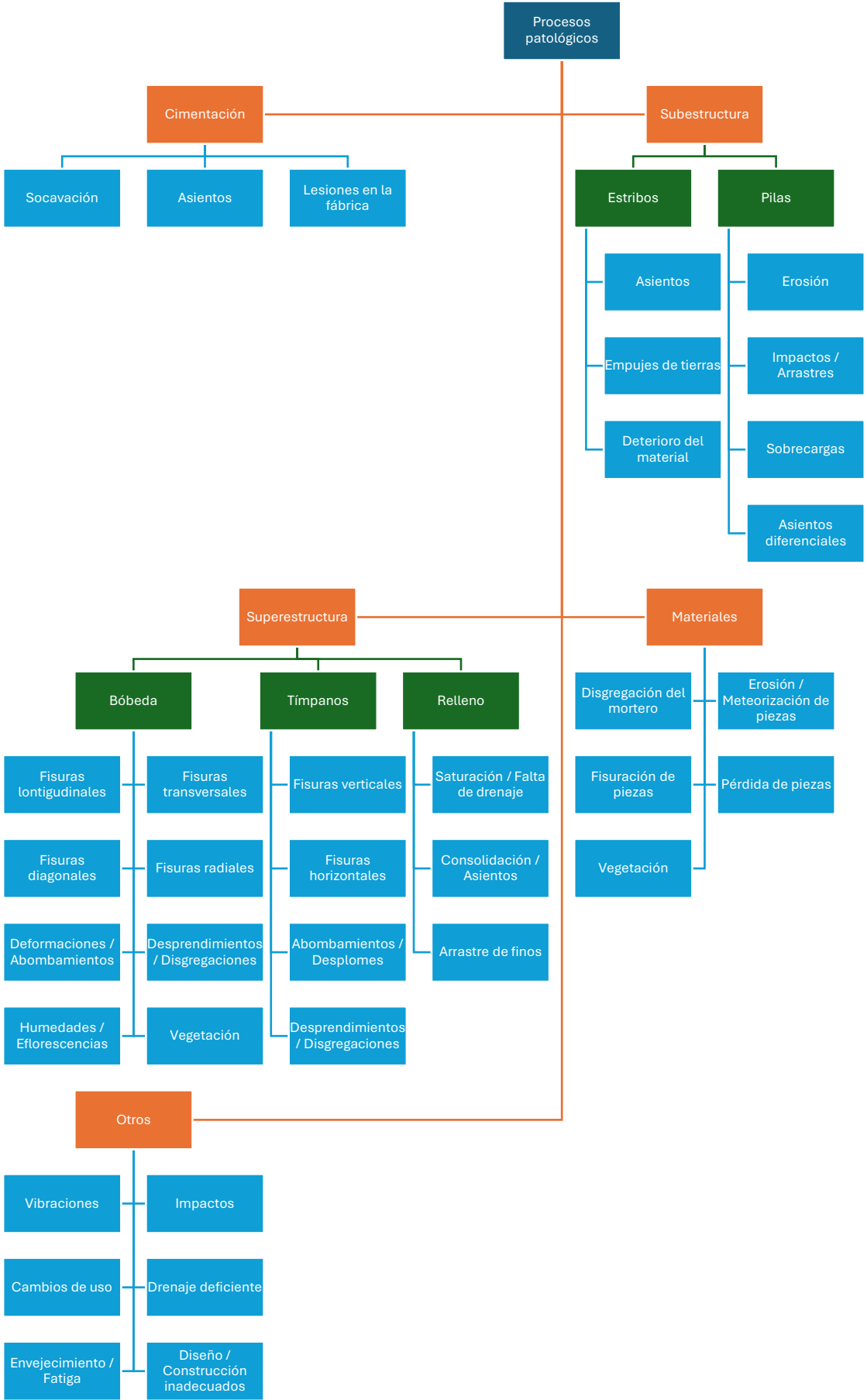


Figura 2-13: Esquema de procesos patológicos.

Otro deterioro común son los asientos. Estos pueden ser uniformes o diferenciales. Los asientos uniformes, aunque pueden no ser estructuralmente críticos si se producen de manera lenta y controlada, pueden afectar la funcionalidad del puente (por ejemplo, pendientes en la rasante). Los asientos diferenciales son mucho más peligrosos, ya que inducen esfuerzos adicionales en la estructura (tracciones en arcos, momentos flectores en pilas) para los que no fue diseñada, llevando a la aparición de grietas y fisuras, especialmente en la bóveda o los tímpanos. Las causas de los asientos pueden ser consecuencia de la consolidación del terreno bajo carga, la alteración del nivel freático, o deficiencias en el diseño o construcción del cimiento.

Finalmente, las lesiones en la fábrica del cimiento propiamente dicha, como fisuras, disgregación del mortero o desprendimientos de sillares (Figura 2-14), pueden ser el resultado de los asientos diferenciales antes mencionados, de ciclos de hielo-deshielo, o de la acción de aguas agresivas.



Figura 2-14: Pérdida de sillares en pie de pila [13].

2.1.5.2. Deterioros en la subestructura

La subestructura de un puente de fábrica comprende los elementos que transmiten las cargas de la superestructura a la cimentación, principalmente las pilas y los estribos. Estas partes son vulnerables a una variedad de procesos patológicos debido a su exposición al ambiente y a las cargas que soportan.

En los estribos, los daños más comunes incluyen asientos y movimientos relacionados con la calidad del terreno de apoyo o problemas en la cimentación, que pueden provocar grietas verticales o inclinadas (Figura 2-15). Por su parte, los empujes de tierras excesivos del relleno detrás del estribo pueden generar deformaciones, abombamientos y fisuras en su muro (Figura 2-16). Una adecuada gestión y caracterización del relleno, así como el cálculo de los empujes, son aspectos cruciales en el análisis de puentes de fábrica. El relleno puede ser cementado o suelto, y su estado, grado de saturación, compactación y confinamiento influyen en su significado estructural y reparto de cargas [12]. El deterioro del material, similar al de la bóveda, con disgregación del mortero, erosión de la fábrica y fisuras por cambios térmicos o humedad, también es frecuente.

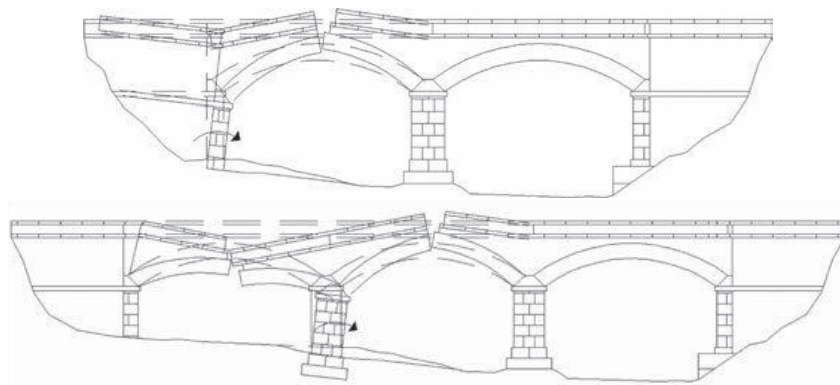


Figura 2-15: Efecto del giro de estribo (superior) y de pila (inferior) en una bóveda [13].

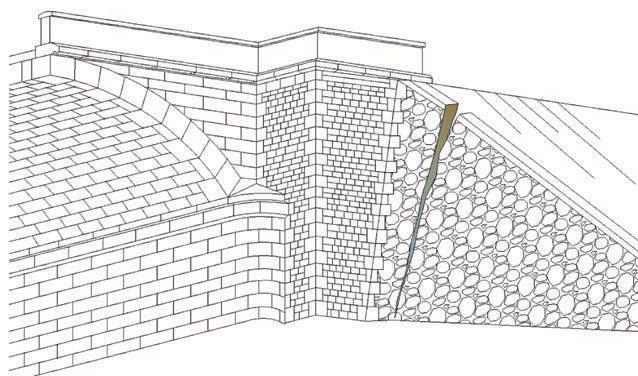


Figura 2-16: Diferente comportamiento estructural entre el estribo y aleta [13].

En las pilas, los deterioros frecuentes son la erosión y socavación, especialmente en pilas situadas en cauces de ríos, donde la acción del agua puede erosionar la base del elemento, comprometiendo su estabilidad. Además, las pilas pueden sufrir daños por el impacto de vehículos (en pasos inferiores) o por arrastres (en ríos). Entretanto, la aparición de fisuración y disgregación pueden deberse a sobrecargas, asentos diferenciales (Figura 2-15), ciclos de hielo-deshielo, o la acción del agua, lo que puede llevar a la inestabilidad de las pilas. Asimismo, los abombamientos en las pilas indican una pérdida de cohesión interna o un exceso de carga, llevando a la deformación lateral del elemento. [13]

2.1.5.3. Deterioros en la superestructura

La superestructura de un puente de fábrica está dominada por la bóveda, el elemento resistente principal, junto con los tímpanos y el relleno. La correcta evaluación de la bóveda es crítica, considerando su descripción, tipologías y los procesos patológicos que la afectan.

Deterioros en la bóveda

La bóveda es el elemento estructural distintivo de los puentes de fábrica y, por ende, el más estudiado en términos de procesos patológicos. Los daños en la bóveda pueden clasificarse atendiendo a criterios geométricos, al tipo de material y a la carga soportada [13].

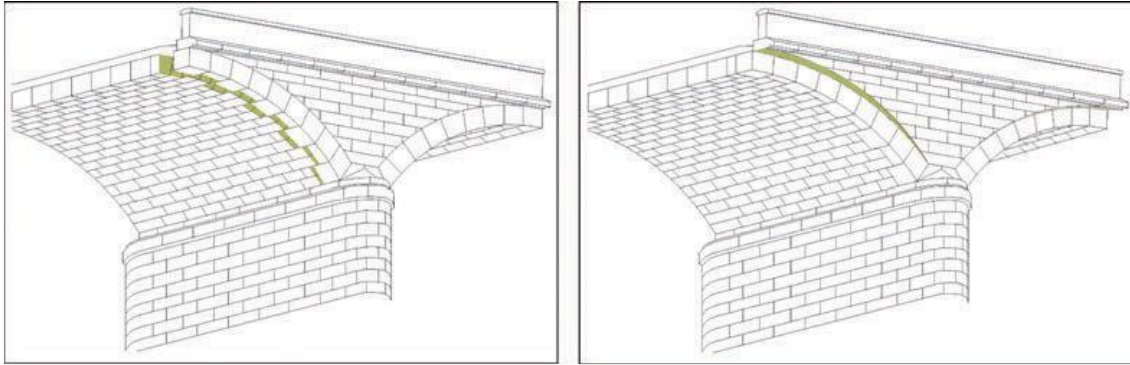


Figura 2-17: Grietas por diferente rigidez entre bóveda-boquilla (izquierda) y entre bóveda-tímpano (derecha) [13].

Las fisuras y grietas son los procesos patológicos más comunes y reveladores. Su patrón y ubicación proporcionan información crucial sobre el mecanismo de fallo. Las fisuras longitudinales suelen aparecer en el intradós del arco, paralelas a la dirección longitudinal del puente, y pueden indicar problemas de asentamientos diferenciales de los apoyos, lo que provoca que el arco trabaje como una viga en lugar de una estructura de compresión. También pueden deberse a la segregación del relleno o a la acción de empujes laterales excesivos. Ambas causas están estrechamente relacionadas con la diferencia de rigidez existente entre la bóveda, la boquilla y los tímpanos, lo que favorece la aparición de tensiones desiguales y concentraciones de esfuerzos (Figura 2-17). Por su parte, las fisuras transversales son comunes en el intradós cerca de los arranques o en la clave (Figura 2-18), y pueden ser indicativas de movimientos relativos de los apoyos, o de una flexión excesiva del arco bajo cargas puntuales. Las fisuras en X o diagonales (Figura 2-19) sugieren una combinación de esfuerzos de compresión y cizallamiento, a menudo asociados a fallos por inestabilidad lateral o a asentamientos complejos. Las fisuras radiales se manifiestan en el espesor del arco y pueden indicar la formación de rótulas plásticas, un mecanismo de fallo típico en arcos de fábrica.

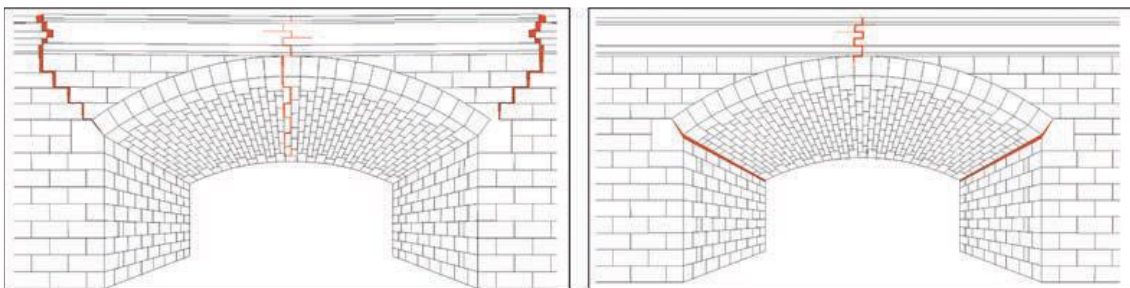


Figura 2-18: Triarticulación en clave y arranques en bóvedas de fábrica [13].

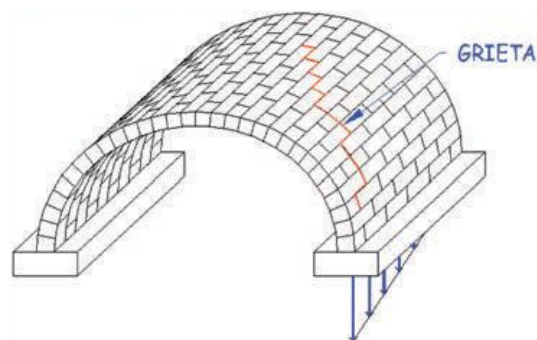


Figura 2-19: Grieta diagonal en bóveda de fábrica debido a asentamientos diferenciales de la cimentación [13].

Las deformaciones y abombamientos incluyen flechas excesivas, donde una deflexión notable en la clave del arco puede ser un síntoma de fluencia del material, asentos progresivos o sobrecarga. Los abombamientos laterales pueden indicar inestabilidad lateral de la bóveda, especialmente en arcos esbeltos o con poca rigidez transversal, o un fallo por pandeo.

Los desprendimientos y la disgregación de material (Figura 2-20) se manifiestan en el desgaste de sillares o ladrillos por erosión superficial debido a la acción del agua, viento o agentes biológicos, lo que puede reducir la sección efectiva del arco. Mientras tanto, la disgregación del mortero (Figura 2-22), al ser menos resistente que las piezas, es más vulnerable a la acción del agua, ciclos de hielo-deshielo y agentes químicos. Su pérdida reduce la capacidad portante de la fábrica, al disminuir la fricción entre las piezas y permitir la movilización de estas. El desprendimiento de dovelas o piezas individuales, especialmente en el intradós, es crítico ya que reduce la capacidad resistente del arco y puede iniciar un proceso de colapso progresivo.

La presencia de humedades y eflorescencias persistentes en el intradós o el trasdós de la bóveda (Figura 2-20) indica problemas de drenaje en el relleno o la impermeabilización de la calzada. Las eflorescencias son depósitos de sales que cristalizan en la superficie al evaporarse el agua, y aunque no siempre son un problema estructural directo, su presencia constante puede indicar la lixiviación de componentes del mortero, afectando su durabilidad.



Figura 2-20: Deslizamiento de dovelas (izquierda) y humedades y eflorescencias (derecha) en bóvedas de fábrica [13].

Asimismo, el crecimiento de vegetación en las juntas de la fábrica o en la superficie de la bóveda puede acelerar el deterioro al introducir raíces que expanden las fisuras y al retener humedad.

Deterioros en los tímpanos

Los tímpanos son los muros que flanquean el arco, sirviendo de contención al relleno y formando parte del tablero del puente. Su función principal es confinar el relleno y transmitir parte de las cargas a la bóveda. [12]

Los procesos patológicos más relevantes incluyen fisuras verticales, a menudo causadas por el empuje lateral del relleno o por asentos diferenciales de la cimentación de los tímpanos con respecto a la bóveda (Figura 2-18). Las fisuras horizontales o inclinadas pueden indicar problemas de inestabilidad, abombamiento o desprendimiento del tímpano (Figura 2-21). Las fisuras en las juntas de unión con la bóveda demuestran movimientos relativos entre el tímpano y el arco, lo que puede afectar la interacción estructural. Los abombamientos y desplomes son comunes; un abombamiento hacia el

exterior del tímpano sugiere un empuje excesivo del relleno, que puede ser provocado por la saturación de este o por la falta de drenaje, mientras que un desplome puede indicar un fallo de estabilidad del muro. [13]

La disgregación y los desprendimientos de material en los tímpanos reducen su capacidad de contención y pueden comprometer la estabilidad del relleno y del conjunto del puente. La erosión por agentes atmosféricos también contribuye a este deterioro. Las filtraciones y humedades, producto de la falta de impermeabilización adecuada en el tablero o el mal funcionamiento del sistema de drenaje, pueden llevar a la saturación del relleno y a la aparición de filtraciones a través de los tímpanos. Esto no solo debilita el material de fábrica, sino que también aumenta el empuje hidrostático sobre el tímpano [13].

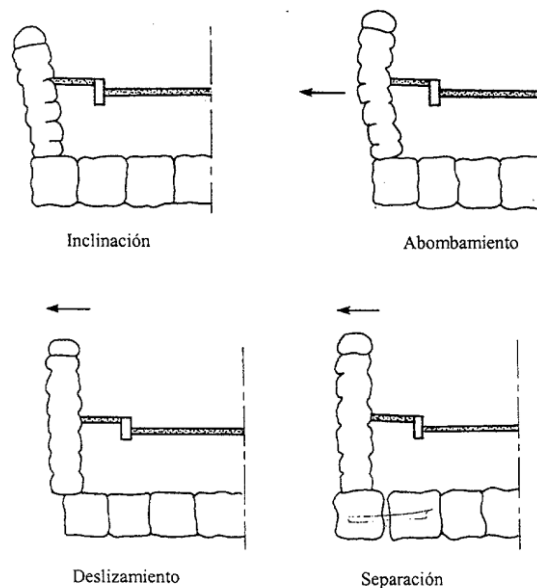


Figura 2-21: Patologías habituales en los tímpanos [12].

Deterioros en el relleno

El relleno, aunque no es un elemento estructural visible, juega un papel crucial en el comportamiento de los puentes de fábrica al transmitir las cargas de la calzada a la bóveda y al proporcionar confinamiento lateral. El significado estructural del relleno es fundamental, ya sea suelto o cementado, influenciando en el reparto de cargas y la interacción con la bóveda. [12]

Las afecciones más comunes están relacionadas con la saturación y falta de drenaje, donde la acumulación de agua en el relleno puede llevar a su saturación. Esto reduce la cohesión interna del material, aumenta su peso y, lo más crítico, genera empujes hidrostáticos adicionales sobre los tímpanos y el trasdós de la bóveda, comprometiendo su estabilidad. [13]

La consolidación y los asentos del relleno bajo cargas permanentes o de tráfico pueden provocar asentos en la calzada y, consecuentemente, en la bóveda, lo que a su vez puede generar fisuras en la superestructura. El arrastre de finos por la acción del agua circulando a través del relleno puede crear vacíos internos y reducir la densidad y capacidad portante del relleno. Finalmente, un material inadecuado en el relleno, con propiedades geotécnicas deficientes, puede contribuir a la presencia de deformaciones y procesos patológicos. [13]

2.1.5.4. Deterioros relacionados con los materiales

Los puentes de fábrica se construyen principalmente con mampuestos, ladrillo o sillería, unidos por mortero. El comportamiento mecánico de la obra de fábrica como material compuesto, incluyendo la caracterización de las piezas, los morteros y la interfaz pieza-mortero, es complejo y crucial para entender los procesos patológicos [12].

La disgregación del mortero (Figura 2-22) es uno de los daños más extendidos. Factores como la exposición a ciclos de hielo-deshielo, la lixiviación por aguas agresivas, la acción de sulfatos o cloruros, o simplemente el envejecimiento natural, reducen la cohesión y resistencia del mortero. Esto provoca la pérdida de material de las juntas, lo que facilita la penetración de agua, el crecimiento de vegetación y la movilización de las piezas, disminuyendo la capacidad estructural de la fábrica. [13]

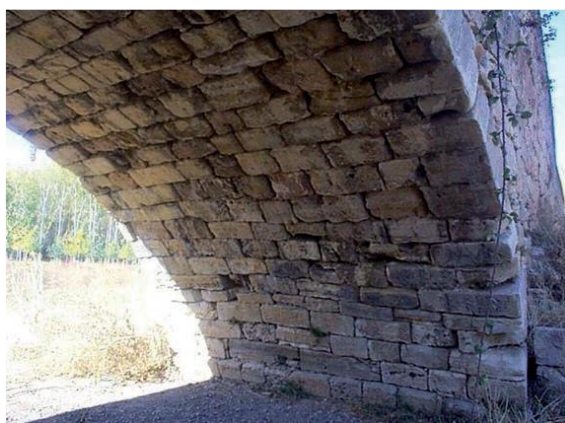


Figura 2-22: Lavado de llagas en bóveda de sillería [13].

La erosión y meteorización de las piezas por la exposición a agentes atmosféricos (viento, lluvia, ciclos térmicos) puede provocar la erosión superficial de los sillares o ladrillos. En rocas porosas, los ciclos de hielo-deshielo inducen tensiones internas que pueden causar fisuración y desprendimiento de escamas. La acción de sales (sulfatos, cloruros) también puede llevar a la disgregación de la superficie de la piedra. [13]

La fisuración de las piezas, aunque la fábrica está diseñada para trabajar a compresión, puede aparecer en las piezas individuales debido a la concentración de tensiones en puntos de alta carga o excentricidad, movimientos diferenciales como asentamientos, expansiones o contracciones de la estructura que pueden inducir esfuerzos de tracción o flexión en las piezas, o defectos intrínsecos del material. [13]

La pérdida de piezas o dovelas, ya sea total o parcial, especialmente en el intradós de la bóveda o en los paramentos, es un proceso patológico grave que reduce drásticamente la capacidad resistente de la estructura y puede desencadenar un fallo progresivo. Esto suele ser consecuencia de la disgregación del mortero o de impactos. [13]

El crecimiento de vegetación en las juntas y fisuras de la fábrica (Figura 2-23) puede acelerar el deterioro al introducir raíces que ejercen presión al crecer y expandirlas, lo que acelera la disgregación del mortero y la desestabilización de las piezas. Además, la vegetación retiene humedad, favoreciendo otros procesos patológicos. [13]



Figura 2-23: Agrietamiento de pared de ladrillo por el crecimiento de buddleja [14].

La resistencia a compresión de la fábrica es influenciada por las propiedades del material de asiento y por parámetros del aparejo, como la relación entre el grosor de las piezas y el espesor de los tendeles, y la dimensión del alto de las piezas. Existen fórmulas empíricas y fenomenológicas para obtener la resistencia a compresión [12].

2.1.5.5. Otros procesos patológicos relevantes

Además de los deterioros específicos por elementos y materiales, existen otros procesos patológicos más generales que pueden afectar a los puentes de fábrica [13].

Las vibraciones excesivas, aunque menos comunes en puentes de fábrica masivos, inducidas por tráfico pesado pueden generar fatiga en el mortero y las piezas, contribuyendo a la aparición de fisuras.

Los impactos vehiculares en puentes con gálibo limitado pueden causar daños localizados en los estribos, pilas o bóvedas, comprometiendo su integridad.

Los cambios en el uso o carga, como un aumento significativo en las cargas de tráfico para las que el puente fue diseñado, o un cambio en su uso, pueden acelerar el deterioro y llevar a un estado de sobreesfuerzo para el que la estructura no fue concebida.

Los problemas de drenaje son una causa fundamental de muchos daños. Un sistema de drenaje deficiente o inexistente en el tablero o en la coronación de los tímpanos lleva a la acumulación de agua, lo que facilita la saturación del relleno, la lixiviación del mortero, la erosión y el crecimiento de vegetación.

Los aspectos asociados a la edad del puente son importantes; las estructuras antiguas, por su propia naturaleza y por los materiales y técnicas constructivas de la época, pueden presentar deterioros relacionados con el envejecimiento de los materiales y la fatiga acumulada a lo largo de décadas o siglos de servicio.

Finalmente, las deficiencias en el proyecto o la ejecución, como un diseño inadecuado o errores durante la construcción (por ejemplo, mala compactación del relleno, mortero de baja calidad, cimentación insuficiente), pueden ser el origen de procesos patológicos que se manifiestan a largo plazo.

2.1.6. Herramientas de evaluación

La evaluación del estado de conservación y la capacidad estructural de los puentes de fábrica es un proceso complejo que requiere la aplicación de diversas herramientas y metodologías. Estas herramientas abarcan desde inspecciones visuales detalladas

hasta sofisticados análisis numéricos y ensayos no destructivos, todos ellos fundamentales para comprender el comportamiento de estas estructuras históricas y planificar su adecuado mantenimiento y rehabilitación. La selección y aplicación de estas herramientas dependen de los objetivos de la evaluación, el nivel de detalle requerido y las particularidades de cada puente.

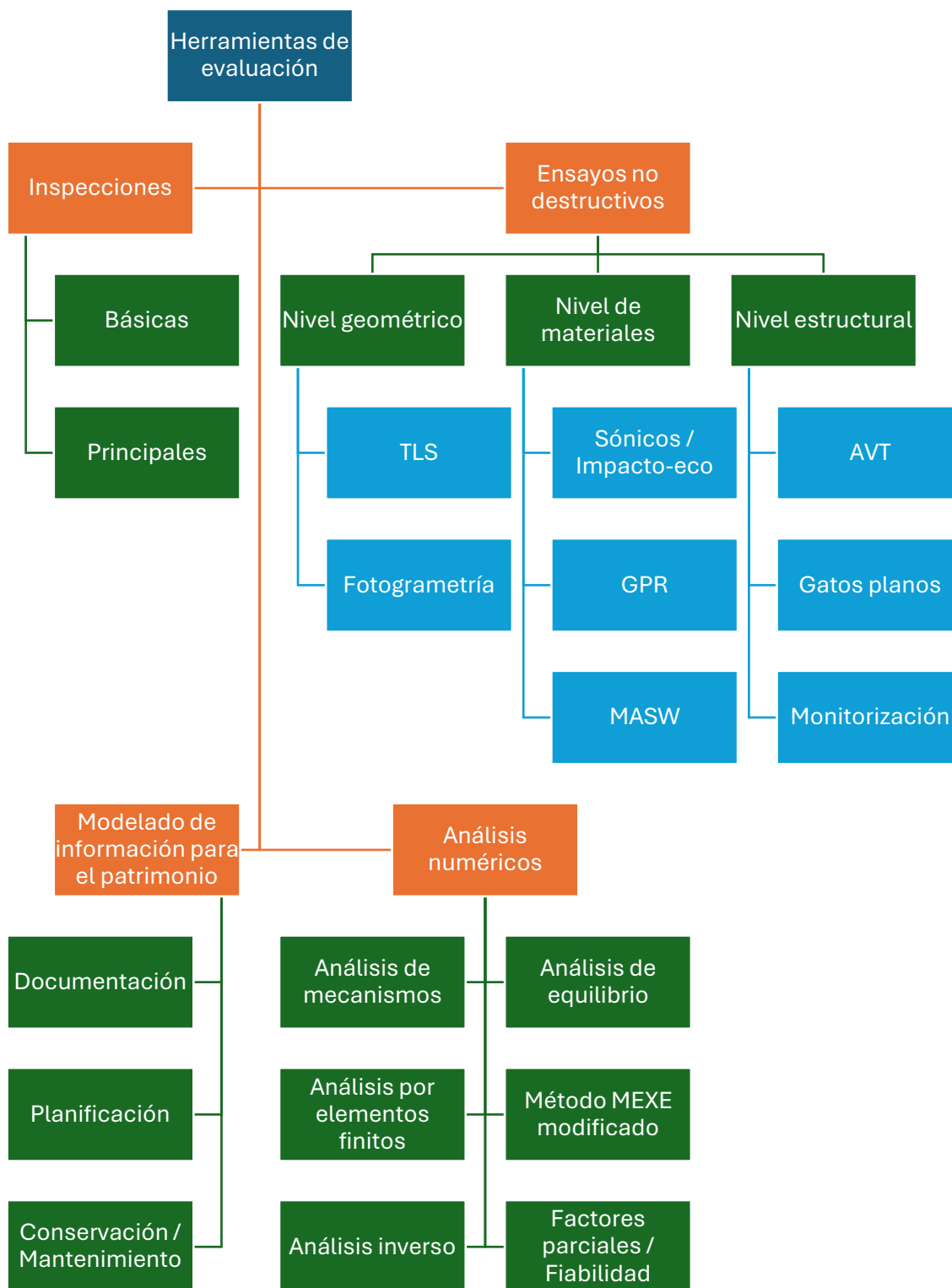


Figura 2-24: Esquema de herramientas de evaluación.

2.1.6.1. Inspecciones y evaluación preliminar

La evaluación de un puente de fábrica reside en las inspecciones sistemáticas, diseñadas para detectar deterioros y sus procesos patológicos de manera temprana. Estas inspecciones, que pueden ser básicas (con una periodicidad de aproximadamente cada 15 meses) o principales (cada 5 años), son cruciales para la gestión de la conservación de las infraestructuras [13].

Según el documento técnico CS 454, la inspección de puentes arco de fábrica debe abarcar tanto el exterior como el interior de la estructura. Se recomienda realizar investigaciones internas cuando exista duda sobre su resistencia o se sospeche socavación interna o lixiviación del relleno, ya que estas pueden revelar la presencia de anillos de refuerzo, ensillados, y la localización de servicios instalados en la bóveda. También deben inspeccionarse la calzada y las aceras en busca de daños o roturas. La evaluación de la bóveda incluye el análisis del estado y naturaleza de los materiales (ladrillo, piedra o bloque de hormigón), el espesor del anillo, las juntas y la condición del mortero, así como la detección de fisuras, separación entre anillos, deformaciones y desplazamientos de dovelas. Es importante tener en cuenta que el espesor del anillo puede variar bajo la calzada y bajo el pretil. En cuanto a los tímpanos y parapetos, la inspección debe registrar su geometría y posibles defectos como desplomes, abombamientos, grietas, daños por impacto, meteorización o pérdida de piedras de coronación. [15]

2.1.6.2. Ensayos no destructivos (END) y caracterización de materiales

Los ensayos no destructivos (END) son herramientas esenciales para obtener información detallada sobre la geometría, los materiales y el comportamiento estructural de los puentes de fábrica sin causarles daño. Un enfoque multidisciplinario que integre diversas técnicas de END permite una caracterización completa de la estructura en diferentes niveles [16]. A continuación, se comentan algunas de estas.

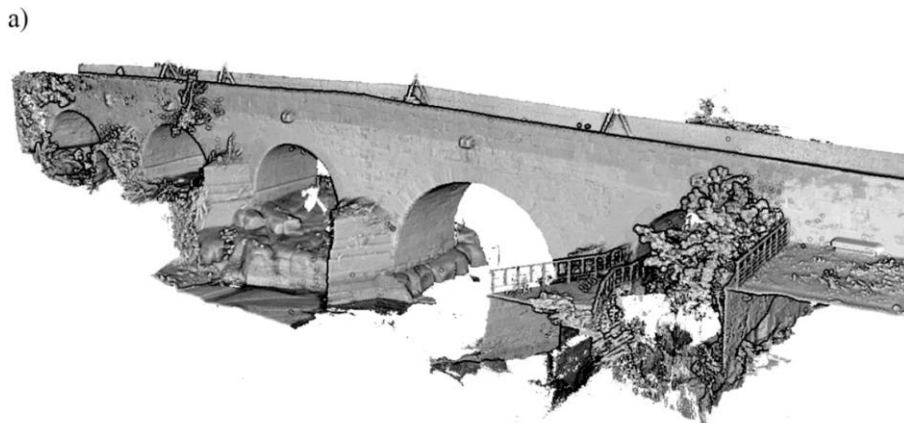


Figura 2-25: Vista general de la nube de puntos del puente romano de Ávila obtenida con TLS [16].

A **nivel geométrico**, el escáner láser terrestre (TLS) es una herramienta fundamental. Permite determinar la envolvente externa del puente con gran precisión, facilitando la creación de modelos tridimensionales (CAD) exactos del estado "*as-built*" de la estructura. La Figura 2-25 ilustra el uso exitoso de la técnica TLS para el análisis del Puente romano de Ávila [16]. Complementariamente, las cámaras digitales y la fotogrametría también se emplean para la determinación de la geometría externa [16]. El Puente de Cernadela, por ejemplo, fue digitalizado mediante geometría (Figura 2-26). La fotogrametría implica la reconstrucción 3D de objetos a partir de imágenes 2D, lo que

permite obtener modelos detallados de la superficie del puente. Esta técnica se desarrollará con mayor profundidad en un apartado posterior.

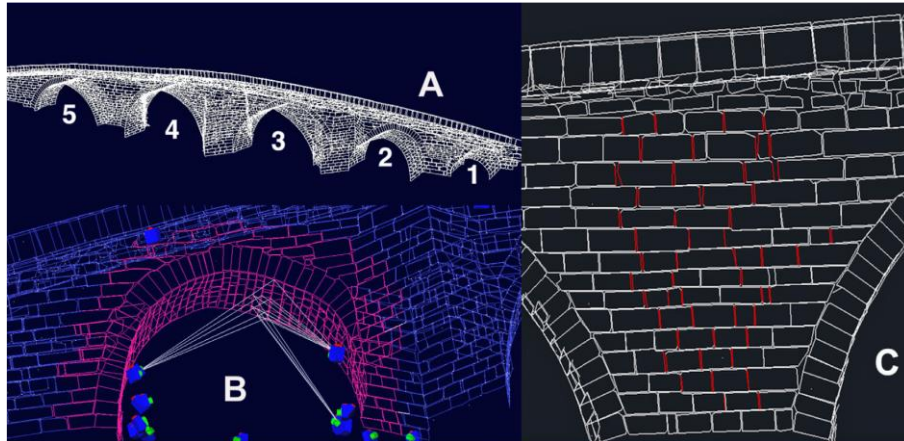


Figura 2-26: Puente de Cernadela: (a) Modelo de alambre 3D de toda la estructura, (b) modelo detallado de la segunda bóveda del puente con la posición de la cámara y los rayos de intersección de algunos puntos y (c) grietas medidas en los muros de los tímpanos [17].

Para la caracterización a **nivel de materiales**, se utilizan diversas herramientas entre las que destacan [16]:

- Los métodos sónicos y de impacto-eco se emplean para evaluar las propiedades de los materiales de fábrica, detectando heterogeneidades o defectos internos.
- El georradar (*Ground Penetrating Radar* - GPR) es una herramienta poderosa para explorar la estructura interna del puente, identificar la geometría del intradós del arco, determinar el espesor de este, y detectar vacíos, discontinuidades o la presencia de heterogeneidades en el relleno y la fábrica. Esta herramienta se combinó con la fotogrametría en el puente de Cernadela (Figura 2-27) [17].

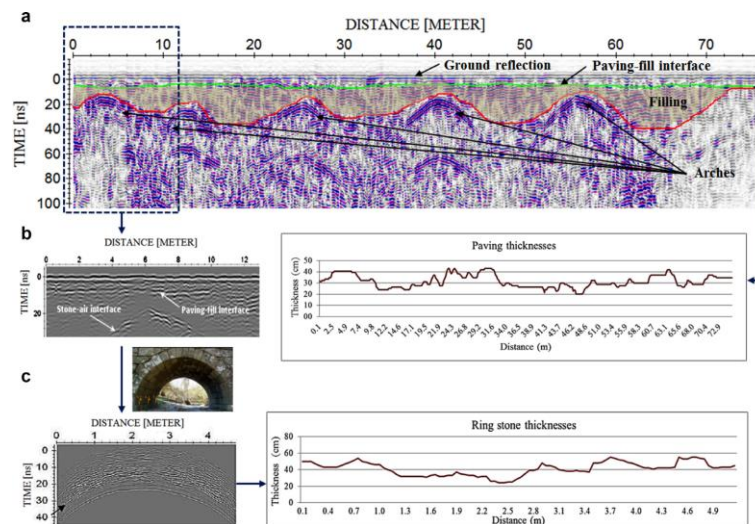


Figura 2-27: Información geométrica del puente de Cernadela obtenida mediante GPR [17].

- El análisis multicanal de ondas superficiales (*Multichannel Analysis of Surface Waves* - MASW) se utiliza específicamente para caracterizar las propiedades del relleno del puente (Figura 2-28). Esta técnica permite obtener perfiles bidimensionales de las velocidades de las ondas de cizallamiento (ondas S), lo

que a su vez se correlaciona con el módulo de Young y la densidad del material de relleno.



Figura 2-28: Ensayos MASW en el puente romano de Ávila: a) configuración; b) detalle del equipo utilizado y; c) momento en que se excita el relleno [16].

A **nivel estructural**, los ensayos de vibración ambiental (*Ambient Vibration Tests* - AVT) son una herramienta clave. Estos ensayos permiten identificar las propiedades dinámicas de la estructura, como las frecuencias naturales y las formas modales de vibración. Los datos obtenidos de los AVT son vitales para actualizar y validar modelos numéricos de la estructura, permitiendo una comparación entre el comportamiento real y el simulado del puente [16]. Además, técnicas como los ensayos de gatos planos permiten estimar las tensiones in situ y las propiedades de deformabilidad de la mampostería. Estos ensayos se han llevado a cabo en puentes de la red ferroviaria portuguesa, como el puente de Durrães y un paso inferior en São Pedro da Torre (Figura 2-29) [18].

A nivel de monitorización estructural, se utilizan diversas técnicas para evaluar el comportamiento de puentes de mampostería. En un nuevo puente de arco de mampostería de piedra en Vila Fria, Portugal, se instaló una extensa red de instrumentación para medir varias magnitudes (Figura 2-30). Las técnicas de monitorización incluyeron [19]:

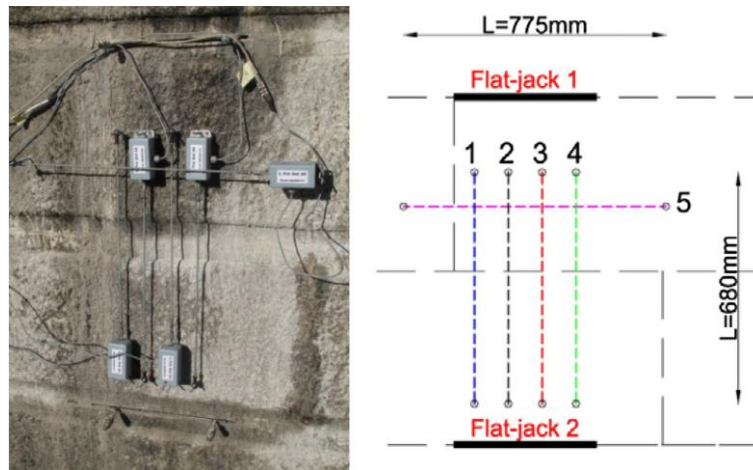


Figura 2-29: Ensayo de deformabilidad in situ mediante gatos planos [18].

- Desplazamientos globales: Se utilizaron sensores de nivel de presión diferencial para medir los desplazamientos verticales relativos de la corona de los arcos con respecto a sus pilas.
- Desplazamientos relativos en juntas: Se emplearon transductores de desplazamiento (LPDS) basados en rejillas de Bragg en fibra óptica para medir la apertura/cierre y el deslizamiento entre los bloques de piedra.
- Deformaciones en bloques de piedra: Se colocaron extensómetros eléctricos y ópticos en las superficies del intradós y extradós de los bloques para medir la deformación local y calcular las tensiones correspondientes.
- Presión y tensiones en el relleno: Se utilizaron celdas de presión total para medir la presión vertical en el relleno y las tensiones normales en el anillo del arco.

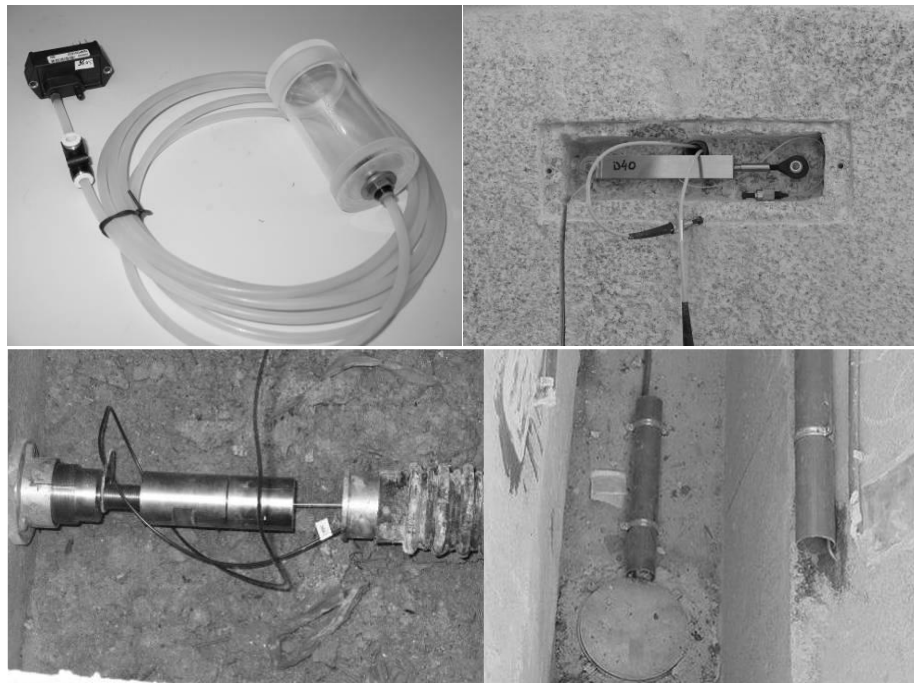


Figura 2-30: Sensores de monitorización: (sup. izq.) sensor de nivel de presión diferencial, (sup. der.) transductor de desplazamiento, (inf. izq.) transductor de desplazamiento óptico y (inf. der.) celda de presión total circular [19].

2.1.6.3. Modelado de información para el patrimonio (H-BIM)

Una herramienta avanzada para la documentación y gestión de puentes históricos es el Modelado de Información de Construcción del Patrimonio (H-BIM - *Heritage Building Information Modeling*). Esta metodología se aplica, entre otras, a obras históricas de ingeniería civil, como los puentes de fábrica, para facilitar su conservación y mantenimiento. Ejemplo de ello fue la digitalización del Puente de Ízbor, de manera que resultara útil para las agencias gubernamentales de planificación y conservación (Figura 2-31) [20]. El H-BIM permite registrar características esenciales como la geometría, los materiales, las texturas y las relaciones entre los elementos estructurales del puente, creando un modelo digital detallado que sirve como una referencia invaluable para la planificación y gestión de la conservación. Para la creación de estos modelos H-BIM, se utilizan técnicas de levantamiento de datos como el escaneo láser, lo que permite una integración de la información geométrica con la información paramétrica del edificio [20]. Esta herramienta y sus aplicaciones se desarrollarán con mayor detalle en apartados posteriores del trabajo.

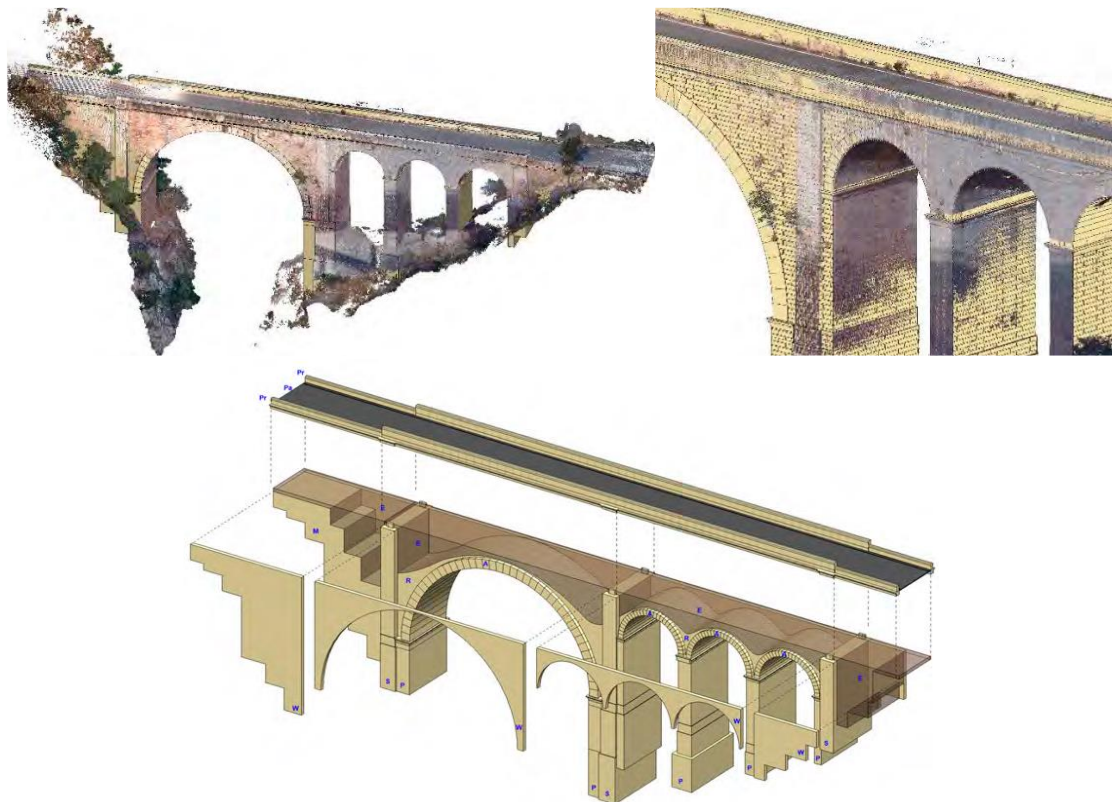


Figura 2-31: Puente de Ízbor: nube de puntos y modelo BIM [20].

2.1.6.4. Análisis numéricos y computacionales

Los análisis numéricos y computacionales son herramientas fundamentales para evaluar la capacidad portante, la estabilidad y el comportamiento estructural de los puentes de fábrica bajo diferentes escenarios de carga y deterioro. Permiten simular la respuesta de la estructura a las acciones y entender los posibles mecanismos de fallo.

- Análisis de mecanismos: Es una de las metodologías utilizadas que determina la resistencia de la estructura evaluando la carga mínima que causaría la formación de cualquier mecanismo de fallo compatible, como el desarrollo de

- rótulas o deslizamientos en las juntas. Este enfoque se basa en la identificación de los posibles modos de colapso de la estructura. [15]
- Análisis basado en el equilibrio: Representa otra metodología para el análisis estructural de arcos de fábrica, centrada en las condiciones de equilibrio de las fuerzas dentro de la estructura. [15]
 - Análisis por elementos finitos no lineal (*Non-linear Finite Element Analysis* - FEA): Este es considerado uno de los métodos más potentes y versátiles para simular el comportamiento mecánico de los puentes de fábrica. Permite modelar el comportamiento complejo de la fábrica, incluyendo su respuesta no lineal, y simular los efectos de deformaciones, asentos, acciones sísmicas y cargas vivas. Para su aplicación precisa, se requiere un conocimiento exhaustivo de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. [16]
 - Método MEXE modificado: Es una metodología específica utilizada para la evaluación de arcos de fábrica. Este método parte de una evaluación provisional y luego aplica factores de modificación para tener en cuenta las diferencias entre el arco real y un arco idealizado, proporcionando una estimación de su capacidad. [15]
 - Análisis inverso: Representa un enfoque innovador para la investigación de problemas patológicos en puentes arco de fábrica. Esta metodología utiliza la condición de daño observada actualmente en el puente como punto de partida. A partir de esta información, busca identificar las cargas o escenarios que probablemente llevaron al desarrollo de ese patrón de daño. El proceso de análisis inverso a menudo se transforma en un problema de identificación de parámetros, donde se utilizan algoritmos de optimización (como algoritmos genéticos) para ajustar los parámetros del modelo mecánico del puente. El objetivo es minimizar la diferencia entre el patrón de daño real observado y el patrón de daño predicho por el modelo numérico. La información derivada de un análisis inverso es sumamente valiosa para comprender las causas subyacentes de los procesos patológicos y para la planificación de acciones de mantenimiento o refuerzo más efectivas. [21]
 - Métodos basados en factores parciales y en la fiabilidad: Estos métodos permiten una evaluación probabilística de la seguridad y funcionalidad de la estructura [15]. Consideran la probabilidad de que la estructura no sufra daños graves bajo las cargas esperadas, lo que es esencial para la gestión del riesgo y la toma de decisiones sobre la intervención.

2.2. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría ha emergido como una herramienta fundamental y de creciente relevancia en la evaluación de puentes de fábrica. Ofrece una solución de bajo coste y alta efectividad para la obtención de datos topográficos de gran resolución, una tarea que tradicionalmente suponía elevados costes de capital y una compleja logística. A diferencia de las metodologías convencionales que a menudo requerían la intervención de organizaciones especializadas, la fotogrametría digital contemporánea facilita la generación de conjuntos de datos tridimensionales de alta resolución de una manera más accesible y eficiente [22]. Esta capacidad es crucial para la creación de modelos geométricos precisos, que no solo sirven como una representación fiel de la estructura en su estado actual, sino también como base indispensable para el análisis del estado de conservación y el comportamiento estructural de estas infraestructuras históricas [17, 23].

2.2.1. Fundamentos de la fotogrametría y el proceso "Structure-from-Motion" (SfM)

“La fotogrametría es la técnica cuyo fin es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto” (Bonneval). La reconstrucción tridimensional de estructuras complejas, como los puentes de fábrica, ha experimentado una transformación radical gracias al desarrollo de algoritmos basados en el principio de *Structure-from-Motion* (SfM) (Figura 2-32). Este enfoque posibilita la reconstrucción de la geometría tridimensional de un objeto o una escena completa a partir de una serie de imágenes bidimensionales capturadas desde múltiples puntos de vista. [22]

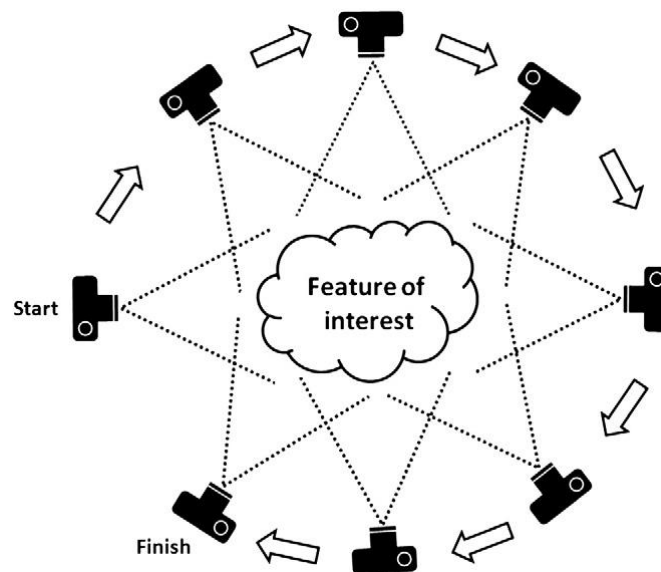


Figura 2-32: Esquema de adquisición de imágenes superpuestas para SfM [22].

El proceso de SfM se distingue por su capacidad para determinar de forma simultánea tanto la geometría detallada de la escena como la posición exacta y los parámetros intrínsecos de la cámara utilizada en el momento de la captura, todo ello de manera automatizada [22]. Este sistema aprovecha la información contenida en la superposición de las imágenes para inferir la profundidad y la forma de los elementos. El flujo de trabajo típico de SfM comprende una secuencia de etapas interconectadas y cruciales:

- Adquisición de imágenes: Esta fase inicial es de vital importancia y requiere la captura de un elevado número de fotografías del objeto desde diversos ángulos y posiciones estratégicas. Es fundamental asegurar una superposición suficiente entre las imágenes contiguas para permitir la identificación de puntos comunes y la reconstrucción tridimensional. La calidad y el número de las imágenes influyen directamente en la precisión y la resolución del modelo final. [22, 24]
- Alineación de imágenes: Una vez adquiridas las imágenes, los algoritmos de SfM proceden a identificar y extraer "puntos clave" o "puntos de características distintivas" en cada una de ellas. Estos puntos, que son invariantes a cambios de escala o rotación, son emparejados automáticamente entre las fotografías superpuestas. A partir de estos emparejamientos el software es capaz de calcular con gran precisión la posición relativa (X, Y, Z) y la orientación (ángulos de rotación) de cada cámara en el momento de la toma de cada fotografía. [22]

- Generación de la nube de puntos dispersa: Como resultado directo de la fase de alineación, se produce una nube de puntos inicial, de menor densidad, pero ya tridimensional, que proporciona una representación geométrica aproximada de la escena o el objeto bajo estudio. Esta nube sirve como un esqueleto sobre el cual se construirá la representación más detallada. [22]
- Generación de la nube de puntos densa: Utilizando las posiciones y orientaciones de la cámara calculadas con precisión, y aplicando algoritmos avanzados de *Multi-View Stereo* (MVS), se genera una nube de puntos significativamente más densa y con un nivel de detalle mucho mayor. Esta nube de puntos densa constituye una representación digital exhaustiva de la superficie del objeto, donde cada punto posee coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) y, frecuentemente, información de color (RGB) derivada de las propias fotografías. La densidad de esta nube determina la fidelidad de la reconstrucción. [24]
- Mallado y texturizado: A partir de la nube de puntos densa, el siguiente paso consiste en la creación de una malla poligonal, que es una superficie que define la geometría tridimensional del objeto. Esta malla se compone de un conjunto de triángulos interconectados que envuelven la nube de puntos. Posteriormente, las texturas extraídas directamente de las imágenes originales se proyectan sobre esta malla, resultando en un modelo 3D altamente realista y visualmente fidedigno, que reproduce no solo la forma, sino también los detalles superficiales y la coloración del objeto. [22]

Este enfoque, combinado con el uso de cámaras digitales de consumo o profesionales accesibles, ha democratizado el levantamiento topográfico de alta resolución, haciéndolo más viable y expandiendo su aplicación en diversos campos. Ha permitido superar las barreras de costes y la complejidad logística que tradicionalmente suponían otras técnicas de levantamiento como el escaneo láser terrestre (TLS) o los sistemas GPS en numerosos escenarios de campo. [22]

2.2.2. Adquisición de datos

La fase de adquisición de datos es un pilar fundamental que determina directamente la calidad, la precisión y la completitud del modelo fotogramétrico final. La elección del dispositivo de toma de imágenes se realiza en función de la accesibilidad al objeto de estudio, sus dimensiones, la complejidad de su geometría y los requisitos específicos del nivel de detalle necesario para la evaluación.

2.2.2.1. Fotogrametría terrestre de rango cercano

Esta modalidad implica la captura de imágenes desde puntos estratégicos situados a nivel del suelo o a corta distancia de la estructura. Se ha demostrado su probada eficacia para la generación de modelos 3D con una precisión excepcional, lo que la convierte en una técnica ideal para la evaluación detallada del estado de los puentes de fábrica. Una de las ventajas más destacadas de la fotogrametría terrestre es su capacidad para capturar con minuciosidad la geometría de elementos individuales de la mampostería, como cada dovela o sillar, registrando sus contornos precisos y sus imperfecciones inherentes. Esta fidelidad en la representación de las unidades constructivas es de suma importancia para la realización de análisis mecánicos avanzados y altamente detallados [23]. Adicionalmente, la precisión intrínseca del método fotogramétrico terrestre permite la identificación y el mapeo de fisuras y grietas incluso de pequeño tamaño en diversas áreas de la estructura, lo que es crucial para la detección temprana de procesos patológicos [17].

2.2.2.2. Fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados

Para la evaluación de estructuras de mayor tamaño, con geometrías particularmente complejas, o aquellas de dificultades de acceso desde el terreno, el empleo de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs o drones) equipados con cámaras digitales se ha consolidado como una metodología altamente adecuada y eficiente para la creación de modelos 3D. Los UAVs ofrecen la ventaja de una recolección de imágenes mucho más sencilla y rápida, permitiendo cubrir extensiones geográficas significativas y alcanzar puntos de vista elevados que serían inaccesibles o muy costosos de obtener mediante métodos terrestres. Esta técnica es especialmente beneficiosa para adquirir una visión integral de la compleja arquitectura de un puente (Figura 2-33), facilitando así su modelado tridimensional con propósitos de mantenimiento y gestión. El sistema UAS (*Unmanned Aerial System*), que incluye el dron y la cámara, es el encargado de generar las imágenes que, posteriormente, serán procesadas utilizando los algoritmos de SfM y MVS para la construcción de la nube de puntos 3D de la estructura. [24]

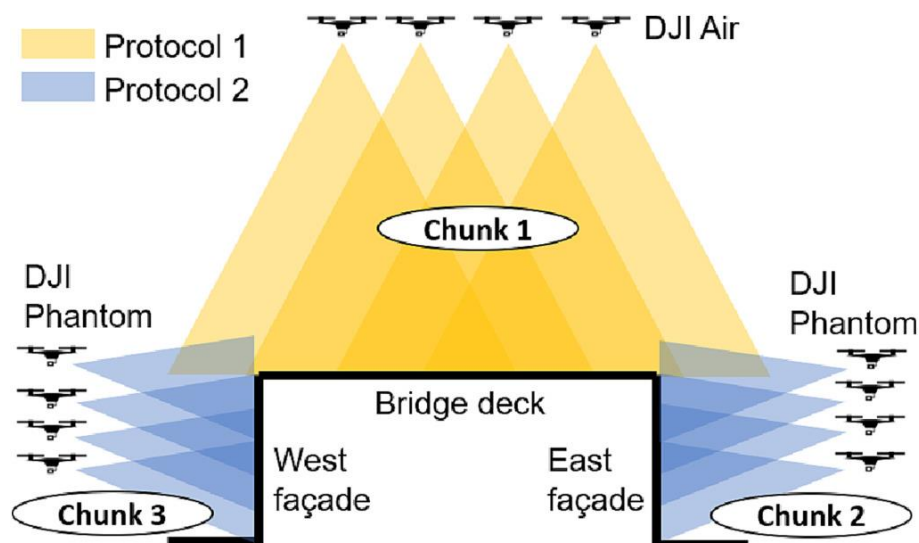


Figura 2-33: Dos protocolos para el funcionamiento y la recogida de imágenes con UAV [25].

La combinación de la fotogrametría terrestre y aérea, según las necesidades específicas de cada proyecto, puede proporcionar una cobertura de datos integral. Esto permite capturar tanto los detalles más finos de la superficie y los componentes individuales, como la geometría global y el contexto más amplio de la estructura, optimizando la cantidad y calidad de la información para la evaluación del puente.

2.2.3. Generación y procesamiento de modelos 3D para análisis estructural

Una vez que se ha obtenido la nube de puntos 3D de alta resolución a partir del procesamiento fotogramétrico, el siguiente paso crítico en la evaluación de puentes de fábrica es la transformación de estos datos en modelos geométricos adecuados para la realización de análisis estructurales avanzados. Particularmente, el análisis por elementos finitos (FEA). La nube de puntos, o incluso una malla superficial directamente derivada de ella, no son directamente utilizables para los cálculos de FEA debido a su naturaleza y estructura de datos.

El principal desafío en este proceso reside en la conversión de estos modelos 3D "basados en la realidad" –que reflejan la forma real del objeto con todas sus imperfecciones y detalles– en mallas volumétricas que sean compatibles con los requisitos de los softwares de FEA. A diferencia de los modelos CAD tradicionales, que

a menudo se construyen a partir de superficies paramétricas idealizadas como las NURBS (*Non-Uniform Rational B-splines*) que representan una forma geométrica perfecta, los modelos derivados de la fotogrametría capturan la complejidad y la irregularidad inherente de las estructuras existentes. [26]

Para que estos modelos sean aptos para un análisis FEA, se requiere un flujo de trabajo de procesamiento geométrico especializado que incluye las siguientes etapas [26]:

- Conversión a mallas volumétricas: Las mallas superficiales, que definen la envoltura externa del puente obtenida a partir de la fotogrametría, deben ser transformadas en mallas que no solo representen la superficie, sino que también definan explícitamente el volumen interno de los elementos estructurales. Esto implica la creación de elementos tridimensionales (como tetraedros o hexaedros) que discretizan el volumen del objeto.
- Reducción de la densidad de la malla: Los modelos fotogramétricos de alta resolución pueden generar nubes de puntos y, consecuentemente, mallas con una densidad extremadamente alta, lo que se traduce en un número masivo de nodos y elementos. Sin embargo, la complejidad computacional de un análisis FEA crece de manera exponencial con el incremento del número de nodos y elementos. Por lo tanto, es indispensable un proceso de reducción de la densidad de la malla volumétrica. Este paso busca simplificar el modelo para optimizar los tiempos de cálculo, al mismo tiempo que se mantiene una precisión geométrica suficiente que no comprometa la fiabilidad del análisis estructural. El objetivo es lograr un equilibrio óptimo entre la fidelidad geométrica y la eficiencia computacional.

La precisión inherente del modelo geométrico obtenido mediante fotogrametría es un factor determinante para la validez y la fiabilidad del análisis mecánico posterior [17]. Por ejemplo, la aplicación de la fotogrametría terrestre ha demostrado ser capaz de generar modelos geométricos exactos que constituyen una base robusta para la evaluación del estado de condición de los arcos de fábrica históricos. Estos modelos avanzados pueden, incluso, representar cada dovela o sillar de manera individualizada, capturando su contorno propio y permitiendo la aplicación de herramientas de modelado mecánico y análisis de elementos finitos basadas en un modelo discontinuo de dovelas [23].

2.2.4. Aplicaciones en la evaluación y gestión de puentes de fábrica

La capacidad de la fotogrametría para generar modelos 3D precisos, realistas y altamente detallados la convierte en una herramienta excepcionalmente versátil y valiosa, con una amplia gama de aplicaciones en el ámbito de la evaluación, el análisis y la gestión integral de puentes de fábrica.

2.2.4.1. Documentación geométrica y patrimonial

Una de las aplicaciones fundamentales y más directas de la fotogrametría es la creación de documentación geométrica exhaustiva y precisa del estado "*as-built*" (tal como fue construida) de los puentes históricos [17, 23]. Además, permite registrar con fidelidad los cambios que la estructura experimenta a lo largo del tiempo, lo cual es de vital importancia para la conservación y el análisis evolutivo de estas obras como elementos del patrimonio cultural [24].

En este contexto, la fotogrametría es una técnica clave y complementaria en la implementación del H-BIM [24, 25]. El H-BIM es una metodología avanzada que se

aplica específicamente a obras históricas de ingeniería civil, como los puentes de piedra, con el objetivo primordial de facilitar su conservación a largo plazo y una gestión eficiente de su mantenimiento. Esta aproximación permite registrar de forma estructurada y en un entorno 3D, características esenciales del puente como su geometría precisa, los tipos de materiales empleados, las texturas superficiales y las complejas relaciones espaciales entre sus diversos elementos estructurales. Al integrar esta vasta información en un modelo digital detallado, el H-BIM se convierte en una referencia invaluable para la planificación y gestión de las intervenciones de conservación. Por ejemplo, la fotogrametría puede utilizarse para escanear un puente existente, generando los datos necesarios para su posterior modelado en un entorno H-BIM con fines de conservación y estudio [24]. El Modelado de Información de Construcción del Patrimonio (H-BIM) y sus aplicaciones en la gestión del patrimonio se desarrollarán con mayor extensión en apartados posteriores de este trabajo.

2.2.4.2. Detección y mapeo de deterioros

La alta resolución y el nivel de detalle que ofrecen los modelos fotogramétricos permiten la identificación y el mapeo preciso de deterioros superficiales, incluso aquellos de dimensiones reducidas. La precisión del método fotogramétrico ha sido validada en la detección y cartografía de fisuras y grietas en distintas áreas de la estructura del puente [17]. Al realizar campañas fotogramétricas periódicas y comparar los modelos 3D obtenidos en diferentes momentos, es posible identificar y cuantificar con exactitud la progresión de deformaciones, asentos o el desarrollo de nuevas fisuras [25]. Esta capacidad proporciona información sobre la evolución de los procesos patológicos en la estructura, permitiendo una evaluación dinámica del estado de la fábrica y de las juntas, así como la detección temprana de problemas que requieran atención.

2.2.4.3. Preparación de modelos para análisis estructural

La fotogrametría desempeña un papel esencial en la generación de modelos geométricos exactos que sirven como datos de entrada fundamentales para la realización de análisis numéricos avanzados, en particular el análisis de elementos finitos (FEA) [17, 23, 26]. La capacidad de modelar con una precisión milimétrica la compleja geometría de los arcos de fábrica, incluyendo la forma individual y las imperfecciones de cada dovela o sillar, posibilita un análisis mecánico más realista y detallado del comportamiento estructural de estos puentes [23]. Esto es de vital importancia para la evaluación de la resistencia y la estabilidad bajo diversas condiciones de carga, así como para comprender cómo el relleno, con sus propiedades mecánicas, influye en el reparto de cargas y en la interacción fundamental con la bóveda [17]. Además, la fotogrametría facilita la implementación de modelos de arcos basados en una representación discontinua de las dovelas, lo que permite un análisis más fiel al comportamiento real de la mampostería [23].

2.2.4.4. Monitorización de deterioros y gemelos digitales

Los recientes avances en el concepto de gemelo digital en el campo de la ingeniería civil y de infraestructuras han revelado un enorme potencial para la monitorización continua y en profundidad de los deterioros en estructuras históricas. Un gemelo digital es, en esencia, un modelo virtual de una entidad física que posee la capacidad de actualizarse de manera constante con datos en tiempo real, lo que le permite reflejar fielmente el estado físico variable de su contraparte real a lo largo del tiempo. La fotogrametría ocupa una posición central en la creación de estos gemelos digitales, ya

que permite integrar las tecnologías fotogramétricas y los algoritmos de procesamiento de nubes de puntos dentro de este marco de monitorización.

Esta integración posibilita la evaluación de deterioros estructurales que varían con el tiempo, ofreciendo una herramienta poderosa para el *Structural Health Monitoring* (SHM) de estructuras históricas (Figura 2-34). Al monitorear continuamente el puente a través de datos fotogramétricos periódicos y actualizar dinámicamente su modelo digital, se pueden detectar anomalías, deformaciones o el progreso de los deterioros de manera temprana y precisa. Esta detección precoz, a su vez, facilita la planificación e implementación de intervenciones de mantenimiento o rehabilitación de forma oportuna y eficaz, optimizando los recursos y prolongando la vida útil de estas valiosas estructuras patrimoniales. [25]

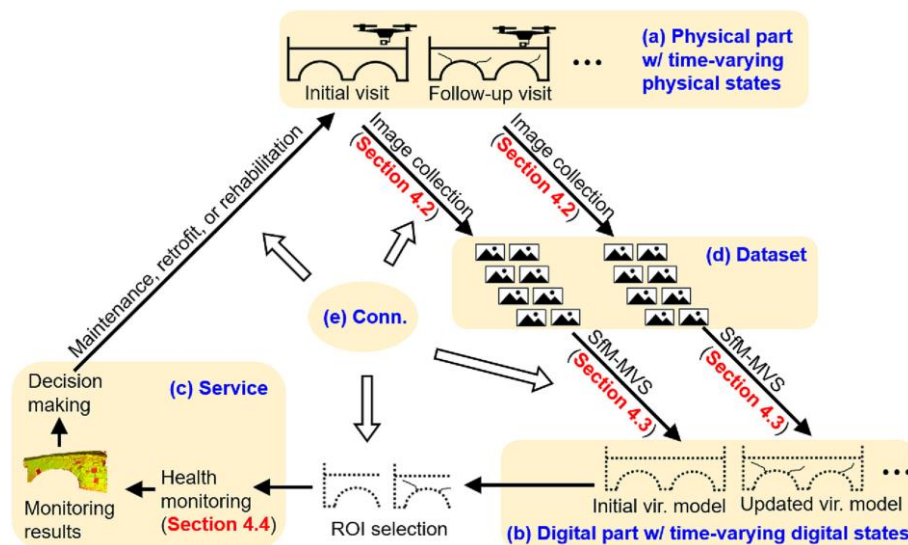


Figura 2-34: Marco de gemelos digitales para la supervisión de la salud de puentes: (a) parte física; (b) parte digital; (c) servicio; (d) conjunto de datos; y (e) conexiones [25].

2.2.5. Consideraciones y desafíos

A pesar de las numerosas ventajas que ofrece la fotogrametría en el campo de la evaluación de puentes de fábrica, su aplicación práctica conlleva ciertas consideraciones y desafíos que deben ser abordados para maximizar su potencial.

La precisión de los modelos fotogramétricos, si bien generalmente es alta, está directamente influenciada por varios factores críticos. Estos incluyen la calidad de las imágenes capturadas (nitidez, iluminación adecuada), el grado de superposición entre fotografías adyacentes, y la densidad y distribución de los puntos de control terrestre (GCPs - *Ground Control Points*) que se utilizan para georreferenciar y escalar el modelo con exactitud. Una planificación deficiente en la fase de adquisición de datos puede comprometer la precisión final de la reconstrucción 3D. [22]

Otro desafío significativo es el volumen de datos que se genera. La captura de un gran número de imágenes de alta resolución, necesaria para obtener modelos detallados, resulta en vastas nubes de puntos. El procesamiento de estos volúmenes masivos de datos implica una considerable complejidad computacional, requiriendo equipos informáticos potentes y software especializado. Además, la transformación de estas nubes de puntos y mallas superficiales de alta densidad en mallas volumétricas adecuadas para los análisis FEA, manteniendo la fidelidad geométrica mientras se

reduce la densidad para la eficiencia de cálculo, presenta un reto técnico que requiere flujos de trabajo específicos. [26]

Finalmente, es crucial reconocer que la fotogrametría, si bien es una herramienta extraordinariamente potente para la caracterización geométrica y superficial de los puentes, proporciona principalmente información externa de la estructura. Para obtener una comprensión integral del estado interno del puente, es esencial que la fotogrametría se complemente con otras técnicas de ensayos no destructivos. Por ejemplo, la integración del radar de penetración terrestre (GPR) (Figura 2-35) junto con la fotogrametría permite obtener una representación geométrica 3D realista y completa, añadiendo información valiosa sobre la composición interna del relleno, la detección de vacíos y la estructura oculta de la fábrica, como demuestra el análisis del puente Cernadela [17]. La elección y la integración de las herramientas deben estar guiadas por los objetivos específicos de cada evaluación, buscando un equilibrio óptimo entre el nivel de detalle requerido, la precisión deseada y la eficiencia general del proceso.

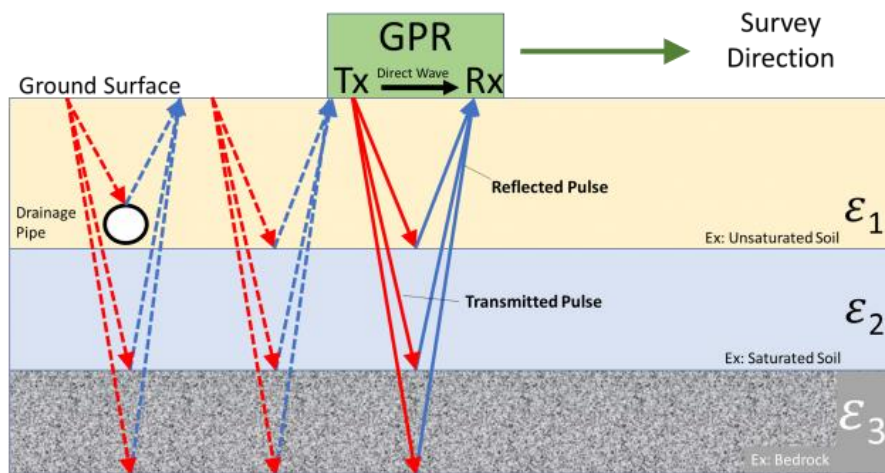


Figura 2-35: Diagrama esquemático de un sondeo GPR [27].

2.3. DIGITALIZACIÓN

2.3.1. Introducción

La era contemporánea se caracteriza por una creciente demanda de información y una constante evolución tecnológica, lo que ha impulsado una revolución en la forma en que se conciben, diseñan, construyen y operan las edificaciones e infraestructuras. En el sector de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC), esta transformación se ha manifestado en un uso cada vez mayor de la digitalización de datos. Las exigencias actuales de productividad y calidad en los proyectos están llevando al límite las herramientas y procesos de producción tradicionales, predominantemente basados en el diseño asistido por ordenador (CAD) en 2D. Aunque las herramientas CAD se han implantado de forma generalizada, su uso a menudo se ha limitado a tareas de delineación, replicando procedimientos manuales y generando múltiples representaciones independientes que no están conectadas entre sí, lo que puede conducir a incoherencias y errores que se propagan a lo largo del proyecto. [28]

En contraste, la digitalización avanzada, apoyada por técnicas de recolección de datos como la fotogrametría y el escaneo láser (discutidas en apartados previos), permite la generación de modelos 3D "as-built" de la realidad con un nivel de detalle y precisión sin precedentes. Estos modelos, sin embargo, generan vastos y diversos volúmenes de

información que requieren ser procesados, estructurados y gestionados de manera eficiente. La urgencia actual consiste en transformar estos datos crudos en un recurso de conocimiento compartido y fiable que pueda ser utilizado a lo largo de todo el ciclo de vida de una estructura, desde su concepción hasta su demolición o, en el caso de infraestructuras existentes, su mantenimiento y rehabilitación [29]. En este contexto, el *Building Information Modeling* (BIM) surge como una metodología clave, que plantea un nuevo sistema de pensamiento que integra tecnología y procesos para una gestión de la información más coordinada, coherente, computable y continua [28].

2.3.2. Building Information Modeling (BIM)

El *Building Information Modeling* (BIM) es un concepto que ha experimentado un rápido desarrollo en la industria de la construcción [30]. Es considerado una tecnología revolucionaria y un proceso que está transformando la industria. Aunque sus raíces se remontan a la investigación en modelado paramétrico de finales de los años 70 y principios de los 80, su implementación práctica en proyectos con aplicación práctica comenzó a mediados de los años 2000. Desde entonces, el término BIM ha pasado de ser una palabra de moda a convertirse en el eje central de la tecnología en el sector [31].

2.3.2.1. Definición y alcance

La definición de BIM ha sido objeto de diversas interpretaciones por parte de múltiples actores en la industria [30, 32]. Sin embargo, la mayoría de las definiciones convergen en que BIM no es simplemente un software, sino una metodología de trabajo integral y un proceso [28, 31]. En la Figura 2-36 se representa visualmente el concepto.

Según el comité de Estándares Nacionales de Modelado de Información de Edificios (NBIMS) de EE. UU., BIM se define como "una representación digital de las características físicas y funcionales de una instalación" [31]. Un modelo BIM es un "recurso de conocimiento compartido para la información sobre una instalación que forma una base fiable para las decisiones durante su ciclo de vida; definido como existente desde la concepción más temprana hasta la demolición" [31]. Por su parte, la *Associated General Contractors of America* lo percibe como "el desarrollo y uso de un modelo de software informático para simular la construcción y operación de una instalación" [31].

En esencia, BIM es un conjunto de metodologías de trabajo y herramientas caracterizado por el uso de información de forma coordinada, coherente, computable y continua. Esto se logra mediante el empleo de una o más bases de datos compatibles que contienen toda la información relevante sobre el edificio o la infraestructura que se pretende diseñar, construir o usar. [28]

A diferencia del CAD convencional, que describe un edificio mediante vistas 3D independientes (planos, secciones, alzados) donde la edición de una vista requiere la actualización manual de las demás, un modelo BIM es una representación digital inteligente y paramétrica. Los objetos en un modelo BIM no son solo entidades gráficas (líneas, arcos, círculos), sino que están definidos en términos de elementos y sistemas constructivos (espacios, muros, vigas, columnas) con una semántica contextual inteligente. Un modelo BIM transporta toda la información relacionada con el edificio, incluyendo sus características físicas y funcionales, así como la información del ciclo de vida del proyecto, en una serie de "objetos inteligentes". Por ejemplo, una unidad de aire acondicionado dentro de un modelo BIM contendría datos sobre su proveedor,

procedimientos de operación y mantenimiento, caudales y requisitos de espacio libre. [31]

Por tanto, no se consideran BIM los modelos que contienen datos 3D sin atributos de objeto, modelos sin soporte de comportamiento, modelos compuestos por múltiples archivos CAD 2D que deben combinarse, o modelos que no reflejan automáticamente los cambios de dimensiones en otras vistas. [31]

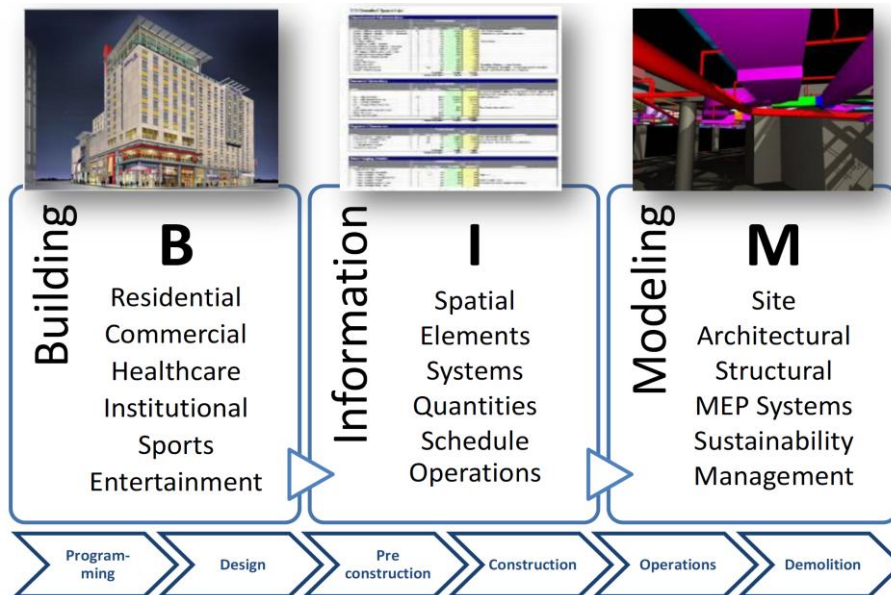


Figura 2-36: Representación visual del concepto BIM [31].

2.3.2.2. Principios y beneficios generales

BIM representa un nuevo paradigma en el sector de la edificación y construcción que fomenta la integración de los roles de todos los interesados (*stakeholders*) en un proyecto. Sus fundamentos se asientan en dos pilares principales: la comunicación y la colaboración. La implementación exitosa de BIM requiere la participación temprana de todos los interesados del proyecto, lo que ha llevado a la emergencia del concepto de *Integrated Project Delivery* (IPD) como un complemento natural de BIM. IPD integra personas, sistemas, estructuras de negocio y prácticas en un proceso colaborativo para reducir el desperdicio y optimizar la eficiencia en todas las fases del ciclo de vida del proyecto. [31]

Los principios clave de BIM incluyen [28]:

- Colaboración multidisciplinar y multiusuario: Permite que múltiples usuarios y disciplinas trabajen en el mismo proyecto con la seguridad de que la información actualizada por uno estará disponible automáticamente para los demás. Esto es crucial para la coordinación entre arquitectos e ingenieros, donde la actualización manual de información solía ser una fuente de errores y pérdidas de tiempo considerables.
- Coherencia y modelo único: La idea central de BIM es generar un modelo único que contenga toda la información del edificio, eliminando la necesidad de crear múltiples representaciones. De este modelo central se derivan diferentes tipos de vistas (planos, secciones, axonometrías), que son representaciones dinámicas de la base de datos global. Esto asegura que los diversos modelos

sean coherentes entre sí y compatibles con el edificio una vez construido, reduciendo la propagación de errores.

- Computabilidad: BIM permite cuantificar eficazmente parámetros no formales de un edificio, como mediciones de cantidades, volúmenes de aire, recorridos de evacuación o consumo energético. Esta capacidad de cuantificar y cualificar la información es fundamental para el análisis y la toma de decisiones.
- Continuidad a lo largo del ciclo de vida: La tecnología BIM considera que un edificio debe poder estudiarse durante todo su ciclo de vida, incluyendo las fases de diseño, producción y explotación (Figura 2-37). Esto significa que los futuros usuarios pueden acceder a información útil para la planificación del mantenimiento o la reparación de instalaciones.

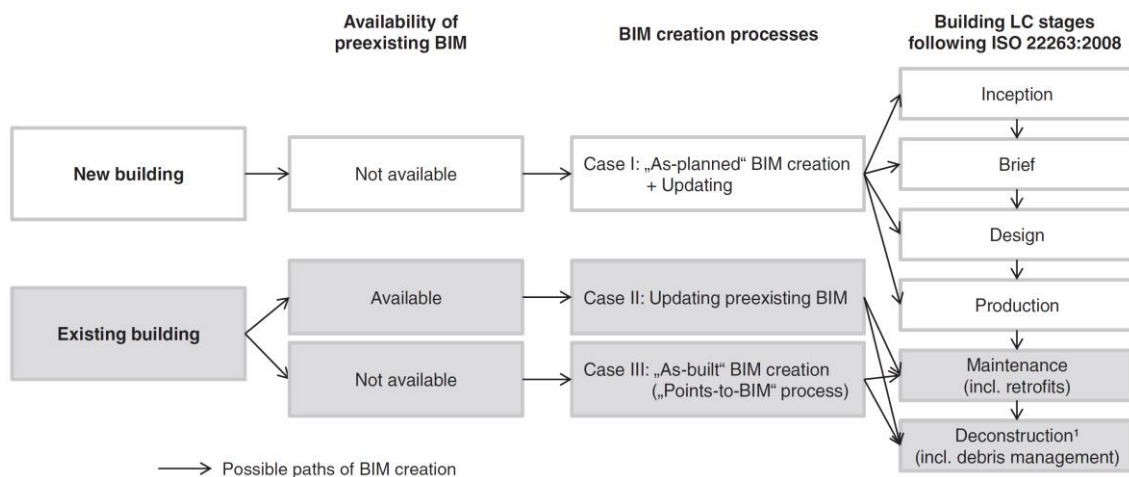


Figura 2-37: Procesos de creación de modelos BIM en edificios nuevos o existentes en función del BIM disponible y preexistente y de las fases del ciclo de vida [29].

Los beneficios generales de BIM son múltiples y se extienden a lo largo de todo el ciclo de vida de una edificación o infraestructura:

- Mejora de la eficiencia y la productividad: Al automatizar relaciones, procesos y la documentación, BIM agiliza las tareas de modelado de la información del edificio y reduce las tareas rutinarias y redundantes. Esto se traduce en una mayor productividad y fiabilidad del diseño. [28, 32]
- Reducción de errores y conflictos: La capacidad de trabajar con modelos coordinados entre sí disminuye drásticamente los errores y los problemas de coordinación entre disciplinas y usuarios. La detección de colisiones entre diferentes sistemas (estructuras, instalaciones, arquitectura) es una de las funcionalidades clave que permite resolver interferencias antes de la construcción. [28, 31]
- Mejora de la visualización y la comunicación: BIM permite a los interesados del proyecto visualizar lo que se va a construir en un entorno simulado, lo que facilita la identificación de posibles problemas de diseño, construcción u operación. Esto mejora la comunicación entre todos los actores del proyecto. [31]
- Optimización de costes y plazos (4D y 5D): La integración de información de planificación y costes permite una estimación de cantidades más precisa y la preparación de presupuestos detallados, con reducciones significativas en el tiempo de generación de estimaciones. También facilita la planificación logística y la identificación de riesgos en obra. [31]

- Soporte para la gestión de instalaciones y el mantenimiento: BIM proporciona una valiosa documentación "*as-built*" y permite almacenar información estructurada para procesos de mantenimiento, gestión de garantías y servicios. [29]

2.3.2.3. Dimensiones del BIM

El concepto de BIM se ha extendido para incluir diversas "dimensiones" que representan la integración de información adicional al modelo geométrico 3D, enriqueciendo su utilidad a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Estas dimensiones son [29, 31]:

- 3D (Geometría Espacial y Cantidades): Es la base del BIM, representando el modelo espacial de la edificación o infraestructura con sus componentes. Permite la extracción automática de cantidades
- 4D (Tiempo/Planificación): Integra la información del tiempo y la planificación de la construcción con el modelo 3D. Esto permite la simulación de la secuencia constructiva, la planificación de aspectos como la ejecución de la estructura (Figura 2-38), el aporte de materiales y personal, o la gestión de residuos, lo que mejora la coordinación y el seguimiento del progreso del proyecto [28].
- 5D (Costes): Añade la información de costes al modelo 3D y 4D. Permite una estimación de costes detallada, la preparación de presupuestos y el análisis del flujo de caja [31]. La capacidad de vincular partidas de medición a elementos constructivos facilita la aplicación de precios y la gestión económica del proyecto.

Aunque la mayoría de la literatura BIM se centra en estas tres dimensiones, es común encontrar referencias a otras dimensiones como 6D (sostenibilidad y análisis energético) y 7D (gestión de instalaciones y mantenimiento), que amplían aún más el alcance de la información que puede ser gestionada dentro de un entorno BIM.

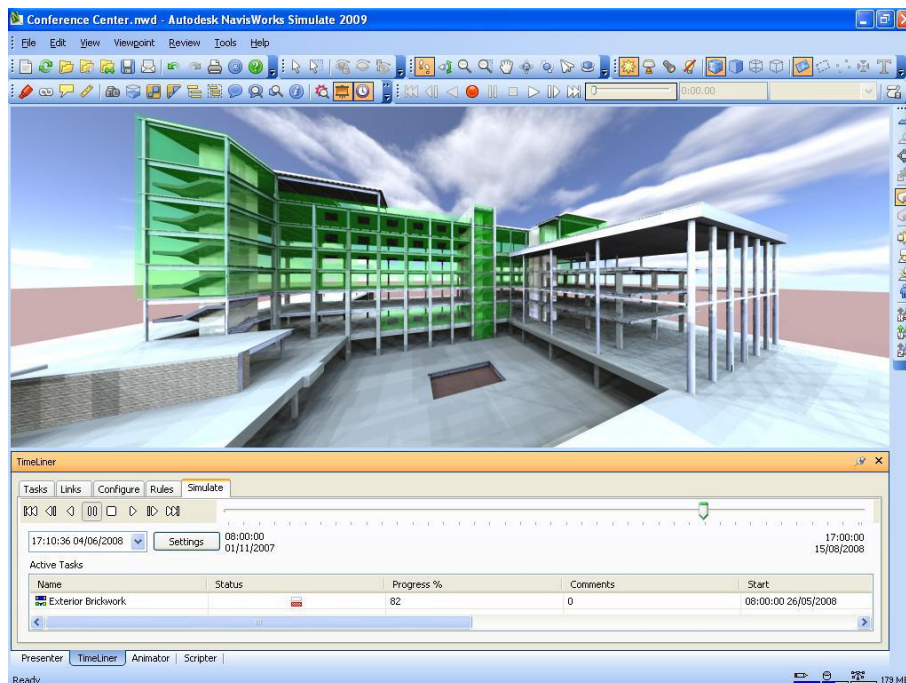


Figura 2-38: Simulación de la secuencia de construcción de un edificio [28].

2.3.2.4. Niveles de Desarrollo (LoD)

Los Niveles de Desarrollo (LoD, por sus siglas en inglés) son un marco que define la madurez de la información contenida en un modelo BIM en diferentes etapas del ciclo de vida de un proyecto. No se refieren solo al nivel de detalle gráfico del modelo, sino también a la cantidad y fiabilidad de la información no gráfica asociada a cada elemento. El LoD es fundamental para establecer expectativas claras entre los miembros del equipo y los clientes sobre la información que se espera del modelo en cada fase del proyecto. La especificación LoD más reconocida es la del *BuildingSMART* International y el *American Institute of Architects*, que generalmente clasifican los modelos en los siguientes niveles [29]:

- LoD 100 – Concepto: El modelo representa los elementos de forma genérica, con un nivel de detalle bajo, utilizado para el análisis conceptual. La información es aproximada y no tiene una geometría precisa.
- LoD 200 – Geometría Aproximada: Los elementos se modelan con sus tamaños, formas, ubicaciones y orientaciones aproximadas. Se pueden utilizar para análisis básicos de cantidad y coste, pero aún no hay especificaciones precisas.
- LoD 300 – Geometría Precisa: Los elementos se modelan con una geometría precisa y detallada en tamaño, forma, ubicación y orientación. La información asociada permite la coordinación y el desarrollo de la documentación de construcción.
- LoD 350 – Geometría Precisa con Interfaces: Similar al LoD 300, pero incluyendo la representación de las interfaces con otros elementos del modelo. Esto es crucial para la coordinación de especialidades.
- LoD 400 – Fabricación y Montaje: El modelo incluye información detallada para la fabricación, montaje y especificaciones de componentes. Permite la prefabricación y la planificación logística avanzada.
- LoD 500 – *As-Built*/Operación: El modelo representa el activo tal como se ha construido realmente, incorporando toda la información del proyecto y los datos de rendimiento para la operación y el mantenimiento a lo largo de su vida útil. Esto es particularmente relevante para la gestión de edificios existentes.

La correcta definición y aplicación de los LoD en un proyecto BIM permite gestionar la información de manera progresiva, asegurando que el nivel de detalle sea el adecuado para cada fase, evitando esfuerzos innecesarios o la falta de información crítica.

2.3.2.5. Software BIM relevante

Aunque BIM es una metodología, su implementación práctica se apoya en una amplia gama de herramientas de software que facilitan la creación, gestión y análisis de los modelos de información [28]. Estos programas están diseñados para diversas disciplinas y fases del proyecto, permitiendo la colaboración y el intercambio de datos. Algunos de los softwares BIM más destacados en el mercado incluyen:

- Revit (Autodesk): Es uno de los programas más extendidos y reconocidos, utilizado para el diseño arquitectónico, estructural y de instalaciones. Permite la creación de modelos paramétricos y la generación automática de documentación.
- ArchiCAD (Graphisoft): Otro pionero en el ámbito BIM, conocido por su interfaz intuitiva y su enfoque en el diseño arquitectónico.
- Tekla Structures (Trimble): Especializado en el modelado de estructuras de acero y hormigón, ofrece un alto nivel de detalle para la fabricación y construcción.

- Allplan (Nemetschek): Un software BIM integral que cubre diversas disciplinas, desde la arquitectura y la ingeniería estructural hasta el modelado de terrenos.
- Navisworks (Autodesk): Herramienta de revisión de modelos BIM que permite la coordinación entre diferentes disciplinas, la detección de colisiones y la simulación 4D.
- Civil 3D (Autodesk): Orientado a la ingeniería civil, permite el diseño y modelado de infraestructuras lineales como carreteras, ferrocarriles y sistemas de drenaje, integrándose en el flujo de trabajo BIM.
- OpenBuildings Designer (Bentley Systems): Una solución BIM multidisciplinar que soporta el diseño de edificaciones e infraestructuras, con un fuerte enfoque en la interoperabilidad a través de formatos abiertos.

Estos softwares, junto con muchas otras herramientas especializadas (para análisis energético, simulación de rendimiento, gestión de proyectos, etc.), forman el ecosistema tecnológico que permite materializar la metodología BIM y extraer sus beneficios a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto. La interoperabilidad entre ellos, a menudo facilitada por formatos como IFC (*Industry Foundation Classes*), es crucial para una colaboración efectiva.

2.3.3. Heritage-BIM (H-BIM)

La preservación del patrimonio cultural construido se presenta como un desafío global de inmensa complejidad y relevancia. La gestión, el análisis y la intervención en estas estructuras históricas demandan herramientas que superen las limitaciones de los métodos tradicionales de documentación, a menudo fragmentados e insuficientes para capturar la riqueza de información que albergan. En este contexto, el Heritage-BIM (H-BIM) emerge como una evolución conceptual y metodológica del BIM tradicional, diseñada específicamente para abordar las particularidades del patrimonio construido. [33]

2.3.3.1. Introducción

El H-BIM se concibe como una herramienta transformadora cuya principal finalidad es comprender, documentar, publicitar y, en última instancia, posibilitar la reconstrucción virtual de los bienes culturales existentes [34]. Su desarrollo responde a una "aporía" o contradicción fundamental: la rigidez inherente de las herramientas de modelado BIM convencionales frente a la flexibilidad y la atención al detalle que exigen los elementos del patrimonio construido. A diferencia de los proyectos de nueva construcción, donde el modelo BIM precede y guía el proceso constructivo, en el H-BIM, el modelo se deriva de una realidad existente, a menudo incompleta, con geometrías complejas e irregulares, materiales heterogéneos y una historia evolutiva que debe ser interpretada y documentada [33].

Esta transición del BIM al H-BIM implica una extensión conceptual significativa. Mientras que el BIM se centra en la "nueva información" generada durante el diseño y la construcción, el H-BIM se enfoca en la "información existente" y la estratificación del conocimiento [33]. Esto significa que un modelo H-BIM no solo representa la geometría actual de un edificio histórico, sino que también integra datos históricos, arqueológicos, estructurales, materiales y patológicos, reconociendo el carácter temporal y evolutivo de la estructura [34]. Una característica distintiva es la incorporación de información paramétrica temporal a lo largo del ciclo de vida del edificio, permitiendo rastrear transformaciones, adiciones y degradaciones a lo largo del tiempo [33].

Un aspecto crucial que distingue al H-BIM es el papel del modelador, quien, en el ámbito del patrimonio, actúa como un "autor de su hipótesis reconstructiva". La interpretación de las estructuras existentes, con sus capas de historia y sus modificaciones, implica un grado de subjetividad y una necesidad de integrar conocimientos multidisciplinarios que van más allá de la mera representación geométrica. La rigidez de las herramientas CAD y BIM tradicionales, diseñadas para la precisión de la nueva construcción, resulta insuficiente para modelar las geometrías orgánicas e irregulares, así como las incertidumbres y los deterioros presentes en el patrimonio [33]. Por ello, el H-BIM no solo requiere software avanzado, sino también un profundo conocimiento histórico, constructivo y de los materiales por parte del equipo interdisciplinario [34].

Para abordar la complejidad de la información y la incertidumbre en los modelos H-BIM, se han introducido conceptos clave como el Nivel de Evolución (LOE) y el Nivel de Fiabilidad (LoR) para objetos digitales. El LOE permite documentar la evolución de un edificio a través de diferentes fases históricas, registrando adiciones, demoliciones o modificaciones. El LoR, por su parte, cuantifica el grado de certeza o fiabilidad de la información incorporada al modelo, reconociendo que no todos los datos tienen la misma precisión o respaldo documental. [33]

En esencia, el H-BIM se plantea como una plataforma común que facilita el diálogo multidisciplinario entre arquitectos, ingenieros, restauradores, historiadores y gestores del patrimonio. Al integrar información diversa en un único entorno digital, el H-BIM no solo optimiza la documentación y la gestión, sino que también mejora la comprensión y la preservación de los valores culturales e históricos de las estructuras [34]. La finalidad última no es solo la conservación física, sino también la creación de un "patrimonio inteligente" donde la información digitalizada se convierte en un recurso vivo y accesible para futuras intervenciones y para la difusión del conocimiento [35].

2.3.3.2. Particularidades y desafíos

La implementación del H-BIM presenta desafíos únicos que lo diferencian significativamente de la aplicación del BIM en nuevas construcciones, justificando su desarrollo como una disciplina propia.

En primer lugar, la geometría irregular y complejidad intrínseca del patrimonio construido es una diferencia fundamental [33]. Los edificios históricos rara vez presentan las geometrías regulares y paramétricas que los softwares BIM tradicionales están diseñados para manejar. Arcos deformados, muros con desplomes, superficies no planas y elementos constructivos únicos o artesanales son la norma. Modelar estas formas orgánicas e irregulares a partir de nubes de puntos obtenidos de la realidad es un proceso altamente complejo y que consume mucho tiempo, a menudo denominado el "cuello de botella" del flujo de trabajo *Scan-to-BIM* [34]. La creación de objetos paramétricos para estas geometrías singulares requiere el desarrollo de nuevas "familias" o librerías que capturen la complejidad formal y constructiva, lo que dista mucho de la selección de componentes predefinidos en un proyecto de nueva edificación [33]. La adaptación de la información geométrica desde las nubes de puntos a los objetos BIM paramétricos no es un proceso automático, requiere una "ingeniería inversa" y una intervención manual intensiva [34].

En segundo lugar, el H-BIM maneja información oculta, fragmentada y subjetiva. A diferencia de un nuevo diseño donde toda la información se genera y es clara, en un edificio existente, gran parte de la información relevante (materiales ocultos, cimentaciones, daños internos, evolución constructiva) está oculta, fragmentada o

incluso es contradictoria. Esto conduce a una equivalencia desigual entre los objetos virtuales y la realidad física. La estructuración semántica de esta información oculta o inferida es inherentemente subjetiva, y el modelador debe tomar decisiones interpretativas, lo que refuerza su papel como "autor de la hipótesis" en el modelo H-BIM [33]. La incorporación de datos de archivo, registros históricos, informes arqueológicos y análisis de materiales se vuelve indispensable para enriquecer el modelo, pero también añade capas de complejidad y de incertidumbre [34].

Un tercer desafío es el esfuerzo de modelado y las limitaciones de la automatización. El proceso de transformar una nube de puntos en un modelo H-BIM paramétrico es, en gran medida, semi-automático o incluso manual. A pesar de los avances en el "*Scan-to-BIM*", la extracción automática de elementos complejos y la asignación de información semántica siguen siendo un desafío significativo [34]. El tiempo y el esfuerzo necesarios para esta tarea son considerablemente mayores que en un proyecto de nueva construcción [33]. Esto se debe a que el modelado debe capturar no solo la geometría "ideal" o proyectada, sino la geometría "*as-built*", con todas sus desviaciones, deformaciones y particularidades. La falta de herramientas estandarizadas y completamente automatizadas para esta conversión es un obstáculo importante para la eficiencia y la implementación generalizada [34].

Finalmente, la gestión de la incertidumbre y la evolución histórica es fundamental. Los edificios históricos no son estáticos; han experimentado transformaciones, adiciones y degradaciones a lo largo del tiempo. El H-BIM debe ser capaz de gestionar esta dinámica temporal. Para abordar la incertidumbre inherente a los datos de patrimonio y documentar su evolución, el H-BIM introduce dos parámetros fundamentales: el Nivel de Evolución (LOE), que permite documentar las diferentes fases históricas de un edificio, registrando los cambios específicos en cada objeto a lo largo del tiempo, y el Nivel de Fiabilidad (LoR), que cuantifica el grado de certeza o fiabilidad de la información incorporada a cada objeto o parte del modelo. [33]

Estos desafíos demuestran que el H-BIM no es simplemente la aplicación de BIM a edificios antiguos, sino una adaptación profunda que requiere metodologías y parámetros específicos para manejar la complejidad geométrica, la información oculta y la naturaleza evolutiva del patrimonio construido [33, 34].

2.3.3.3. Flujo de trabajo y metodologías específicas

El flujo de trabajo del H-BIM es un proceso multidisciplinar que integra diversas etapas, desde la captura de la realidad hasta el enriquecimiento semántico y el análisis avanzado (Figura 2-39) [34]. Aunque comparte algunas fases con el *Scan-to-BIM* para nuevas construcciones, las metodologías aplicadas y la profundidad de la información requerida son sustancialmente diferentes.

El proceso comienza con la recopilación multidisciplinar de información. El punto de partida del H-BIM es una recopilación exhaustiva y multidisciplinar de datos sobre el edificio histórico. Esto incluye datos gráficos, obtenidos mediante técnicas de levantamiento de alta precisión como el escaneo láser terrestre o la fotogrametría, que generan nubes de puntos 3D de la geometría "*as-built*". Es crucial que la captura no se limite a la geometría externa, sino que también recoja datos de elementos internos y estructurales. Adicionalmente, se añaden datos semánticos y tipológicos de análisis técnicos de materiales, sistemas constructivos y procesos patológicos, así como de la revisión de documentación histórica y estudios arqueológicos. Finalmente, se incorpora

información general documental, como informes de intervenciones previas o estudios geotécnicos. [34]

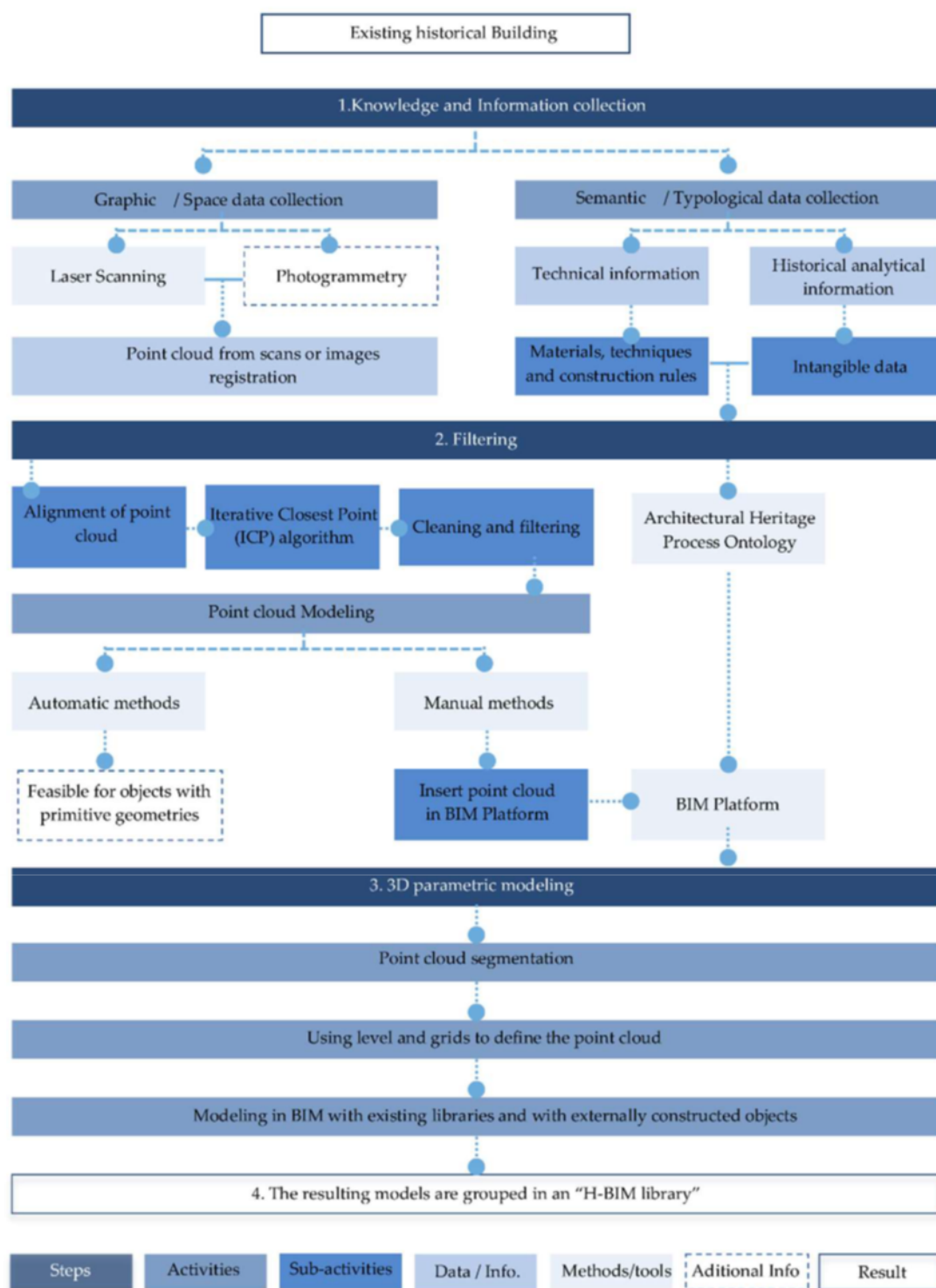


Figura 2-39: Diagrama de flujo del método de construcción manual de la librería H-BIM [34].

Una vez obtenida la nube de puntos, el siguiente paso crítico es su procesamiento y el modelado. Esto implica la limpieza, filtrado y registro de las nubes de puntos para obtener una representación precisa [34]. El componente central del proceso H-BIM es el modelado paramétrico a partir de la realidad, que consiste en transformar la densa y

a menudo irregular nube de puntos en objetos paramétricos inteligentes dentro del entorno BIM [33]. Esto a menudo requiere una "ingeniería inversa" y una intervención manual intensiva, dada la falta de automatización completa para geometrías complejas [34]. Es necesario crear nuevas familias de objetos que se adapten a las formas irregulares de elementos históricos [20, 33]. La elección del Nivel de Detalle (LoD) es fundamental y debe ser coherente con la finalidad del modelo, buscando una representación fiel del "*as-built*" con sus imperfecciones [34].

El último paso fundamental es la integración de datos y el enriquecimiento semántico. Aquí se asocia información no geométrica a los objetos del modelo, que es una de las mayores fortalezas del H-BIM. Se adjuntan al modelo propiedades de los materiales existentes, incluyendo su tipo, origen y estado de conservación [34]. El H-BIM ofrece herramientas avanzadas para el mapeo y documentación de procesos patológicos y deterioros, permitiendo definir la extensión y ubicación precisa del daño, añadir parámetros informativos (tipo, severidad, causa probable) y registrar series temporales para el monitoreo [36]. Además, se añaden referencias a documentos históricos, estudios arqueológicos y fotografías, funcionando como una "historia digital" completa del edificio [33, 34, 36].

2.3.3.4. Aplicaciones en la evaluación del patrimonio

El H-BIM no es solo una herramienta de modelado, sino una plataforma integral que habilita una amplia gama de aplicaciones para la gestión, análisis y preservación del patrimonio construido, desde la documentación básica hasta el análisis estructural avanzado y la difusión pública.

Una de las principales aplicaciones es la documentación exhaustiva y gestión de la información. El H-BIM permite crear una documentación "*as-built*" muy fiable y completa, incluyendo geometría, materiales, estado de conservación e intervenciones pasadas. Al integrar diversos datos en un modelo tridimensional, el H-BIM se convierte en una base de datos centralizada que facilita la gestión del conocimiento a largo plazo. Esto permite acceder rápidamente a cualquier información asociada a un componente específico, fundamental para comprender el edificio antes de cualquier intervención. [34]

Otra aplicación es la planificación de la conservación, restauración y mantenimiento. El H-BIM facilita el mapeo preciso y detallado de daños estructurales y deterioro de materiales directamente sobre el modelo 3D, como muestra la Figura 2-40. Las herramientas permiten definir la geometría del área afectada y asociarle parámetros informativos, como el tipo de daño, la severidad, las posibles causas y las recomendaciones de intervención [36]. Con un modelo que integra el estado actual y los procesos patológicos, los profesionales pueden planificar las intervenciones de manera más eficiente y segura, simulando escenarios, evaluando impactos y generando listas de recursos [35]. El H-BIM también permite la gestión de las actividades de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del edificio, programando inspecciones y registrando reparaciones [20, 34].

El H-BIM también es una gran herramienta para la evaluación estructural avanzada de edificios históricos. Los modelos H-BIM pueden ser transformados en mallas volumétricas para el análisis de elementos finitos, permitiendo a los ingenieros simular el comportamiento mecánico de la estructura y calcular tensiones o deformaciones. El modelo H-BIM, al basarse en nubes de puntos de alta precisión, permite la detección y cuantificación de deformaciones y patrones de fisuras, lo que es crucial para entender el comportamiento estructural a largo plazo, como en puentes de fábrica [20, 34].

Además, combinado con técnicas de análisis inverso, puede ayudar a deducir las causas de los daños [34].

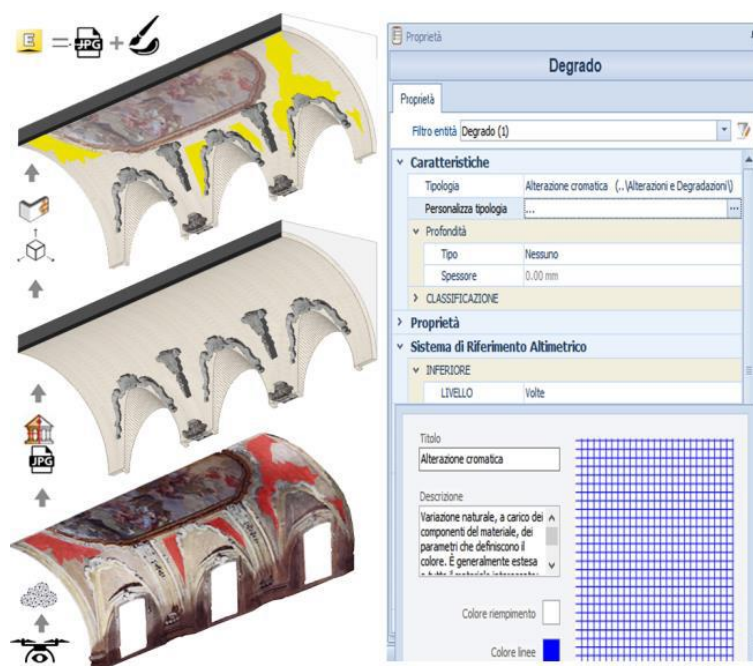


Figura 2-40: Objetos paramétricos H-BIM: Mapeo de deterioro de bóvedas [36].

Finalmente, el H-BIM tiene un papel importante en la reconstrucción virtual y difusión del patrimonio cultural [34]. Los modelos H-BIM pueden utilizarse para crear reconstrucciones virtuales de edificios en diferentes periodos históricos, permitiendo al público visualizar su evolución [33]. Estos modelos también sirven como base para documentación técnica, visualizaciones 3D para exposiciones, materiales educativos y plataformas web interactivas que facilitan el acceso y la comprensión del patrimonio [34]. El puente de Ízbor en España (Figura 2-31) es un ejemplo de cómo un modelo H-BIM puede ser útil para la planificación gubernamental y las agencias de conservación. Construido en 1866, este puente de piedra es un ejemplo de ingeniería civil que ha servido por más de 150 años y forma parte del patrimonio monumental del país. Aunque está en mejor estado de conservación que otros puentes cercanos, el estudio H-BIM reveló una deformación en su arco central, que se había hundido 0,11 metros. La capacidad de documentar y monitorear el estado de la estructura demuestra el valor del H-BIM como una herramienta para las agencias de conservación y planificación, permitiendo registrar las variaciones a lo largo del tiempo y planificar futuras medidas de conservación. [20]

2.3.3.5. Beneficios

La adopción del H-BIM en el ámbito del patrimonio construido conlleva una serie de beneficios sustanciales que justifican su inversión y desarrollo continuo, lo que se traduce en eficiencias operativas, una profundización del conocimiento y la preservación del legado cultural.

Un beneficio clave es la mejora en la toma de decisiones y la gestión de proyectos. El H-BIM proporciona una plataforma de conocimiento compartida y accesible para todos los agentes implicados, centralizando la información relevante en un único modelo tridimensional [34]. Esto reduce la posibilidad de inconsistencias y errores, facilita la identificación temprana de problemas, mejora la coordinación multidisciplinar y permite

una toma de decisiones más informada y estratégica [34]. La capacidad de visualizar daños y simular intervenciones antes de la ejecución real disminuye la incertidumbre y optimiza la planificación [36].

El H-BIM también contribuye a la reducción de costos y tiempo en proyectos de patrimonio. Aunque la fase inicial de captura y modelado puede suponer una inversión considerable, los beneficios a largo plazo son significativos. Una documentación precisa y completa minimiza la necesidad de levantamientos adicionales, y la detección temprana de conflictos reduce errores y sobrecostos en obra [34]. Además, la generación semi-automática de modelos 3D y la extracción de información para planificación de mantenimiento optimizan los flujos de trabajo y mejoran la productividad. El desarrollo de librerías de objetos paramétricos específicos para H-BIM puede acelerar el modelado, disminuyendo los tiempos de ejecución de futuros proyectos [35].

Finalmente, el beneficio más profundo del H-BIM es su contribución a una mayor comprensión y preservación de los valores culturales. Al integrar la dimensión temporal y las diferentes fases evolutivas de una estructura (mediante el LOE) y al cuantificar la fiabilidad de la información (mediante el LoR), el H-BIM permite una lectura mucho más profunda y precisa de la "biografía" del edificio [33]. Se convierte en una herramienta invaluable para documentar materiales, técnicas constructivas y alteraciones que reflejan la historia y la cultura [34]. El H-BIM facilita la creación de una "biblioteca especial de objetos paramétricos" para el patrimonio, que no solo ayuda en el modelado, sino que crea un repositorio de conocimiento constructivo histórico que puede ser compartido [33]. Esto contribuye al concepto de "patrimonio inteligente", donde la tecnología digital juega un papel activo en la conservación proactiva y la gestión sostenible [35]. Al enfrentar la brecha de conocimiento histórica y al proporcionar una plataforma para la gestión de la incertidumbre en los datos, el H-BIM se erige como un pilar fundamental para la salvaguarda de nuestro legado para las generaciones futuras [33].

2.3.3.6. Desafíos y perspectivas futuras

A pesar de los numerosos beneficios y el prometedor potencial del H-BIM, su implementación y adopción generalizada aún enfrentan desafíos significativos, tanto a nivel técnico como organizacional. Superar estos obstáculos es crucial para la maduración de la disciplina y su integración efectiva en las prácticas de conservación del patrimonio.

Existen varios desafíos técnicos. La rigidez del software BIM tradicional es un problema persistente, ya que estos programas están diseñados para la nueva construcción y no se adaptan fácilmente a las geometrías irregulares y orgánicas del patrimonio [33, 34]. Las herramientas actuales carecen de la flexibilidad necesaria para representar con precisión las formas complejas e imperfecciones, requiriendo a menudo soluciones manuales intensivas o software de terceros que interrumpen el flujo de trabajo. Asimismo, las limitaciones de la automatización del *Scan-to-BIM* son un "cuello de botella", ya que la conversión automática y precisa de nubes de puntos en objetos BIM paramétricos con propiedades semánticas sigue siendo un reto, por lo que se requiere de una considerable intervención manual [34]. La falta de librerías y catálogos de objetos históricos es otro desafío. No existen librerías universales o estandarizadas de objetos H-BIM paramétricos para elementos constructivos históricos, lo que hace que su creación para cada proyecto sea costosa y lenta. Finalmente, la gestión de la incertidumbre y los datos heterogéneos es compleja, debido a la naturaleza variable y

la calidad diversa de la información histórica, arqueológica o de monitoreo. Aunque el LoR ayuda a cuantificar la fiabilidad, la visualización intuitiva de esta incertidumbre sigue siendo un área de investigación activa [33, 34].

En cuanto a los desafíos organizacionales y prácticos, la implementación inicial del H-BIM requiere un esfuerzo significativo y costos considerables en tecnología, formación y cambio de metodologías. El alto esfuerzo en la conversión de datos puede ser una barrera para su uso generalizado, especialmente en organizaciones con presupuestos limitados. Además, existe una falta de conocimiento y formación especializada. La escasez de profesionales que combinen habilidades de modelado BIM con un profundo conocimiento del patrimonio y la historia de la construcción es un inconveniente. La resistencia al cambio por parte de profesionales acostumbrados a métodos tradicionales también puede obstaculizar la implementación. Por último, la interoperabilidad y los estándares son un desafío, ya que la adaptación de los estándares IFC a las complejidades y tipos de información específicos del patrimonio aún es un reto para garantizar el intercambio fluido de modelos y datos. [34, 35]

A pesar de estos desafíos, las perspectivas futuras para el H-BIM son prometedoras y diversas líneas de investigación y desarrollo están activas. Se esperan avances en la automatización del *Scan-to-BIM* mediante algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar la segmentación de nubes de puntos, el reconocimiento de objetos y la generación de modelos paramétricos [34]. El desarrollo de librerías universales de objetos paramétricos H-BIM reutilizables, que capturen la diversidad de elementos históricos, es una dirección clave para acelerar el modelado y reducir costos [33]. También continuará la investigación en métodos para modelar y visualizar de manera más efectiva la incertidumbre de los datos y el deterioro dinámico de las estructuras [33, 36]. El H-BIM se beneficiará de la integración con tecnologías emergentes como los gemelos digitales para el monitoreo continuo de estructuras, y la realidad aumentada y virtual para la visualización y difusión inmersiva del patrimonio. Finalmente, la armonización de estándares y la promoción de formación interdisciplinar son cruciales para el desarrollo de la próxima generación de profesionales del H-BIM [34].

CAPÍTULO 3: CASO DE ESTUDIO

3.1. PRESENTACIÓN DEL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES

El Puente Mayor de Liérganes sobre el Río Miera se ubica en el pintoresco municipio de Liérganes, en Cantabria, España (Figura 3-1), declarado de interés histórico-artístico nacional en 1978 [37].

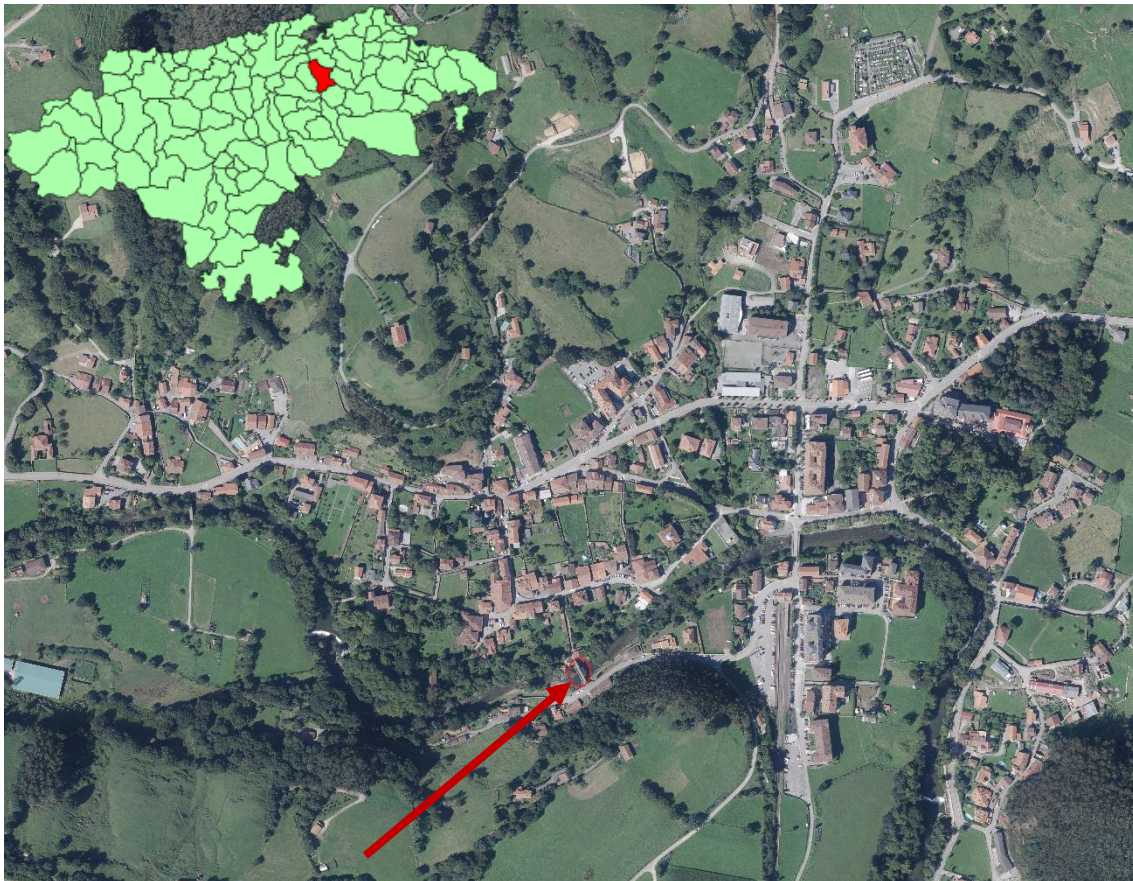


Figura 3-1: Ubicación del Puente Mayor en Liérganes [38].

La placa de información turística junto al puente dice: “El río Miera cuenta en su tramo medio con tres puentes de similar fábrica, en Mirones, Rubalcaba y Liérganes. Este último, también llamado Puente Romano, aunque se construyó a finales del siglo XVI.

... Es uno de los monumentos más importantes de Liérganes, constituyéndose en uno de los parajes simbólicos y típicos de la región, pintado y fotografiado en numerosas ocasiones por público y visitantes debido a su especial atractivo visual". [39]

La construcción de la estructura actual se llevó a cabo a finales del siglo XVI, aproximadamente entre 1587 y 1606. Este periodo coincide con una importante transformación en la infraestructura de la región. El puente de Liérganes forma parte de un esfuerzo más amplio de la época por mejorar las comunicaciones y los transportes. En este momento, se produce un cambio significativo: los puentes de madera, susceptibles a las riadas y al desgaste, comienzan a ser reemplazados por sólidas construcciones de piedra que buscan establecer rutas seguras y fiables hacia la Meseta. [40]

El diseño estuvo a cargo del maestro de cantería Bartolomé de Hermosa, cuya autoría es un dato relevante, ya que el puente es un ejemplo notable de la arquitectura de la época. Su estructura se compone de un solo ojo de gran luz, ligeramente apuntado, que le confiere una forma elegante y funcional, y cuenta con un tajamar en forma de pico en la parte aguas arriba para mitigar la fuerza de la corriente [40].

Es importante señalar que, si bien el puente actual es de finales del siglo XVI, existe la creencia de que se erigió sobre los cimientos de una estructura anterior, aunque no hay consenso sobre si era romana o medieval [39]. No obstante, el puente actual, con su sólida construcción de sillería, refleja la experiencia de los maestros de la época en la adaptación al entorno y a las necesidades de la comunidad, sirviendo de paso principal para la comunicación de la zona.

El puente es también el telón de fondo de la famosa leyenda del Hombre Pez [41]. Una escultura moderna en la orilla del río rinde homenaje a este mito, reforzando la conexión cultural entre el puente y la identidad del pueblo. Hoy en día, es un punto clave para el turismo y un símbolo cultural que define la estampa de Liérganes. Como otras estructuras antiguas, ha mostrado signos de deterioro que han requerido la atención de expertos para su conservación [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.], lo que lo convierte en un objeto de estudio ideal para la aplicación de nuevas metodologías como la fotogrametría y el BIM.

3.2. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y CONSTRUCTIVAS

El Puente Mayor de Liérganes es una notable obra de ingeniería de su época, con un diseño que combina la funcionalidad con la robustez. Se trata de una construcción pétrea de perfil alomado, cuya longitud total supera los 30 metros. Como se observa en la Figura 3-3, el puente fue diseñado con una estructura de dos bóvedas, siendo la principal la de mayor vano, con 60 pies (16,8 m), y la secundaria con 30 pies (8,4 m). El ancho total de estas bóvedas es de 15 pies (4,2 m).

Sin embargo, la mayoría de las fuentes de turismo y patrimonio cultural, como Guía Repsol [43], describen el puente actual como una estructura de un solo ojo o arco sobre el río Miera. Esta aparente discrepancia podría deberse a que el arco menor se encuentra sobre un saliente rocoso que solo contiene agua durante los caudales más importantes, lo que hace que el arco principal sea el elemento más visible y dominante de la estructura.



Figura 3-2: Fotografía panorámica general del Puente Mayor de Liérganes.

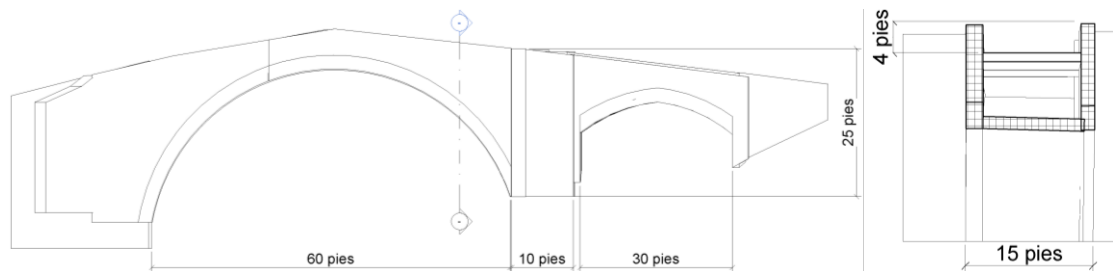


Figura 3-3: Dimensiones principales del Puente Mayor de Liérganes.

La pila central, que alcanza la altura de la calzada formando apartaderos, presenta tajamares de planta ojival aguas arriba y de forma rectangular en su espolón aguas abajo. Esta pila tiene un ancho de 10 pies (2,8 m) y una longitud de 25 pies (7,0 m). Los pretils tienen una altura de 4 pies (1,12 m), que se reduce a 3,5 pies (0,98 m) una vez finalizada la calzada. Estos pretils son de mampostería y cuentan con remates superiores de piedra, que podían ser redondeadas o hexagonales a elección del maestro.

La calzada del puente está empedrada con guijarro menudo y dispone de tres hileras de cadenas de piedra de un pie de ancho (0,28 m): una en el centro y las otras dos pegadas a los antepechos. Estas líneas de piedra se unen con encadenados perpendiculares cada 20 pies (5,6 m), lo que garantiza la estabilidad del firme. Además, cuenta con desagües para el agua de lluvia, una característica clave para la durabilidad del puente.

En su conjunto, el puente está construido principalmente con sillares de piedra arenisca, un material abundante en la zona [44], lo que le ha conferido una gran solidez y ha permitido su conservación a lo largo de los siglos.

3.3. INSPECCIONES

3.3.1. Inspección básica

La inspección básica realizada en el Puente Mayor se llevó a cabo conforme a lo establecido en la “Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado” [13]. Este tipo de inspección, de carácter visual y no especializada, tiene como finalidad detectar de forma temprana posibles deterioros, evitar que evolucionen hacia daños graves y señalar aquellos deterioros que puedan requerir una intervención urgente.

Para sistematizar los resultados se empleó una ficha de inspección básica (Tabla 1), en la que se consignaron los daños observados en el puente mediante una tabla que recoge:

- El elemento afectado.
- El tipo de daño identificado.
- El índice del daño, expresado mediante dos parámetros:
 - o Extensión (valorada de 1 a 4).
 - o Gravedad (valorada de 0 a 2).

La aplicación de esta metodología permitió disponer de un registro claro y ordenado de los deterioros detectados, constituyendo un primer diagnóstico del estado actual del puente y sirviendo de base para futuros análisis más detallados.

Tabla 1: Ficha de inspección básica del Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE INSPECCIÓN BÁSICA		PUENTE: Puente Mayor de Liérganes	
ELEMENTO	DAÑO	ÍNDICE DEL DAÑO	
		EXT. (1 a 4)	GRAV. (0 a 2)
Bóveda mayor	Agrietamiento en la unión con la boquilla	3	2
Bóvedas	Costras negras	4	0
Bóvedas	Pérdida de mortero en las juntas	2	1
Bóvedas	Vegetación incipiente en las juntas	2	1
Bóveda menor	Eflorescencias salinas	1	0
Boquillas	Eflorescencias Salinas	3	0
Pila	Erosión diferencial y disgregación superficial	1	1
Pila	Grieta vertical en la parte superior	2	2
Tímpanos y muros	Vegetación abundante	4	1
Estribo sur de la bóveda mayor	Fisura vertical inclinada	2	2
Tímpanos y muros	Desagregación o desintegración granular	3	1
Plataforma	Crecimiento de un árbol en la zona del estribo	1	2
Tímpano norte de la bóveda mayor	Deformación hacia el exterior	4	1

3.3.2. Fichas de procesos patológicos

A continuación, se presentan las imágenes correspondientes a los principales procesos patológicos identificados durante la inspección básica. Las fotografías de la Figura 3-4 permiten ilustrar, de manera visual, los daños observados en el Puente Mayor de Liérganes y complementan la información recogida en la ficha de inspección.

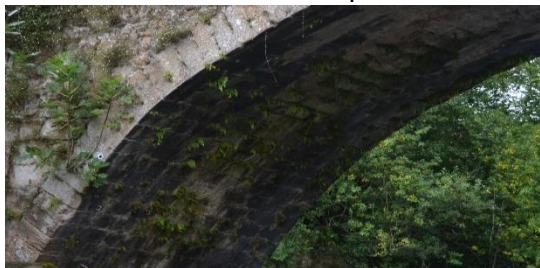
El estudio se complementa con un total de 13 fichas completas de los procesos patológicos las cuales se incluyen en el ANEXO 1. En estas se recogen de forma detallada los deterioros documentados, junto con posibles causas y actuaciones.



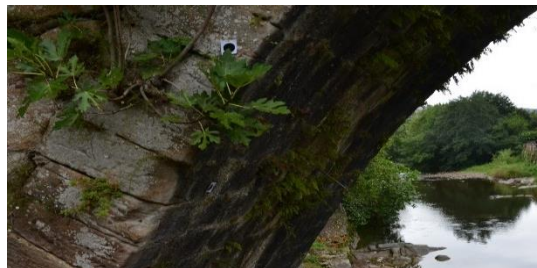
Agrietamiento de la bóveda mayor en la unión con la boquilla



Costras negras en las bóvedas



Pérdida de mortero en las juntas de las bóvedas



Vegetación incipiente en las juntas de las bóvedas



Éflorescencias salinas en la bóveda menor



Éflorescencias salinas en las boquillas





Erosión diferencial y disgregación superficial en la pila



Grieta vertical en la parte superior de la pila



Vegetación abundante en los tímpanos y muros de estribo



Fisura vertical inclinada en el estribo sur de la bóveda mayor



Desagregación o desintegración granular en el tímpano y muro de estribo



Crecimiento de un árbol en la plataforma, en la zona del estribo



Deformación hacia el exterior del tímpano norte en la bóveda mayor

Figura 3-4: Procesos patológicos identificados en el Puente Mayor de Liérganes.

3.4. METODOLOGÍA DESARROLLADA

Para el levantamiento del Puente Mayor de Liérganes, se empleó una metodología que combinó la fotogrametría terrestre y el escaneo láser para obtener una nube de puntos detallada. En primer lugar, se colocaron más de 60 dianas de 5 cm sobre la estructura del puente para servir como puntos de control. Posteriormente, se midió la posición de estas dianas usando una estación total Leica TS13 3" R500 (Figura 3-5), una herramienta capaz de medir sin necesidad de prisma, lo que facilitó y agilizó el proceso de captura de datos al mejorar la accesibilidad a puntos difíciles. Para la fotogrametría, se usó una cámara Nikon D7000 con un objetivo Nikon DX SWM VR ED IF Aspherical de 72 mm a una distancia focal de 18 mm, permitiendo la obtención de un conjunto de imágenes que capturaron la geometría del puente.

Con las imágenes y los puntos de control georreferenciados, se procedió a la creación de la nube de puntos. Para ello, se utilizó el software Agisoft Metashape, que procesó las fotografías para generar un modelo tridimensional de la estructura. Este modelo fue la base para la fase de modelado BIM.

Finalmente, para la reconstrucción tridimensional detallada del puente, se empleó el software Revit. Sobre este modelo BIM, se plasmó información adicional de la estructura, como materiales, patologías y estado de conservación, creando una herramienta integral para su gestión, conservación y mantenimiento.

3.5. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Para la obtención del modelo tridimensional del Puente Mayor de Liérganes se recurrió a la técnica de fotogrametría terrestre, apoyada en observaciones topográficas con estación total. El trabajo de campo requirió varias salidas sucesivas, aunque en la práctica la mayor parte de ellas tuvieron un valor más formativo que productivo, ya que sirvieron principalmente para adquirir experiencia en el procedimiento y familiarizarse con la metodología. Esto se debe a que es imposible colocar las dianas en la posición exacta en la que estuvieron en la anterior salida. Con una planificación adecuada previa en cuanto a posicionamiento de dianas, emplazamiento de la estación total y definición de los ángulos de toma fotográfica, este mismo trabajo podría llevarse a cabo en una única jornada de campo en un futuro levantamiento de otro puente.



Figura 3-5: Medición de posición de diana mediante estación total.

La planificación del trabajo de campo resultó un factor clave para garantizar la precisión del modelo fotogramétrico. La colocación de las dianas de referencia, la elección de los puntos de estacionamiento y la cobertura fotográfica desde ángulos variados aseguraron tanto la correcta georreferenciación como la calidad geométrica del modelo generado.

Otro aspecto relevante fue el carácter del puente como atracción turística, como evidencia la Figura 3-6. Tras la primera salida, se hizo evidente la necesidad de iniciar la campaña de toma de datos a primera hora de la mañana, con el fin de reducir la aparición de turistas en las fotografías y de evitar interferir en su visita. Esta decisión implicó trabajar en condiciones de iluminación no siempre ideales, pero supuso una ventaja decisiva en términos de operatividad y calidad de la documentación gráfica.



Figura 3-6: Trabajo de campo con turistas en el Puente Mayor de Liérganes.

En la Figura 3-7 se muestran fotografías del Puente Mayor de Liérganes tomadas desde diferentes ángulos, empleadas en el levantamiento fotogramétrico.



Figura 3-7: Fotos del Puente Mayor de Liérganes tomadas desde diferentes ángulos.

La Figura 3-8 representa el posicionamiento de las dianas (banderines azules) y las posiciones y ángulos de la cámara (rectángulos azules) estimados por el programa Agisoft Metashape, como se explicará en el Apartado 3.6.



Figura 3-8: Nube de puntos, posición de dianas y posición y dirección de la cámara en el Puente Mayor de Liérganes.

3.6. MODELADO DEL PUENTE

El proceso de modelado paramétrico del Puente Mayor de Liérganes se desarrolló en varias fases consecutivas, desde la generación de la nube de puntos a partir de imágenes fotogramétricas hasta la construcción de un modelo en entorno BIM. La metodología aplicada puede resumirse en tres etapas principales:

1. Generación de la nube de puntos mediante Agisoft Metashape
2. Edición de la nube de puntos mediante Autodesk ReCap
3. Modelado mediante Autodesk Revit

3.6.1. Generación de la nube de puntos mediante Agisoft Metashape

En primer lugar, se procedió a la importación de las imágenes capturadas en campo (Figura 3-9) y de las coordenadas de las dianas de referencia en formato CSV, que se incorporaron al proyecto como “marcadores” (Figura 3-10). Posteriormente, fue necesario posicionar manualmente dichos marcadores en todas las fotografías donde resultaban visibles (Figura 3-11).

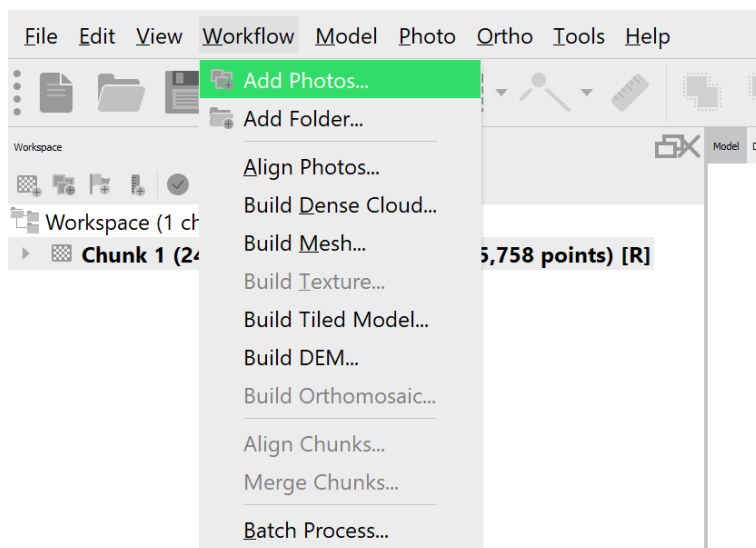


Figura 3-9: Importación de fotos a Metashape.

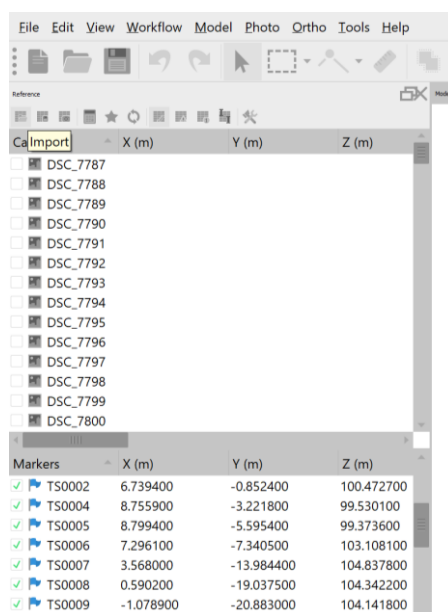


Figura 3-10: Importación de coordenadas a Metashape.



Figura 3-11: Posicionamiento de marcadores en fotografía en Metashape.

A continuación, se llevó a cabo la alineación de las imágenes. Este paso presentó ciertas dificultades, por lo que fue necesario realizar la alineación en grupos de fotografías, evitando así errores de cálculo en el software (Figura 3-12). Tras este proceso, se generó una nube de puntos densa (Figura 3-12), cuyo resultado final puede observarse en la Figura 3-13. Finalmente, la nube de puntos se exportó en formato E57, compatible con software de edición posterior.

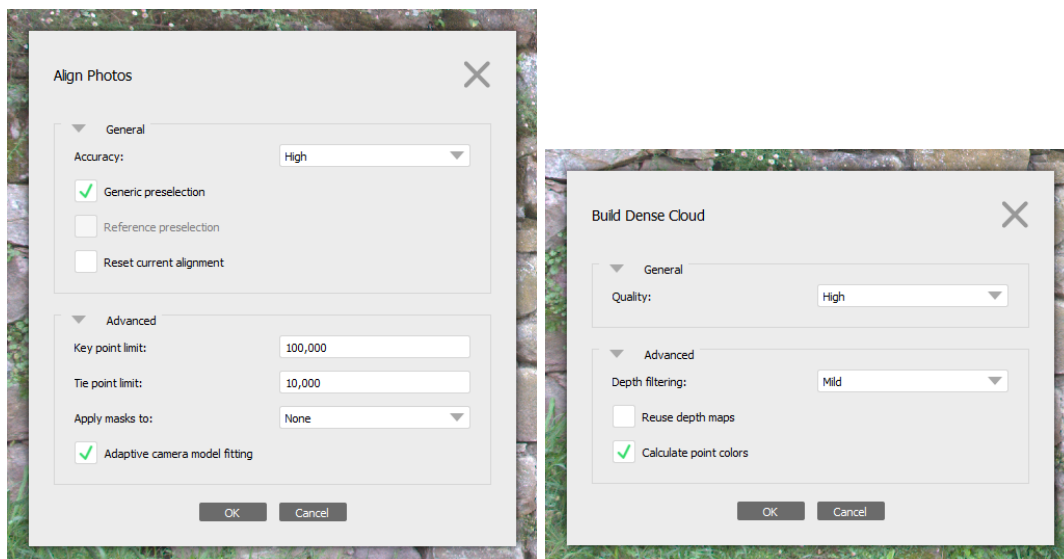


Figura 3-12: Alineamiento de fotografías (izquierda) y creación de nube densa de puntos (derecha) en Metashape.

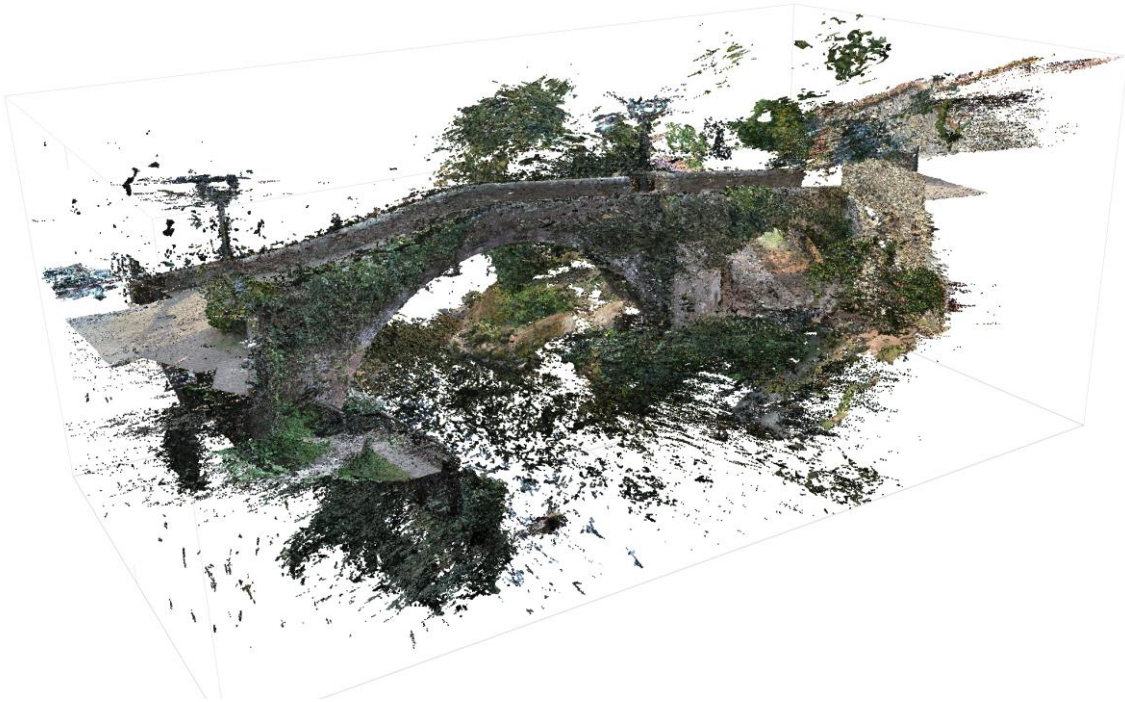


Figura 3-13: Nube densa de puntos del Puente Mayor de Liérganes.

3.6.2. Edición de la nube de puntos mediante Autodesk ReCap

En la segunda fase, se importó la nube de puntos en formato E57 dentro de Autodesk ReCap. Desde este programa se realizó una depuración, eliminando puntos que no eran de interés o que correspondían a errores de proyección. Para facilitar esta selección resultó útil desactivar la opción de perspectiva, lo que permitió un trabajo más preciso en la eliminación de los puntos (Figura 3-14). El resultado de este proceso se puede ver en la Figura 3-15. Tras esta limpieza, la nube se exportó en el formato RCP, nativo de Autodesk, que asegura una correcta integración en Revit.

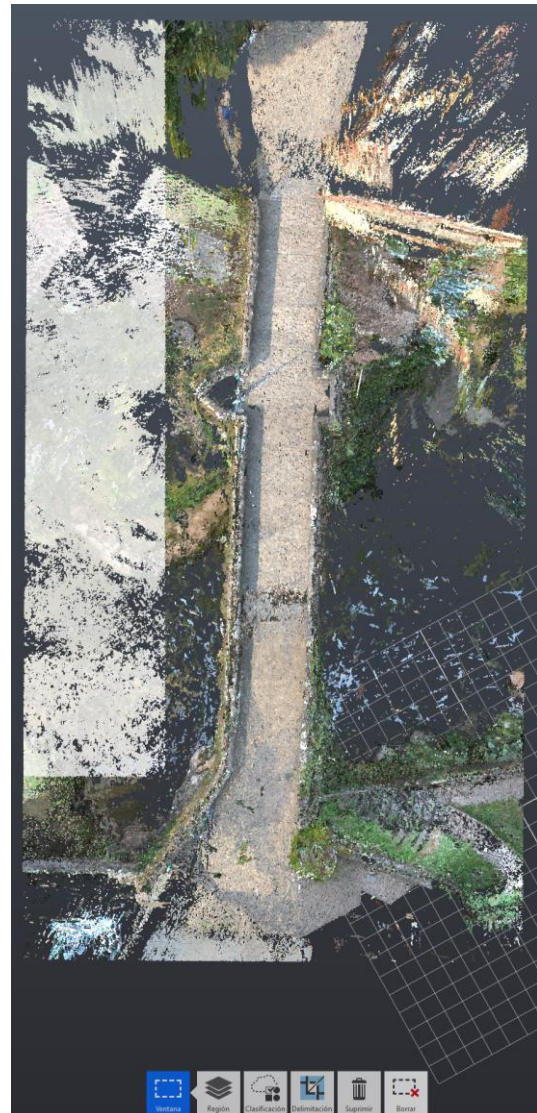


Figura 3-14: Importación de nube de puntos (sup. izq.), desactivación de la opción de perspectiva (inf. izq.) y selección de puntos para su eliminación (derecha) en ReCap.



Figura 3-15: Nube de puntos procesada del Puente Mayor de Liérganes.

3.6.3. Modelado mediante Autodesk Revit

La tercera fase correspondió al modelado paramétrico propiamente dicho. La nube de puntos fue importada en Autodesk Revit como base de referencia para la construcción del modelo. En primer lugar, se definieron y crearon las familias y tipos necesarios para representar con fidelidad la estructura del puente (Figura 3-16). Posteriormente, se procedió a modelar cada elemento estructural, ajustando los objetos paramétricos a la geometría de la nube de puntos (Figura 3-17), obteniéndose como resultado el modelo mostrado en la Figura 3-18.

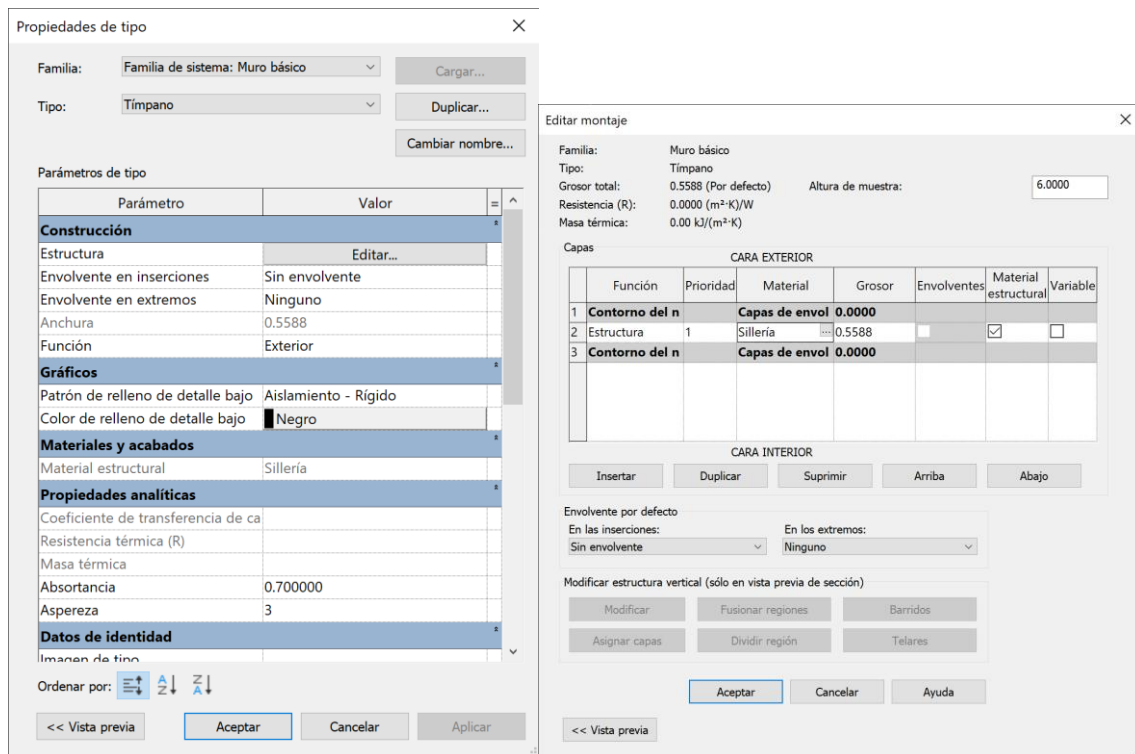


Figura 3-16: Propiedades del tipo "tímpano" hecho a medida para el Puente Mayor de Liérganes.

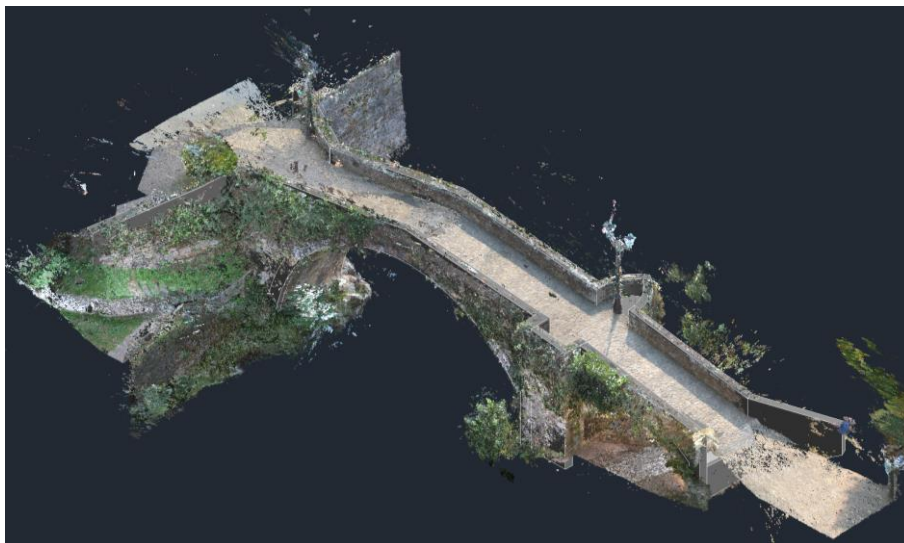


Figura 3-17: Ajuste de los objetos paramétricos a la nube de puntos de Puente Mayor de Liérganes.



Figura 3-18: Modelo tridimensional del Puente Mayor de Liérganes.

Además, se introdujeron en los objetos los parámetros correspondientes a los datos generales de la estructura (Figura 3-19 y Figura 3-20). Con el objetivo de enriquecer el modelo, se incorporó también la información obtenida durante las inspecciones de daños, vinculando cada hallazgo a los elementos afectados mediante parámetros adicionales (Figura 3-21). Cabe señalar que los parámetros de proyecto en Revit no pueden ordenarse manualmente, lo que limita la claridad de la representación de la información.

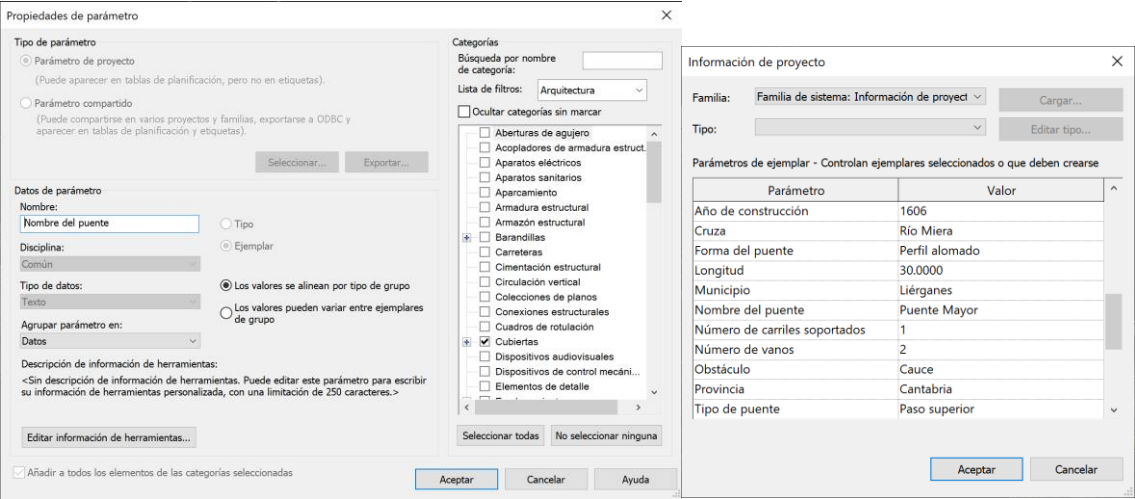


Figura 3-19: Creación (izquierda) y visualización (derecha) de parámetros de datos generales.

Herramientas para la evaluación del estado de conservación de puentes de fábrica

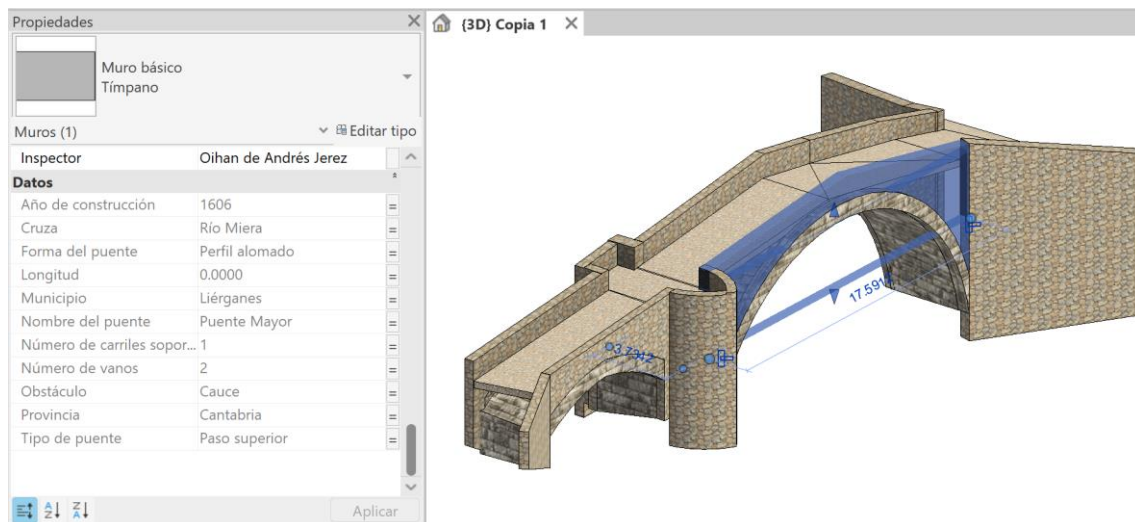


Figura 3-20: Visualización de información paramétrica en el tímpano sur del Puente Mayor de Liérganes.

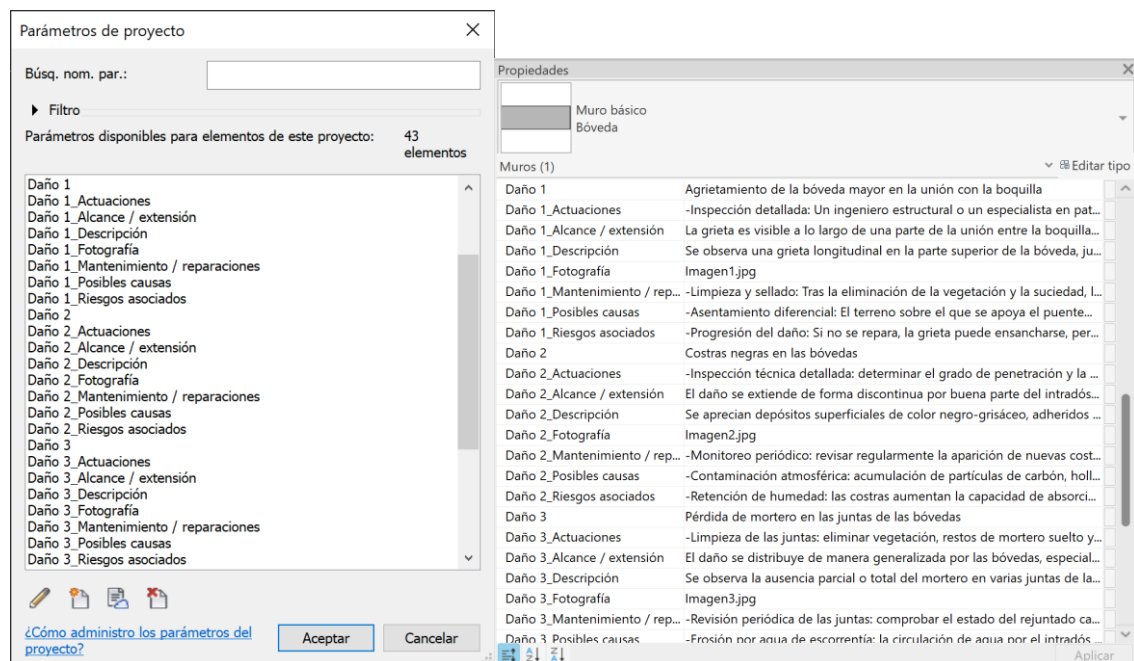


Figura 3-21: Listado de parámetros asociados a inspecciones (izquierda) y ejemplo de su cumplimentación en la bóveda mayor (derecha).

Finalmente, el modelo resultante constituye no solo una representación geométrica del puente, sino una base de datos interdisciplinar sobre la que es posible integrar información adicional en futuras campañas de inspección o en eventuales intervenciones de conservación y restauración.



Figura 3-22: Visualización de parámetros asociados a inspecciones en la bóveda mayor del Puente Mayor de Liérganes.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

El trabajo realizado ha permitido poner en práctica y evaluar la aplicación de herramientas digitales para el levantamiento y modelado del Puente Mayor de Liérganes, con el objetivo de disponer de una metodología eficaz para el análisis del estado de conservación de puentes de fábrica.

En primer lugar, cabe destacar la utilidad de la fotogrametría terrestre como técnica de documentación geométrica. Gracias a la toma de fotografías sistemática y al apoyo de dianas topográficas, se logró generar un levantamiento tridimensional de elevada precisión. No obstante, la experiencia adquirida en el campo puso de manifiesto la importancia de una planificación adecuada: la correcta disposición de dianas, la elección de ángulos de toma de imágenes, la organización del trabajo con la estación total y la determinación del horario de captura resultan aspectos críticos. De hecho, aunque el levantamiento requirió varias salidas, se comprobó que con una preparación más minuciosa habría sido posible completarlo en una única jornada. Otro factor que considerar es la presencia de vegetación en la estructura y su entorno, que dificultó la captura de datos precisos en determinadas zonas, al interferir en la visibilidad de la fábrica y en la definición geométrica de algunos elementos.

En cuanto al flujo de trabajo digital, la combinación de programas resultó eficaz. El uso de Agisoft Metashape permitió generar la nube de puntos, Autodesk ReCap ofreció la posibilidad de depurarla y eliminar información no deseada, y Autodesk Revit posibilitó la construcción del modelo paramétrico. Cada etapa supuso aprendizajes específicos: la alineación de imágenes en Metashape requirió dividir el trabajo en grupos debido a limitaciones del software; la edición en ReCap fue necesaria para obtener un resultado limpio, aunque implicó un esfuerzo manual considerable; y el modelado en Revit confirmó el potencial de las metodologías H-BIM, pero también evidenció limitaciones, como la imposibilidad de ordenar manualmente los parámetros de proyecto.

El modelo paramétrico obtenido constituye un valor añadido respecto a un simple levantamiento geométrico. No solo reproduce fielmente la geometría del puente, sino que también actúa como una base de datos interdisciplinar, en la que es posible incorporar información sobre daños observados, parámetros constructivos y resultados de inspecciones. De este modo, el modelo puede evolucionar hacia un gemelo digital del puente, sobre el cual integrar futuros datos de monitorización o planificar intervenciones de conservación.

Entre las limitaciones encontradas en el proceso se encuentran las dificultades de alineación automática de fotografías en Metashape, la necesidad de un alto grado de edición manual en ReCap, ciertas restricciones en Revit para la gestión de parámetros y, en el caso concreto del levantamiento, la ya mencionada influencia de la vegetación, que reduce la precisión del registro en algunas partes de la estructura. Estos aspectos, lejos de restar valor al trabajo, marcan líneas claras de mejora en futuras experiencias y ponen de relieve la necesidad de un conocimiento técnico avanzado por parte de los equipos que aborden este tipo de metodologías.

El procedimiento desarrollado presenta un elevado grado de aplicabilidad a otros casos. La metodología seguida es replicable y puede adaptarse a otros puentes de fábrica o a elementos patrimoniales de tipologías distintas, favoreciendo su documentación, diagnóstico y conservación. Esta extrapolación convierte la investigación en una herramienta práctica con impacto directo en la gestión del patrimonio construido.

El estudio evidencia también la contribución de estas metodologías a la conservación preventiva. Frente a intervenciones reactivas, disponer de modelos digitales precisos y actualizados permite detectar procesos patológicos en fases iniciales, evaluar su evolución y planificar actuaciones de forma más eficiente, optimizando recursos y reduciendo riesgos para la integridad de la estructura.

Además, el trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030. En relación con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), la investigación promueve el uso de tecnologías innovadoras en la conservación de infraestructuras históricas. Respecto al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), la aplicación de estas técnicas contribuye a proteger el patrimonio cultural y a garantizar su integración en la vida urbana y turística de manera sostenible. Finalmente, vinculado al ODS 13 (Acción por el clima), la conservación preventiva y la mejora del conocimiento estructural aumentan la resiliencia de infraestructuras históricas frente a fenómenos climáticos cada vez más extremos.

Por último, el trabajo abre líneas de investigación futuras. Entre ellas se encuentran la automatización de los procesos *Scan-to-BIM*, el desarrollo de bibliotecas de objetos históricos reutilizables, la integración del modelo con tecnologías emergentes como la realidad aumentada y la realidad virtual, y la conexión con sistemas de monitorización en tiempo real para avanzar hacia verdaderos gemelos digitales. Estas líneas representan un campo de gran potencial para la investigación académica y para la gestión práctica del patrimonio.

En conclusión, el caso de estudio del Puente Mayor de Liérganes ha servido para demostrar la eficacia de un flujo de trabajo digital aplicado a la conservación de puentes de fábrica. A pesar de las limitaciones encontradas, entre ellas la dificultad añadida por la vegetación durante el levantamiento topográfico, el modelo generado se presenta como una herramienta valiosa, capaz de integrar información geométrica, estructural y patológica, y de servir como soporte para futuras inspecciones, intervenciones y estrategias de conservación sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Manterola, J. (2011). *Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción* (Vol. I). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
2. Dantla. (2004). *Roman Alcántara Bridge across the River Tajo, Cáceres Province, Extremadura, Spain*. Wikimedia Commons. Retrieved August 23, 2025, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bridge_Alcantara.JPG
3. Chamoso, R. (2012). *Puente Romano - Ponte Romana, Ourense*. Wikimedia Commons. Retrieved August 23, 2025, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Puente_Romano_-_Ponte_Romana,_Ourense.jpg
4. Richardfab. (2005). *The Ponte Vecchio in Florenz*. Wikimedia Commons. Retrieved August 23, 2025, from <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pontevecchioview.jpg>
5. Richard. (2024). *Pont Neuf in Paris*. Paris Eater. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.pariseater.com/guides/pont-neuf-paris/>
6. Llansades, T. (2009). *The Pont Séjourné - Séjourné Bridge, a railway bridge on the Cerdagne narrow gauge railway line, located near the village of Fontpédrouse*. Wikimedia Commons. Retrieved August 23, 2025, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Viaduc_sejourne_train_jaune_fontpedrouse.jpg
7. Marco Ibáñez, G. de, & Roca Fabregat, P. (2011, November). *Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fabrica construido en laboratorio* (thesis). UPM Commons. Retrieved June 2025, from <http://hdl.handle.net/2099.1/6226>
8. Orfeo, B. (2023, September 21). *On the design and construction of stone masonry bridges: comprehensive review of traditional literature-based techniques and practical applications to current professional projects* (thesis). Archivo Digital UPM. Retrieved June 2025, from <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.76767>
9. Serna, J. (2001). Caracterización experimental del comportamiento hasta rotura de puentes en arco de obra de fábrica. *Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC*.
10. Jar, D. (2024). *Puente de Toledo de Madrid*. La Razón. Retrieved August 23, 2025, from https://www.larazon.es/madrid/puente-toledo-urbanismo-estetica-madrid_20240111659f418867d53e0001e074b4.html
11. Finot, C. (2007). *Pont Valentré, Cahors, Lot, France*. Wikimedia Commons. Retrieved August 23, 2025, from https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cahors_-_Pont_Valentr%C3%A9_03.jpg

12. Martín-Caro Álamo, J. A., & León González, F. J. (2001). *Análisis estructural de Puentes Arco de Fábrica: Criterios de Comprobación* (thesis). Archivo Digital UPM. Retrieved June 2025, from <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.647>
13. Dirección General de Carreteras. (2012). *Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado*. Ministerio de Fomento.
14. *Cracking of brick wall due to buddleja growth*. (2023). Environment Controls. Retrieved August 23, 2023, from <https://environmentcontrols.co.uk/is-buddleia-as-bad-as-knotweed/>
15. Highways England. (2022, October). CS 454: *Assessment of highway bridges and structures* (Version 1.1.0, DMRB Highway Structures & Bridges: Inspection & Assessment).
16. Sánchez-Aparicio, L. J., Bautista-De Castro, Á., Conde, B., Carrasco, P., & Ramos, L. F. (2019). Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges. *Automation in Construction*, 104, 360–382. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.021>
17. Stavroulaki, M. E., Riveiro, B., Drosopoulos, G. A., Solla, M., Koutsianitis, P., & Stavroulakis, G. E. (2016). Modelling and strength evaluation of masonry bridges using terrestrial photogrammetry and finite elements. *Advances in Engineering Software*, 101, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.12.007>
18. Arêde, A., Costa, C., Gomes, A. T., Menezes, J. E., Silva, R., Morais, M., & Gonçalves, R. (2017). Experimental characterization of the mechanical behaviour of components and materials of stone masonry railway bridges. *Construction and Building Materials*, 153, 663–681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.069>
19. Arêde, A., Costa, P., Costa, A., Costa, C. & Noites, L. (2007). Monitoring and testing of a new stone masonry arch bridge in Vila Fria, Portugal. *5th International Conference on Arch Bridges (ARCH'07)*, 323-330.
20. León-Robles, C. A., Reinoso-Gordo, J. F., & González-Quñones, J. J. (2019). Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 121. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030121>
21. Conde, B., Drosopoulos, G. A., Stavroulakis, G. E., Riveiro, B., & Stavroulaki, M. E. (2016). Inverse analysis of masonry arch bridges for damaged condition investigation: Application on Kakodiki Bridge. *Engineering Structures*, 127, 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.060>
22. Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
23. Riveiro, B., Caamaño, J. C., Arias, P., & Sanz, E. (2011). Photogrammetric 3D modelling and mechanical analysis of masonry arches: An approach based on a discontinuous model of voussoirs. *Automation in Construction*, 20(4), 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.008>
24. Pepe, M., & Costantino, D. (2020). UAV photogrammetry and 3D modelling of complex architecture for maintenance purposes: The case study of the masonry bridge on the Sele River, Italy. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/ppci.16398>
25. Kong, X., & Hucks, R. G. (2023). Preserving our heritage: A photogrammetry-based digital twin framework for monitoring deteriorations of historic structures.

- Automation in Construction*, 152, 104928.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104928>
26. Gonizzi Barsanti, S., & Guidi, G. (2017). A geometric processing workflow for transforming reality-based 3D models in volumetric meshes suitable for FEA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3, 331–338. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-2-w3-331-2017>
 27. Trottier, B. (2025). *Schematic diagram of a GPR survey*. United States Environmental Protection Agency. Retrieved August 23, 2025, from <https://www.epa.gov/environmental-geophysics/ground-penetrating-radar-gpr>
 28. Coloma, E. "Introducción a la tecnología BIM". Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Expressió Arquitectònica I (EGA1), 2008. ISBN 978-84-95249-44-9. <https://hdl.handle.net/2117/12226>
 29. Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
 30. Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Rehman, A. U., Tookey, J., & Ghaffarianhoseini, A. (2019). What is Bim? A need for a unique BIM definition. *MATEC Web of Conferences*, 266, 05005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926605005>
 31. Azhar, S., Khalfan, M., & Maqsood, T. (2015). Building Information Modelling (BIM): Now and beyond. *Construction Economics and Building*, 12(4), 15–28. <https://doi.org/10.5130/ajceb.v12i4.3032>
 32. Criminale, A. & Langar, S. (2017). Challenges with BIM Implementation: A Review of Literature. *53rd ASC Annual International Conference Proceedings*.
 33. Bianchini, C., & Nicastro, S. (2018). From BIM to H-BIM. *Intervento Presentato al Convegno 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE) Held Jointly with the 2018 24th International Conference on Virtual Systems & Multimedia (VSMM 2018) Tenutosi a San Francisco; USA*, 520–523. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/11573/1309909>
 34. López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>
 35. Guerra de Oliveira, S., Biancardo, S. A., & Tibaut, A. (2022). Optimizing H-BIM workflow for interventions on historical building elements. *Sustainability*, 14(15), 9703. <https://doi.org/10.3390/su14159703>
 36. Lanzara, E., Scandurra, S., Musella, C., Palomba, D., di Luggo, A., & Asprone, D. (2021). Documentation of structural damage and material decay phenomena in H-BIM Systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1–2021, 375–382. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-m-1-2021-375-2021>
 37. Liérganes. Turismo de Cantabria. (2024, May 29). <https://turismodecantabria.com/disfrutala/cultura/los-pueblos-mas-bonitos-de-cantabria/lierganes-2/>
 38. Gobierno de Cantabria. (2024). *Visualizador de Información Geográfica*. Mapas Cantabria. <https://mapas.cantabria.es/>
 39. Lito. (2010, August 24). *Puente mayor de Liérganes*. La ciudad habla. <https://loqueseveyoye.blogspot.com/2010/08/puente-mayor-de-lierganes.html>

40. Álvarez, S. (2009, May 20). *Puente Mayor de Liérganes (Cantabria)*. Descubriendo Rincones. <https://descubriendorincones.blogspot.com/2009/05/puente-mayor-de-lierganes-cantabria.html>
41. Cuesta, M. (2025, January 24). *Liérganes, el pueblo de Cantabria donde vivió un hombre pez*. Viajes National Geographic. https://viajes.nationalgeographic.com.es/a/pueblo-cantabria-que-tiene-como-hijo-prodigo-hombre-pez_21107
42. Alonso, R. (2025, April 6). *Continúan sin solución las grietas en el Puente Mayor de Liérganes desde la pasada legislatura*. Filtración. <https://www.periodicofiltracion.es/articulo/trasmiera/continuan-solucion-grietas-puente-mayor-lierganes-pasada-legislatura/20250406163800023739.html>
43. *Puente Romano de Liérganes*. Guía Repsol. (2024, December 13). <https://www.guiarepsol.com/es/fichas/monumento/puente-romano-de-lierganes-15124/>
44. Viaja Con Jota. (2025, May 15). *Qué ver en Liérganes, Cantabria: Guía Completa*. https://viajaconjota.com/que-ver-en-lierganes-cantabria/#El_Puente_Mayor_de_Lierganes

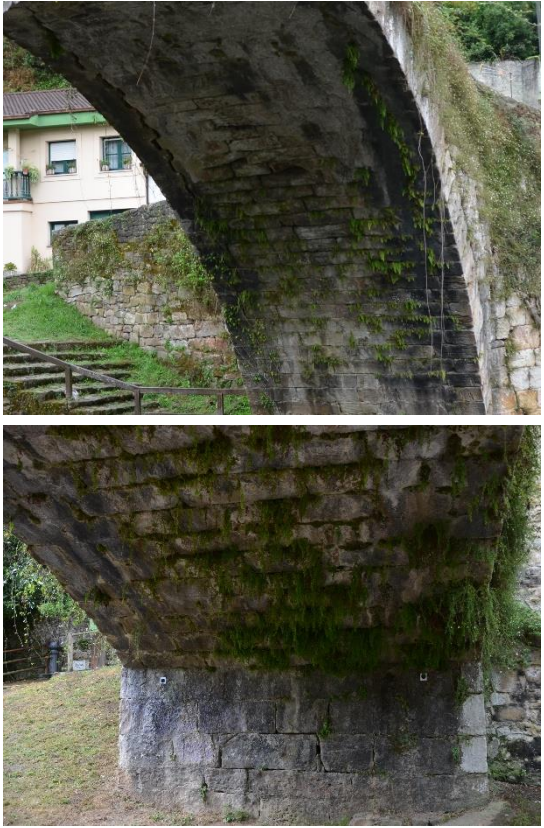
ANEXO 1: FICHAS DE PROCESOS PATOLÓGICOS

Tabla 2: Ficha 1 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 1
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Agrietamiento de la bóveda mayor en la unión con la boquilla		
DESCRIPCIÓN		
Se observa una grieta longitudinal en la parte superior de la bóveda, justo en el punto donde se une con la boquilla. La grieta parece seguir la línea de la junta entre las dovelas y la boquilla. Además, hay vegetación, como musgo y pequeñas plantas, que crecen en las juntas de las piedras.		
POSIBLES CAUSAS		
- Asentamiento diferencial: El terreno sobre el que se apoya el puente puede haberse asentado de manera desigual con el tiempo. Un asentamiento en un extremo podría generar tensiones en la estructura y provocar la grieta. - Empujes de tierras: La presión lateral del terreno que contiene el muro de la boquilla puede ser excesiva, generando una fuerza que empuja la boquilla contra la bóveda y causa la fisura. - Acumulación de aguas en el relleno: La falta de drenaje adecuado en la parte superior del puente o en el relleno detrás de la boquilla puede llevar a que el agua se acumule. El peso del agua saturada de tierra ejerce una presión hidrostática adicional que puede sobrecargar la estructura y causar el agrietamiento. - Envejecimiento del material y fatiga: Con el paso de los años, los materiales de construcción, como la piedra y el mortero, se degradan, pierden resistencia y son más propensos a agrietarse. El mortero puede haberse descompuesto o lavado, permitiendo el movimiento de las dovelas.		

ALCANCE / EXTENSIÓN
La grieta es visible a lo largo de una parte de la unión entre la boquilla y la bóveda. Sin una inspección más detallada, es difícil determinar la profundidad o si se extiende a otras partes de la estructura. Sin embargo, la presencia de vegetación sugiere que la grieta no es superficial y ha existido por un tiempo, permitiendo que las semillas se asienten y crezcan.
RIESGOS ASOCIADOS
- Progresión del daño: Si no se repara, la grieta puede ensancharse, permitiendo una mayor filtración de agua que puede acelerar la degradación. - Pérdida de integridad estructural: Aunque no parece inminente, si la grieta se profundiza y afecta a la distribución de cargas, podría comprometer la estabilidad del puente. - Desprendimiento de material: Las piedras o el mortero alrededor de la grieta podrían soltarse, creando un riesgo para las personas o los objetos que pasen por debajo.
ACTUACIONES
- Inspección detallada: Un ingeniero estructural o un especialista en patrimonio debería realizar una inspección minuciosa para evaluar la profundidad y el alcance real de la grieta. Se pueden usar técnicas como el ultrasonido para verificar el estado interno de la estructura. - Eliminación de la vegetación: Se debe eliminar cuidadosamente toda la vegetación de las juntas para evitar que sus raíces ejerzan presión y ensanchen las grietas. Esto debe hacerse sin dañar la estructura. - Monitoreo: Se recomienda instalar testigos de fisuras para monitorear el movimiento de la grieta a lo largo del tiempo y confirmar si está activa o no.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Limpieza y sellado: Tras la eliminación de la vegetación y la suciedad, la grieta debe limpiarse a fondo y rellenarse con un mortero compatible con el original, preferiblemente de cal hidráulica. - Inyección de mortero: Si la grieta es profunda y existen vacíos internos, se podría considerar la inyección de un mortero fluido para rellenar los huecos y cohesionar las partes internas de la estructura. - Cosido horizontal en los tímpanos: Para reforzar la unión y evitar la apertura de la grieta, especialmente en puentes de sillería o mampostería, se puede realizar un cosido horizontal. Esto implica la inserción de barras de acero inoxidable o fibra de vidrio a través de los tímpanos en una disposición estratégica, anclándolas y sellándolas con mortero. - Limpieza del sistema de drenaje: Es fundamental revisar y limpiar cualquier sistema de drenaje existente en la parte superior del puente y detrás de los tímpanos. Si no hay, se debe considerar la creación de un sistema de drenaje adecuado para evitar la acumulación de agua en el relleno, que es una causa potencial de los daños observados. Esto incluiría la limpieza de imbornales, caños o la instalación de geotextiles y grava para facilitar la evacuación del agua.

Tabla 3: Ficha 2 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	FICHA 2
	FECHA: 24/08/2025
DAÑO	
Costras negras en las bóvedas	
DESCRIPCIÓN Se aprecian depósitos superficiales de color negro-grisáceo, adheridos a las dovelas de las bóvedas. Las costras aparecen en placas irregulares, con mayor densidad en las áreas de mayor humedad y baja ventilación del intradós. En algunos puntos se combinan con manchas verdosas y colonización biológica.	
POSIBLES CAUSAS	
- Contaminación atmosférica: acumulación de partículas de carbón, hollín y polvo ambiental transportado por el aire. - Humedad persistente: la retención de agua en juntas y superficies facilita la fijación y consolidación de los depósitos. - Colonización biológica: presencia de microorganismos, algas y líquenes que contribuyen a oscurecer la superficie y fijar las costras. - Escorrentías de agua: circulación de agua sobre la fábrica que arrastra y deposita partículas, favoreciendo el ennegrecimiento localizado.	
ALCANCE / EXTENSIÓN	
El daño se extiende de forma discontinua por buena parte del intradós de las bóvedas, afectando a múltiples dovelas. Aunque se trata de un fenómeno principalmente superficial, ocupa áreas relativamente amplias, lo que compromete la lectura visual del conjunto.	

RIESGOS ASOCIADOS
- Retención de humedad: las costras aumentan la capacidad de absorción de agua, lo que acelera la degradación del mortero y la piedra. - Encubrimiento de daños: pueden ocultar fisuras finas o microdesprendimientos en la superficie pétreo. - Favorecen el biodeterioro: al crear un microambiente húmedo, facilitan el crecimiento de algas, líquenes y hongos. - Impacto estético y patrimonial: oscurecen la superficie de la fábrica, alterando su aspecto original y reduciendo el valor visual del puente.
ACTUACIONES
- Inspección técnica detallada: determinar el grado de penetración y la naturaleza de los depósitos mediante análisis petrográficos o químicos. - Limpieza controlada: emplear técnicas no invasivas como nebulización de agua, cepillado suave o microproyección de áridos blandos. - Limpieza química puntual: en zonas más resistentes, aplicar productos específicos, siempre ajustando el pH y comprobando compatibilidad con la piedra. - Eliminación de colonización biológica: aplicar biocidas autorizados y controlados en las áreas afectadas.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Monitoreo periódico: revisar regularmente la aparición de nuevas costras o manchas negras. - Control de humedades: mejorar o revisar sistemas de drenaje y escorrentía para evitar el lavado y fijación de contaminantes. - Limpieza programada: repetir periódicamente limpiezas suaves para evitar acumulaciones. - Tratamientos preventivos: aplicar, si procede, recubrimientos hidrofugantes transpirables compatibles con la piedra para reducir la retención de agua y contaminantes.

Tabla 4: Ficha 3 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	FICHA 3
	FECHA: 24/08/2025
DAÑO	
Pérdida de mortero en las juntas de las bóvedas	
DESCRIPCIÓN Se observa la ausencia parcial o total del mortero en varias juntas de las dovelas de las bóvedas. Las juntas abiertas dejan expuestas las aristas de la piedra y permiten la acumulación de agua, polvo y vegetación. El aspecto es de un mortero erosionado, deslavado y con pérdida de cohesión.	
POSIBLES CAUSAS	
- Erosión por agua de escorrentía: la circulación de agua por el intradós y las filtraciones arrastran progresivamente el material de las juntas. - Envejecimiento y desgaste natural: el paso del tiempo reduce la cohesión del mortero, especialmente si no era de cal hidráulica o presentaba mala dosificación. - Acción biológica: la presencia de líquenes, musgos y raíces en las juntas contribuye a disgregar el mortero. - Contaminación y sales: la cristalización de sales solubles y la deposición de contaminantes atmosféricos debilitan el material. - Movimientos diferenciales de la fábrica: pequeños desplazamientos entre dovelas generan microfisuras que aceleran la pérdida de mortero.	
ALCANCE / EXTENSIÓN	
El daño se distribuye de manera generalizada por las bóvedas, especialmente a media altura, afectando a numerosas juntas del intradós. En algunos tramos las juntas están completamente abiertas, mientras que en otros se conserva parte del mortero, aunque degradado.	

RIESGOS ASOCIADOS
- Mayor penetración de agua: las juntas abiertas facilitan la entrada de agua hacia el interior de la bóveda, aumentando el riesgo de filtraciones y eflorescencias. - Colonización biológica: el vacío generado permite el asentamiento de semillas y raíces que amplifican el daño. - Pérdida de cohesión estructural: aunque el sillar aguanta cargas, la ausencia de mortero reduce la trabazón entre dovelas y su resistencia frente a cargas dinámicas o movimientos. - Desprendimientos locales: fragmentos de piedra o mortero residual pueden caer al intradós, suponiendo un riesgo para el tránsito bajo el puente.
ACTUACIONES
- Limpieza de las juntas: eliminar vegetación, restos de mortero suelto y depósitos acumulados. - Rejuntado con mortero compatible: aplicar un mortero de cal hidráulica natural similar al original, con características físico-químicas compatibles con la piedra. - Consolidación preventiva: en zonas con pérdida avanzada, inyectar lechadas de cal para mejorar la cohesión de la fábrica. - Control de humedades: revisar drenajes y escorrentías para evitar que el agua siga erosionando las juntas.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Revisión periódica de las juntas: comprobar el estado del rejuntado cada pocos años. - Reposición puntual de mortero: realizar pequeñas reparaciones de mantenimiento cuando aparezcan nuevas pérdidas, evitando así intervenciones mayores. - Eliminación de vegetación recurrente: evitar que las raíces vuelvan a crecer en las juntas abiertas. - Control de humedad y sales: programar limpiezas y mantenimientos para reducir los procesos de disolución y cristalización en el interior de la fábrica.

Tabla 5: Ficha 4 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	FICHA 4
	FECHA: 24/08/2025
DAÑO	
Vegetación incipiente en las juntas de las bóvedas	
DESCRIPCIÓN En diversas juntas de las bóvedas se observa la presencia de vegetación de pequeño porte, principalmente musgos, líquenes y hierbas herbáceas. Las plantas se desarrollan en las fisuras y juntas abiertas donde ha desaparecido el mortero, aprovechando la acumulación de humedad y partículas de suelo.	
POSIBLES CAUSAS	
- Apertura de juntas: la pérdida de mortero crea huecos que facilitan la acumulación de agua, polvo y semillas. - Condiciones de humedad constante: la retención de agua en el intradós y la falta de ventilación favorecen la germinación. - Depósitos de partículas y polvo atmosférico: proporcionan nutrientes mínimos para el crecimiento vegetal. - Inexistencia de mantenimiento periódico: ausencia de eliminación sistemática de vegetación en la fábrica.	
ALCANCE / EXTENSIÓN	
El crecimiento vegetal se distribuye de forma dispersa en varias juntas de las bóvedas. Aunque se trata principalmente de vegetación incipiente, la extensión es significativa en determinados tramos con juntas abiertas.	

RIESGOS ASOCIADOS
- Acción mecánica de las raíces: al crecer, las raíces ejercen presión sobre las juntas y fisuras, provocando su apertura y pérdida de material. - Retención de humedad: la vegetación mantiene el agua en contacto con la fábrica, favoreciendo procesos de disgregación del mortero y biodeterioro. - Atracción de fauna: la vegetación puede atraer insectos o aves que incrementen la degradación. - Impacto estético y patrimonial: altera la apariencia del puente y transmite una imagen de abandono.
ACTUACIONES
- Eliminación manual controlada: retirar la vegetación de forma cuidadosa para no dañar las piedras ni ampliar las juntas. - Aplicación localizada de biocidas autorizados: en casos de colonización persistente, utilizar productos específicos compatibles con bienes patrimoniales. - Rejuntado posterior: una vez eliminada la vegetación, rellenar las juntas abiertas con mortero compatible para evitar nueva colonización. - Mejora de las condiciones de drenaje: reducir la humedad que favorece el crecimiento.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Inspección periódica: revisar las bóvedas en campañas de mantenimiento preventivo para detectar brotes tempranos. - Eliminación recurrente de plantas: programar limpiezas manuales cada cierto tiempo para evitar que la vegetación vuelva a asentarse. - Control ambiental: procurar una correcta evacuación de aguas para evitar condiciones de humedad que permitan el rebrote. - Mantenimiento de juntas: garantizar que los rejuntados permanezcan sellados y en buen estado, minimizando la posibilidad de colonización vegetal.

Tabla 6: Ficha 5 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 5
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Eflorescencias salinas en la bóveda menor		
DESCRIPCIÓN		
Se observan manchas blanquecinas de aspecto pulverulento en la superficie de algunas dovelas de la bóveda menor. En ciertos puntos las eflorescencias aparecen de forma superficial y extendida, mientras que en otras zonas se presentan en forma de pequeños puntos blancos aislados. Los depósitos son poco cohesionados y se desprenden fácilmente al roce, localizándose sobre todo en áreas con mayor humedad.		
POSIBLES CAUSAS		
- Migración de sales solubles: el agua de lluvia o filtraciones arrastra sales disueltas desde el interior de la fábrica hasta la superficie, donde cristalizan al evaporarse. - Humedad persistente: la presencia de agua en las juntas y en la piedra favorece el transporte de sales hacia la superficie. - Uso de materiales incompatibles en reparaciones anteriores: ciertos morteros o cementos pueden aportar sales adicionales a la fábrica. - Condiciones ambientales variables: alternancia de humedad y sequedad que propicia ciclos de disolución y recristalización.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El fenómeno se aprecia en áreas concretas de la bóveda menor, afectando a varias dovelas de manera localizada. Aunque no es generalizado, indica la existencia de circulación de agua y sales en la fábrica.		
RIESGOS ASOCIADOS		
- Disgregación superficial de la piedra: la cristalización repetida de sales dentro de los poros puede fragmentar la matriz pétreo. - Desprendimiento del mortero: debilita las juntas al provocar su desintegración progresiva. - Evidencia de humedades internas: señala la existencia de filtraciones o falta de estanqueidad en la bóveda. - Pérdida estética: las manchas blancas alteran la uniformidad cromática del puente.		

ACTUACIONES
- Eliminación controlada de eflorescencias: limpieza mecánica suave (cepillado con brocha de cerdas blandas) o lavado con agua destilada en nebulización. - Identificación de las sales: análisis de laboratorio para determinar la naturaleza de las sales (sulfatos, cloruros, nitratos) y orientar la intervención. - Corrección de fuentes de humedad: revisar drenajes, juntas abiertas y posibles filtraciones. - Uso de morteros compatibles: en rejuntados o reparaciones, aplicar morteros de cal sin aportes de sales.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Revisión periódica de la bóveda: comprobar la reaparición de eflorescencias como indicador de humedades persistentes. - Control de humedades: mantener un sistema adecuado de evacuación de agua en la estructura. - Limpiezas periódicas: eliminar depósitos antes de que penetren y dañen la fábrica. - Seguimiento con ensayos no destructivos: valorar la evolución de la humedad interna y la migración de sales.

Tabla 7: Ficha 6 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 6
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Eflorescencias salinas en las boquillas		
DESCRIPCIÓN		
Se aprecian depósitos blanquecinos de aspecto pulverulento sobre la superficie de la sillería de las boquillas. En algunas áreas las eflorescencias forman acumulaciones más visibles y densas, mientras que en el resto de la superficie se observan de manera puntual y dispersa en casi la totalidad de las boquillas. Los depósitos son poco cohesionados y se desprenden con facilidad al roce.		
POSIBLES CAUSAS		
- Filtraciones de agua desde la plataforma o el relleno superior: el agua disuelve sales en el interior de la fábrica y las transporta hacia la superficie. - Humedad ambiental y escorrentías superficiales: favorecen la migración y cristalización de sales. - Condiciones climáticas variables: la alternancia de humedad y secado acelera los ciclos de disolución y recristalización. - Aportes de materiales incompatibles en reparaciones anteriores: morteros con presencia de sales que migran a la superficie.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El fenómeno está presente de forma casi generalizada en las boquillas, con zonas de acumulación más pronunciada y áreas de eflorescencias puntuales repartidas en la mayor parte de la superficie pétreo.		
RIESGOS ASOCIADOS		
- Degradación de la piedra: la cristalización interna de sales produce microfisuras y pérdida de material. - Evidencia de humedad persistente: la presencia extendida de eflorescencias indica filtraciones o retención de agua en la estructura. - Impacto estético: las manchas blancas afectan a la homogeneidad cromática y a la percepción patrimonial del puente.		

ACTUACIONES
- Limpieza superficial no invasiva: cepillado suave en seco o lavado mediante nebulización de agua destilada para eliminar los depósitos. - Análisis de laboratorio: determinar la naturaleza de las sales (sulfatos, cloruros, nitratos) para orientar el tratamiento. - Control de humedades: revisar y mejorar drenajes y evacuación de agua en la coronación para limitar el aporte de humedad. - Empleo de morteros compatibles: en futuras reparaciones, utilizar morteros de cal sin presencia de sales solubles.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Revisión periódica: comprobar la reaparición de eflorescencias como indicador de humedades activas. - Limpiezas recurrentes: eliminar los depósitos antes de que provoquen daños mayores en la fábrica. - Monitoreo de humedad: aplicar técnicas de seguimiento (termografía, medición de humedad) para localizar focos de filtración. - Mantenimiento del drenaje: asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de evacuación de agua para prevenir nuevas migraciones de sales.

Tabla 8: Ficha 7 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 7
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Erosión diferencial y disgregación superficial en la pila		
DESCRIPCIÓN		
En varios sillares de la pila se aprecia una pérdida de material superficial con textura irregular, en forma de ondulaciones o láminas superpuestas. La piedra muestra un desgaste más acusado en ciertas vetas o capas, lo que genera un relieve desigual. En la parte más próxima al agua, la superficie aparece más redondeada y rugosa, evidenciando un proceso activo de disgregación.		
POSIBLES CAUSAS		
- Acción hidráulica: la corriente del río, junto con partículas en suspensión (arenas, limos), provoca abrasión mecánica sobre la piedra. - Disolución química diferencial: el agua favorece la disolución de los minerales más solubles o menos cohesionados de la roca, dejando un patrón irregular. - Ciclos de humedad-sequedad: la alternancia de fases de saturación y secado genera tensiones internas y pérdida de cohesión. - Heterogeneidad del material pétreo: variaciones naturales en la composición de la piedra hacen que algunas capas se degraden antes que otras.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El daño se concentra en los sillares de la pila en contacto directo con el cauce, especialmente en la zona de impacto del agua. La afectación es superficial, pero relativamente extendida en la base de la pila y en los bloques más expuestos.		
RIESGOS ASOCIADOS		
- Pérdida progresiva de material: la erosión superficial puede evolucionar hacia desprendimientos de fragmentos mayores. - Reducción de la sección resistente: a largo plazo, el debilitamiento de la superficie puede comprometer la capacidad de los sillares. - Alteración estética y patrimonial: el aspecto rugoso y disgregado afecta la percepción visual del puente.		

ACTUACIONES
- Documentación y cartografía del daño: levantar un registro fotográfico y gráfico del estado actual para su seguimiento. - Limpieza superficial controlada: eliminar depósitos biológicos o materiales sueltos para evaluar la piedra sana. - Consolidación localizada: aplicar consolidantes compatibles que refuercen la cohesión del material en zonas degradadas. - Protección frente a la acción hidráulica: estudiar soluciones de protección puntual en la base de la pila (p. ej. escollera de disipación), evitando intervenciones agresivas.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Monitoreo periódico: inspeccionar el estado de los sillares expuestos al agua en campañas anuales. - Eliminación de colonización biológica: evitar que líquenes o algas contribuyan a la alteración química. - Control del cauce: vigilar la socavación y la velocidad de la corriente en épocas de crecida para prever daños mayores. - Reaplicación de consolidantes: en caso necesario, repetir tratamientos cada cierto tiempo para asegurar la estabilidad de la piedra.

Tabla 9: Ficha 8 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	FICHA 8
	FECHA: 24/08/2025
DAÑO	
Grieta vertical en la parte superior de la pila	
DESCRIPCIÓN	
En la zona superior de la pila se observa una fisura vertical continua que atraviesa varios sillares. La grieta es visible a simple vista, con apertura apreciable y recorrido descendente desde la coronación hacia la mitad superior de la pila. En algunos puntos se combina con vegetación que crece en las juntas, lo que indica que el daño no es reciente.	
POSIBLES CAUSAS	
- Asentamiento diferencial: movimientos desiguales en la cimentación de la pila podrían haber provocado tensiones verticales. - Empujes horizontales de las bóvedas: las cargas transmitidas por los arcos pueden concentrarse en el centro de la pila, favoreciendo la aparición de fisuras. - Acción del agua y pérdida de mortero en juntas: la penetración de humedad en la fábrica facilita la apertura de grietas al debilitar las uniones entre sillares. - Movimientos térmicos y fatiga del material: las dilataciones y contracciones, junto con el envejecimiento de la piedra, pueden haber contribuido al desarrollo de la fisura.	
ALCANCE / EXTENSIÓN	
La grieta afecta a la parte superior de la pila, visible a lo largo de varios sillares en sentido vertical. Aunque no alcanza aparentemente toda la altura de la pila, sí se concentra en la zona más cercana a la coronación, donde se unen los tímpanos con la pila.	

RIESGOS ASOCIADOS
- Filtraciones de agua: la grieta permite la entrada de humedad, lo que agrava procesos de degradación interna. - Pérdida de estabilidad local: si la fisura progresa, puede comprometer la trabazón entre sillares en la zona superior de la pila. - Progresión del daño: riesgo de que la grieta aumente en apertura o longitud, especialmente en condiciones de sobrecarga (crecidas, vibraciones). - Aparición de vegetación: las raíces pueden ensanchar la fisura, aumentando el deterioro.
ACTUACIONES
- Inspección detallada: análisis estructural mediante levantamiento gráfico, técnicas no destructivas (ultrasonidos, endoscopia) y monitorización para conocer la profundidad y actividad de la fisura. - Eliminación de vegetación: retirar cuidadosamente plantas y raíces presentes en la zona de la grieta. - Sellado o cosido de la grieta: en función de su profundidad, considerar la inyección de mortero de cal compatible o un cosido puntual con varillas de acero inoxidable o fibra de vidrio. - Control de humedades: mejorar el drenaje en la coronación para reducir el aporte de agua en la zona.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Monitoreo: comprobar si la grieta sigue activa o es un daño estabilizado. - Reparación periódica de juntas adyacentes: rejuntar con morteros de cal para reforzar la cohesión de la fábrica. - Revisiones posts-crecidas: tras episodios de caudal elevado del río, verificar la evolución de la fisura. - Mantenimiento del drenaje superior: asegurar la correcta evacuación de aguas en la coronación de la pila para evitar nuevas filtraciones.

Tabla 10: Ficha 9 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 9
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Vegetación abundante en los tímpanos y muros de estribo		
DESCRIPCIÓN		
Se observa una proliferación significativa de vegetación en los tímpanos y muros de estribo del puente. El crecimiento es más intenso en la parte superior de los paños de fábrica y en la línea de contacto entre tímpano y boquillas, aunque también aparece de forma dispersa a lo largo de los estribos. La vegetación incluye hierbas, musgos, pequeños arbustos y plantas trepadoras. La mayor densidad en la zona superior se relaciona con el empleo de piedra de menor calidad geométrica, con bloques más irregulares y juntas más abiertas, que favorecen la acumulación de sedimentos y la colonización vegetal.		
POSIBLES CAUSAS		
- Piedra de peor calidad en coronación: la irregularidad geométrica incrementa la permeabilidad y la presencia de huecos. - Retención de agua y humedad: facilita la germinación de semillas en la parte alta de los paramentos. - Pérdida de mortero y apertura de juntas: genera huecos donde las raíces pueden desarrollarse. - Acumulación de sedimentos y polvo atmosférico: actúan como sustrato para el crecimiento vegetal. - Escaso mantenimiento: ausencia de limpiezas periódicas que frenen la colonización biológica. - Exposición directa al entorno natural: los estribos, en contacto con terreno y vegetación circundante, son más propensos a recibir semillas.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El daño está presente de forma generalizada en la coronación de los tímpanos, donde la piedra más irregular y las juntas abiertas favorecen la aparición de vegetación. También se observa en los muros de estribo, con brotes dispersos pero frecuentes en casi toda su altura.		

RIESGOS ASOCIADOS
- Acción mecánica de raíces: la vegetación ensancha juntas y fisuras, disgregando el mortero y desplazando pequeños bloques. - Retención de humedad: las plantas mantienen el contacto húmedo con la fábrica, favoreciendo biodeterioro y eflorescencias. - Desprendimientos locales: raíces profundas pueden provocar la caída de fragmentos de mortero o piedra. - Degradación estética y patrimonial: altera la lectura arquitectónica del puente y transmite sensación de abandono. - Riesgo de progresión del daño: sin intervención, la vegetación puede arraigar más profundamente y multiplicar su efecto destructivo.
ACTUACIONES
- Eliminación manual de vegetación: arrancado cuidadoso de hierbas y arbustos evitando daños a la fábrica. - Tratamiento localizado con biocidas: en raíces persistentes o rebrote continuado, siempre con productos compatibles con patrimonio histórico. - Rejuntado de juntas abiertas: sellado con mortero de cal compatible para impedir recolonización. - Mejora de drenajes en coronación: reducir la acumulación de agua en la parte superior de tímpanos y estribos. - Gestión de la vegetación circundante: podas o limpieza del entorno inmediato para reducir la llegada de semillas.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Inspecciones periódicas: revisión visual de tímpanos y estribos para detectar aparición de brotes. - Limpieza recurrente: eliminación temprana de plantas antes de que desarrollen raíces profundas. - Mantenimiento de juntas: conservar los rejuntados en buen estado para evitar huecos colonizables. - Control ambiental del entorno: minimizar aportes de humedad y sedimentos que actúan como sustrato.

Tabla 11: Ficha 10 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 10
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Fisura vertical inclinada en el estribo sur de la bóveda mayor		
DESCRIPCIÓN		
En el estribo sur de la bóveda mayor se aprecia una fisura vertical con ligera inclinación que recorre varios sillares. La fisura es visible a simple vista, con una apertura perceptible y continuidad suficiente como para afectar al contacto entre el arco y el estribo. Por su disposición, podría indicar un inicio de separación o desplazamiento entre el arco y el estribo. La vegetación presente en la zona superior dificulta una visión completa del daño, pero sugiere que la fisura lleva tiempo activa.		
POSIBLES CAUSAS		
- Asentamiento diferencial del estribo: movimientos en la cimentación pueden generar tensiones y abrir la fisura en la zona de encuentro. - Empuje horizontal del arco: la transmisión de cargas hacia el estribo puede inducir un desplazamiento progresivo que abra la junta. - Falta de trabazón entre arco y estribo: una ejecución original con contacto deficiente entre ambas fábricas puede favorecer la separación con el tiempo. - Erosión y pérdida de material en la base: el arrastre de partículas por acción del agua debilita el asiento del estribo. - Humedad y vegetación: la penetración de agua y raíces en la grieta aumenta la apertura y la degradación de la fábrica.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
La fisura recorre parte importante del paño del estribo sur, desde el arranque del arco hacia la parte media-superior. Aunque no parece atravesar toda la sección, su orientación y localización la convierten en un daño estructural significativo.		
RIESGOS ASOCIADOS		
- Progresión de la separación arco-estribo: riesgo de pérdida de contacto entre ambas estructuras, con disminución de la estabilidad global. - Entrada de agua: facilita filtraciones que agravan la degradación del mortero y los sillares. - Compromiso de la seguridad estructural: si el movimiento es activo, podría comprometer la capacidad del arco de transmitir cargas al estribo. - Desprendimiento de piezas: a medio plazo, podrían soltarse sillares afectados por la falta de trabazón.		

ACTUACIONES
- Inspección estructural detallada: análisis técnico con levantamiento de fisuras y ensayos no destructivos (endoscopia, ultrasonidos) para conocer profundidad y evolución. - Monitoreo de la fisura: instalación de fisurómetros o sistemas electrónicos para controlar la apertura y actividad del movimiento. - Eliminación de vegetación asociada: retirar plantas que puedan incrementar la apertura con sus raíces. - Rejuntado e inyección de mortero compatible: en caso de fisura estabilizada, sellar y consolidar con lechada de cal hidráulica natural. - Cosido estructural localizado: si se detecta desplazamiento, considerar la inserción de varillas de acero inoxidable o fibra de vidrio para recuperar la trabazón.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Seguimiento periódico: revisar la evolución de la fisura tras crecidas o cargas excepcionales. - Revisión del sistema de drenaje superior: asegurar que no haya acumulación de agua en coronación que pueda alimentar la fisura. - Mantenimiento preventivo de juntas: mantener selladas y rejuntadas las fábricas adyacentes para evitar progresión del daño. - Informe técnico actualizado: en caso de progresión, plantear un refuerzo estructural mayor (inyecciones masivas, cosido global o incluso consolidación del estribo).

Tabla 12: Ficha 11 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 11
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Desagregación o desintegración granular en el tímpano y muro de estribo		
DESCRIPCIÓN		
En la superficie del tímpano y en el muro de estribo se aprecia una pérdida progresiva de cohesión entre los granos minerales de la piedra, generando un aspecto arenoso y cavidades superficiales. Este proceso no afecta a los sillares de mayor calidad, que mantienen su integridad, sino principalmente a las zonas de mampostería, donde el material es más heterogéneo y de menor compacidad. Como consecuencia de la desagregación, los componentes pétreos presentan un aspecto redondeado, con aristas suavizadas y pérdida de su geometría original.		
POSIBLES CAUSAS		
- Alteración físico-química de la piedra: meteorización natural de rocas menos compactas debido a ciclos de humedad-sequedad y cambios térmicos. - Acción del agua: filtraciones, escorrentías y ascenso capilar que debilitan los enlaces internos. - Presencia de sales solubles: cristalización repetida dentro de los poros que fragmenta el material. - Colonización biológica: líquenes, musgos y raíces que aceleran la disgregación superficial. - Calidad desigual de la fábrica: empleo de mampostería de menor calidad frente a sillares bien tallados y resistentes.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El daño se concentra en áreas de mampostería del tímpano y del muro de estribo, mientras que los sillares de mayor calidad apenas presentan signos de alteración. La extensión es visible en zonas medias e inferiores del paramento, con efectos suficientemente repetidos como para ser significativos.		

RIESGOS ASOCIADOS
- Pérdida progresiva de material: erosión superficial de los mampuestos, que puede desembocar en desprendimientos. - Aumento de la permeabilidad: la superficie degradada permite mayor entrada de agua y contaminantes. - Facilitación de vegetación: las cavidades y rugosidad generadas sirven de sustrato para nuevas colonizaciones. - Impacto estético y patrimonial: el aspecto redondeado y erosionado altera la lectura constructiva del puente.
ACTUACIONES
- Limpieza superficial controlada: retirada de restos sueltos y colonización biológica. - Aplicación localizada de consolidantes: reforzar la cohesión de la mampostería degradada con productos compatibles. - Corrección de humedades: reducir aportes de agua mediante mejora de drenajes y control de escorrentías. - Protección superficial: posible uso de hidrofugantes transpirables en zonas degradadas, siempre compatibles con la piedra y el valor patrimonial.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Monitoreo periódico: inspeccionar la evolución del proceso en campañas regulares. - Reaplicación de consolidantes: programar nuevas aplicaciones en función del desgaste. - Control de vegetación: eliminar brotes que se asienten en las superficies disgregadas. - Gestión ambiental del entorno: mantener despejadas y drenadas las inmediaciones del estribo para evitar humedad permanente.

Tabla 13: Ficha 12 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 12
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Crecimiento de un árbol en la plataforma, en la zona del estribo		
DESCRIPCIÓN		
En la plataforma del puente, en la zona del estribo, se observa el crecimiento de un árbol de porte considerable. Su ubicación en la propia fábrica constituye un riesgo, ya que las raíces se extienden bajo el pavimento de piedra y pueden penetrar en las juntas de los muros del estribo. A simple vista, el árbol ya presenta un tamaño suficiente para que el sistema radicular esté ejerciendo presión sobre la estructura.		
POSIBLES CAUSAS		
- Ausencia de mantenimiento preventivo: no se ha eliminado la vegetación cuando aún era incipiente. - Acumulación de suelo y sedimentos en la plataforma: permitió la germinación y crecimiento del árbol. - Condiciones favorables de humedad y nutrientes: el entorno cercano al cauce ofrece las condiciones adecuadas para el desarrollo del árbol.		
ALCANCE / EXTENSIÓN		
El daño se limita a un punto concreto de la plataforma, pero con repercusiones potencialmente graves en el estribo asociado y el entorno inmediato. La extensión subterránea de las raíces no es visible, pero es previsible que alcance tanto el muro del estribo como el pavimento de la plataforma.		
RIESGOS ASOCIADOS		
- Acción mecánica de las raíces: desplazamiento de sillares, apertura de juntas y fisuración de la fábrica del estribo. - Incremento de la humedad: las raíces retienen agua en contacto con la fábrica, favoreciendo procesos de alteración. - Pérdida de estabilidad local: riesgo de que, con el crecimiento del árbol, se debilite el contacto entre los elementos de la estructura. - Riesgo de desprendimientos: en caso de caída del árbol por viento o tormentas, puede arrancar parte del pavimento o de la fábrica adyacente. - Impacto patrimonial y estético: la presencia de un árbol en la plataforma transmite falta de conservación y altera la imagen del puente.		

ACTUACIONES
- Retirada controlada del árbol: eliminación cuidadosa, preferiblemente en fases, para evitar daños repentinos por la extracción de raíces. - Tratamiento de raíces residuales: aplicar técnicas que impidan el rebrote sin dañar la fábrica. - Reparación de juntas o sillares afectados: rejuntado con mortero compatible o reposición puntual de piezas si fuera necesario. - Revisión del pavimento de la plataforma: sustituir o recolocar piedras desplazadas por la acción radicular.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Control de vegetación en plataforma y coronación: eliminar de forma periódica plantas y arbustos antes de que alcancen tamaño arbóreo. - Inspecciones regulares: comprobar la presencia de nuevas raíces o rebrote en la zona del estribo. - Reposición puntual de pavimento y juntas: mantener selladas las juntas para impedir la recolonización vegetal. - Gestión preventiva: establecer un plan de control de vegetación en todo el puente para evitar el desarrollo de árboles en zonas críticas.

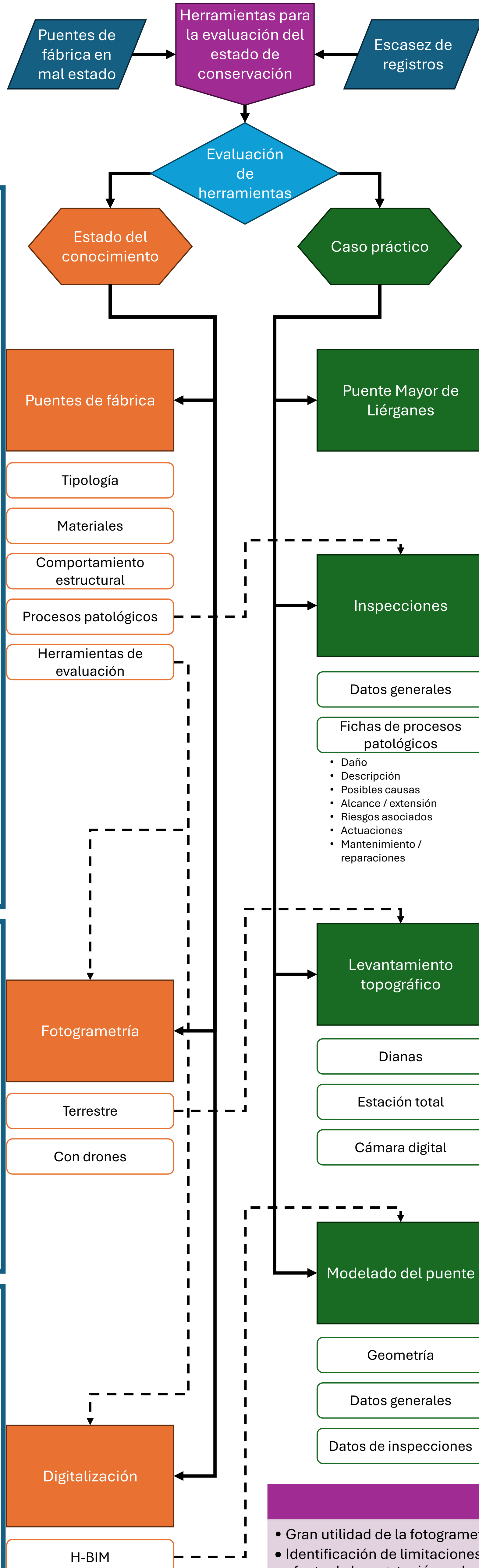
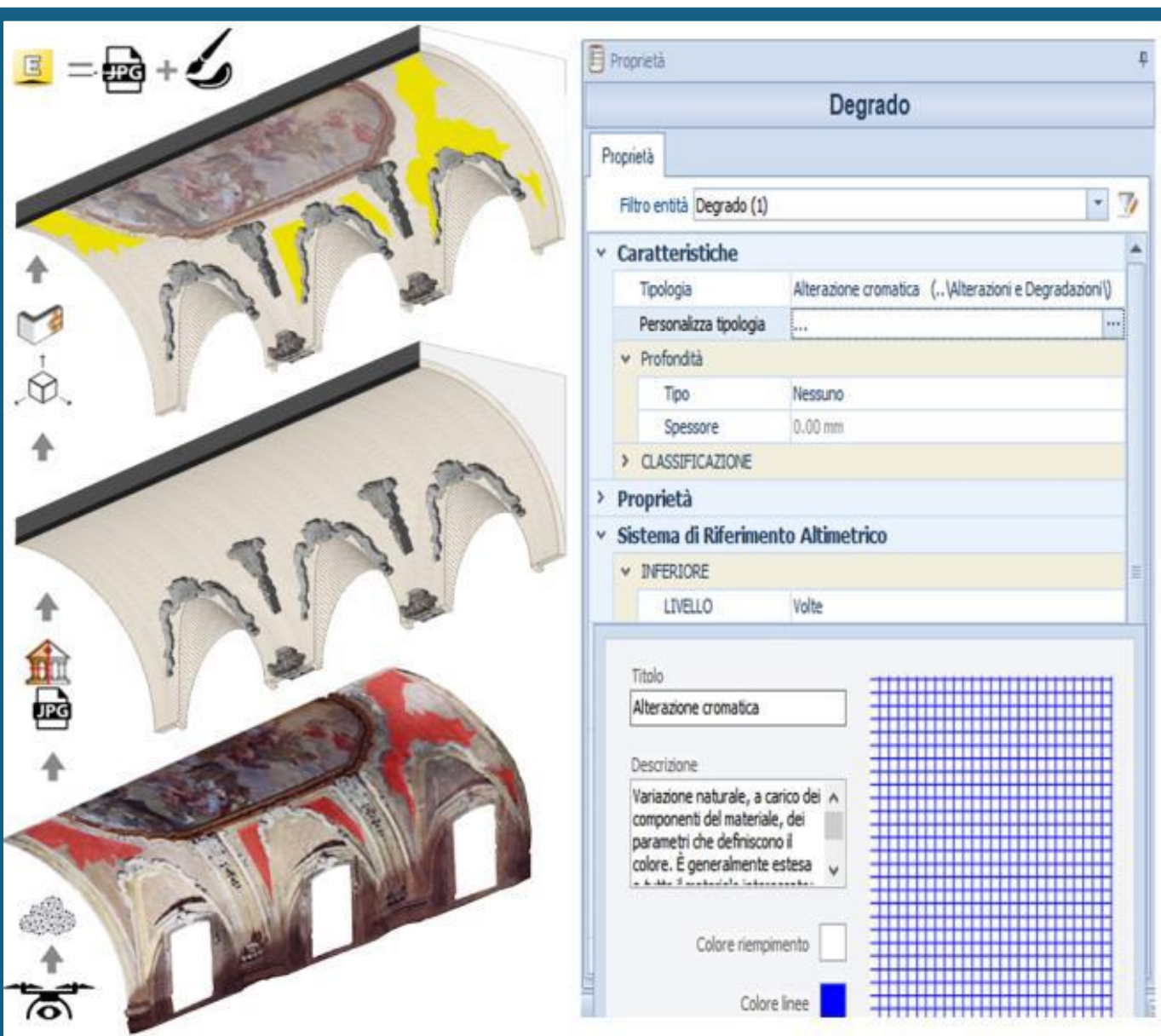
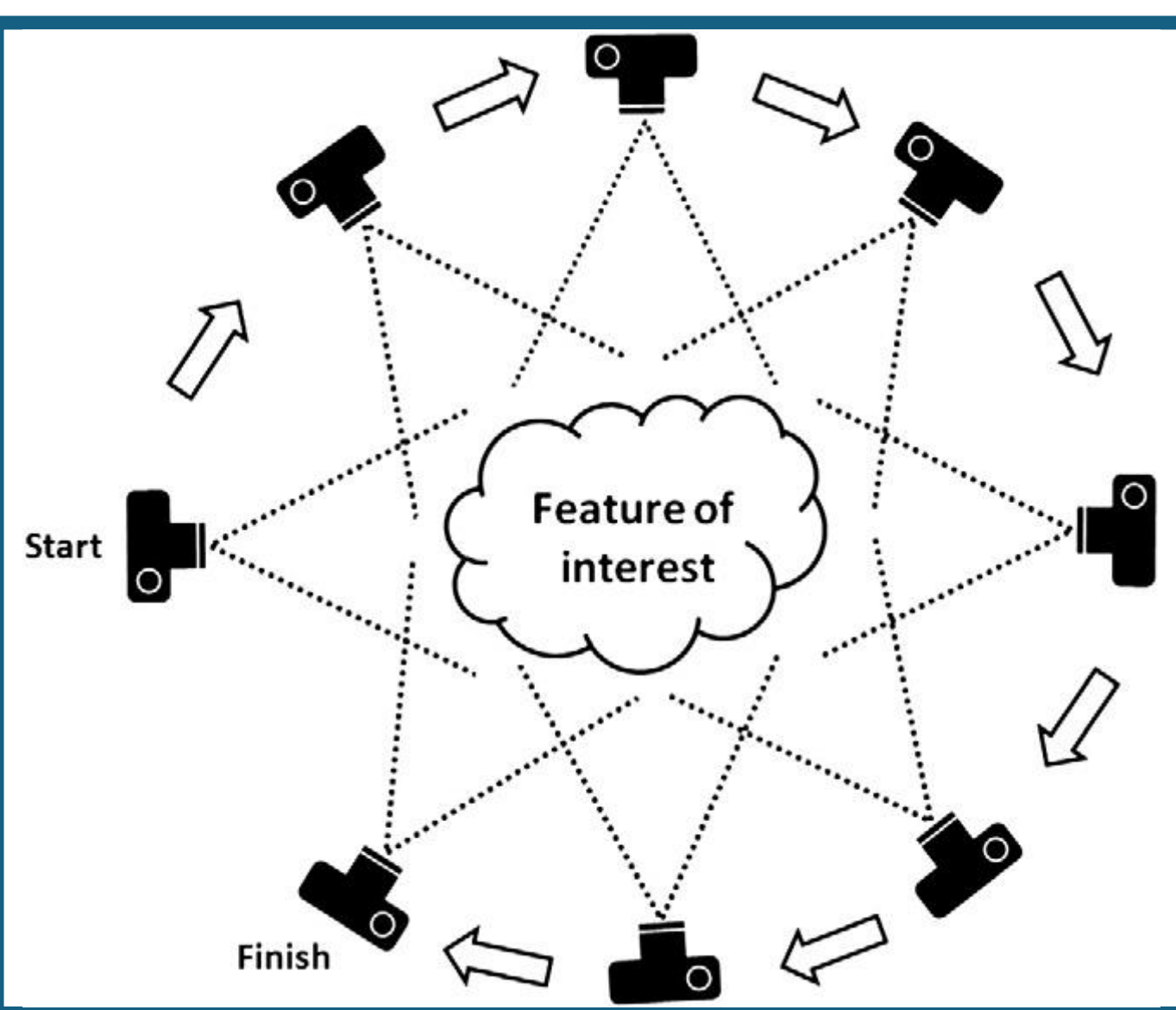
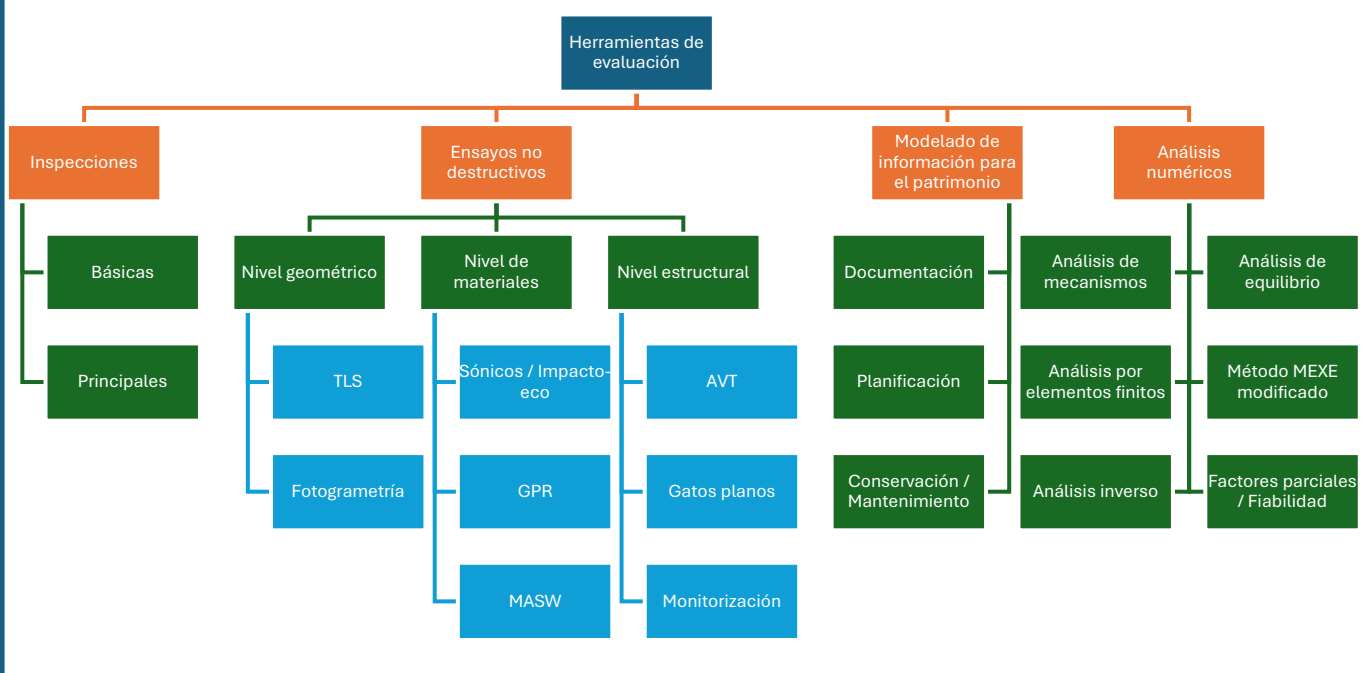
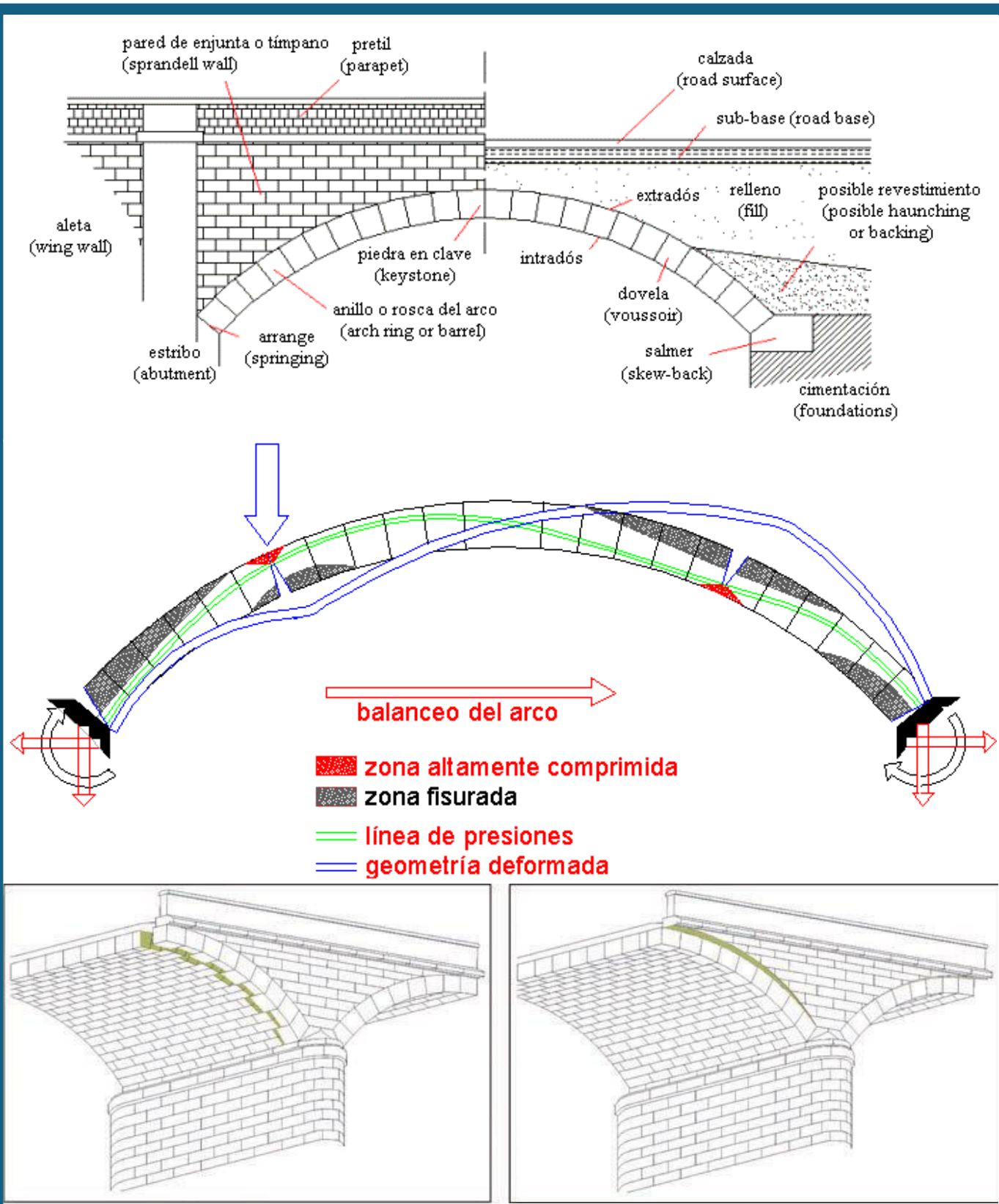
Tabla 14: Ficha 13 de procesos patológicos en el Puente Mayor de Liérganes.

FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES		FICHA 13
		FECHA: 24/08/2025
DAÑO		
Deformación hacia el exterior del tímpano norte en la bóveda mayor		
DESCRIPCIÓN		
En el tímpano norte, especialmente en la zona donde se localiza la grieta entre bóveda y boquilla, se aprecia que el paramento no forma un plano vertical uniforme, sino que muestra una ligera deformación hacia el exterior. Este abombamiento indica un desplazamiento de la fábrica, difícilmente atribuible al diseño o a la construcción original. La coincidencia de esta deformación con la grieta detectada entre bóveda y boquilla refuerza la hipótesis de un movimiento estructural en esta zona.		
POSIBLES CAUSAS		
- Empuje lateral de la bóveda: el arco transmite esfuerzos horizontales hacia el tímpano, provocando su desplazamiento hacia fuera. - Asentamiento diferencial en el estribo norte: movimientos en la cimentación o en el relleno podrían generar inclinación y desplazamiento del paramento. - Falta de trabazón estructural entre bóveda, boquilla y tímpano: la existencia de la grieta indica una unión débil que favorece la deformación. - Acumulación de empujes del relleno y aguas pluviales: presión adicional por drenaje insuficiente en la coronación. - Degradación de morteros y juntas: la pérdida de cohesión reduce la resistencia del tímpano frente a esfuerzos horizontales.		

ALCANCE / EXTENSIÓN
El daño se localiza en el tímpano norte de la bóveda mayor, especialmente en el sector oriental e intermedio. La deformación es perceptible en la alineación general del paramento y parece concentrarse en el punto donde la grieta entre bóveda y boquilla es más visible.
RIESGOS ASOCIADOS
- Incremento de la grieta entre bóveda y boquilla: riesgo de progresión y mayor separación estructural. - Pérdida de estabilidad del tímpano: si el desplazamiento continúa, puede comprometer su capacidad de retener el relleno. - Filtraciones de agua: la deformación facilita la entrada de agua al relleno, agravando el daño. - Posible riesgo estructural en la bóveda: al reducirse la continuidad entre bóveda, boquilla y tímpano, se altera la correcta transmisión de cargas.
ACTUACIONES
- Inspección estructural detallada: análisis con instrumentos de topografía y técnicas de monitorización para medir el grado exacto de deformación. - Monitoreo del movimiento: instalación de fisurómetros o estaciones totales para controlar la evolución de la deformación y de la grieta asociada. - Consolidación estructural puntual: inyecciones de mortero de cal en zonas abiertas y posibles cosidos transversales para recuperar trabazón. - Mejora del drenaje superior: revisar la coronación para reducir el empuje de rellenos saturados. - Refuerzo estructural si fuera necesario: en caso de evolución activa, considerar un recalce en el estribo o un sistema de anclajes discretos.
MANTENIMIENTO / REPARACIONES
- Revisiones periódicas del tímpano: controlar si la deformación se mantiene estable o progresa. - Reparación preventiva de juntas: rejuntado con morteros de cal hidráulica para mejorar cohesión superficial. - Limpieza y mantenimiento del drenaje: asegurar que el agua no ejerza presión excesiva en el relleno. - Informe técnico actualizado: mantener un registro documental y gráfico de la evolución del daño como base para futuras intervenciones. - Cosido horizontal en los tímpanos: Para reforzar la unión y evitar la apertura de la grieta, especialmente en puentes de sillería o mampostería, se puede realizar un cosido horizontal. Esto implica la inserción de barras de acero inoxidable o fibra de vidrio a través de los tímpanos en una disposición estratégica, anclándolas y sellándolas con mortero.

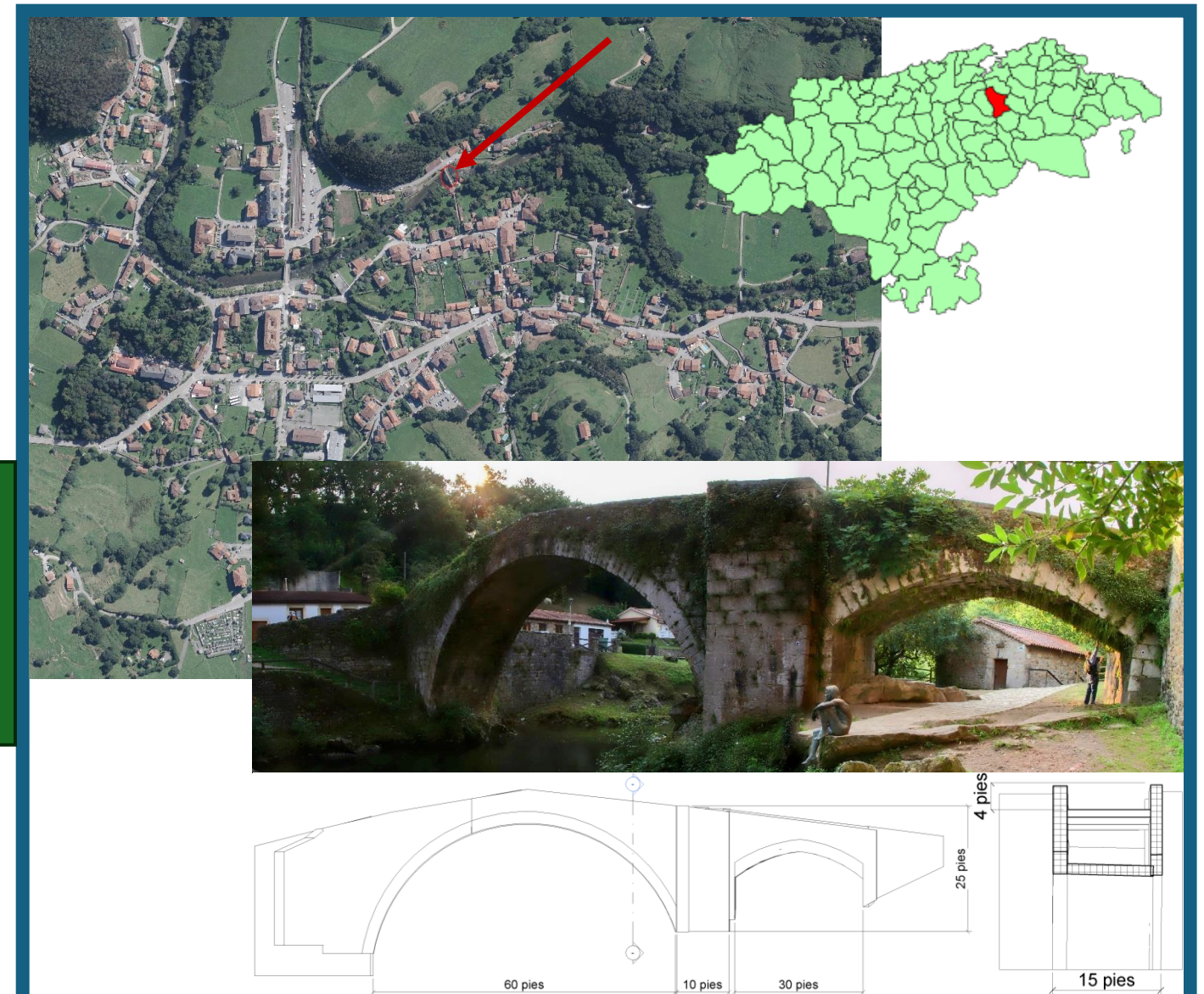
RESUMEN

El trabajo aborda el uso de técnicas digitales avanzadas para la documentación, análisis y conservación de puentes de fábrica. Se aplica la fotogrametría y el modelado H-BIM a un caso de estudio (Puente Mayor de Liérganes, Cantabria), integrando geometría y daños para facilitar su análisis y gestión.

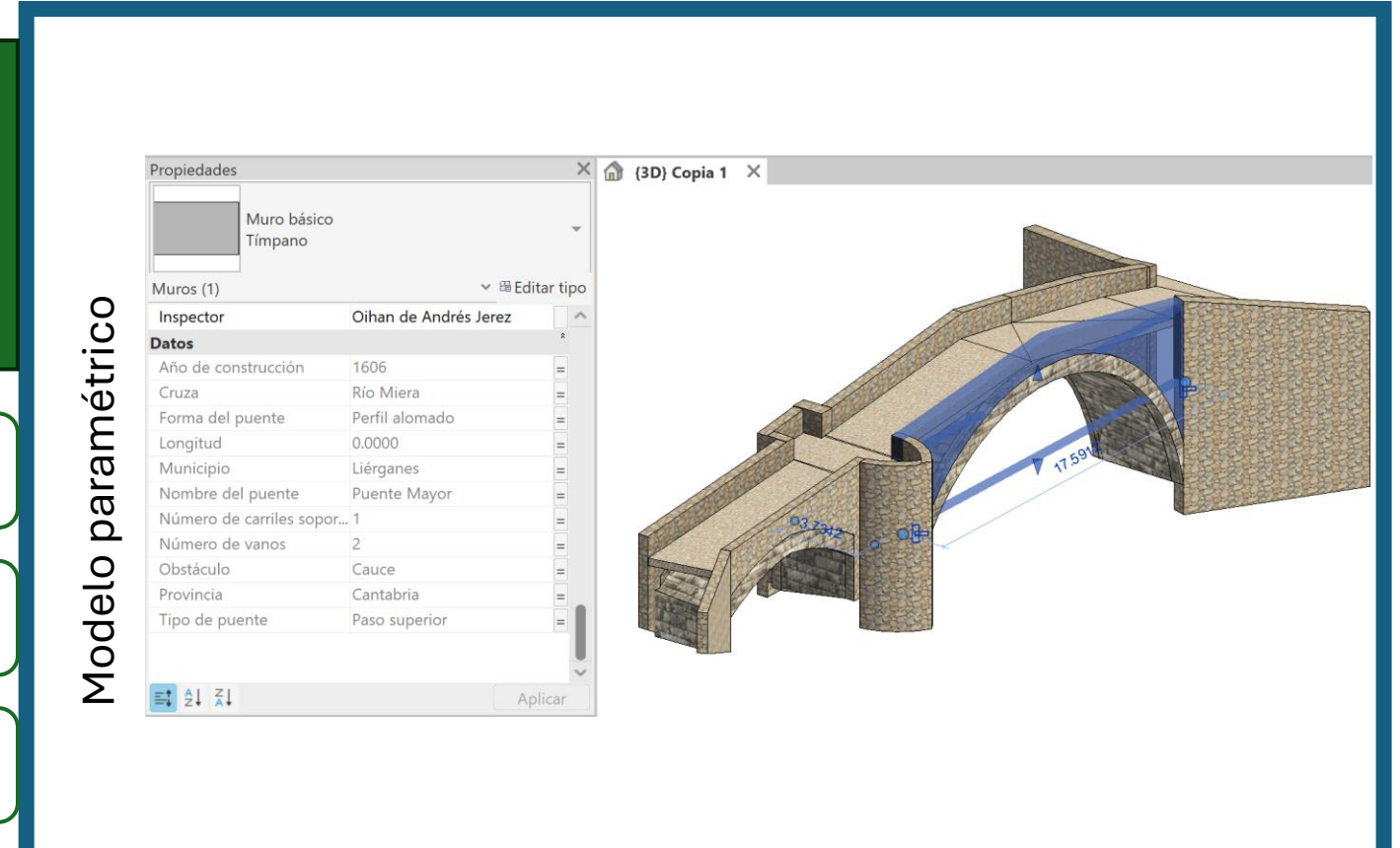


OBJETIVO PRINCIPAL

Evaluar el estado de conservación de puentes de fábrica mediante herramientas de fotogrametría y la metodología BIM, y su aplicación en un caso de estudio.



FICHA DE PROCESOS PATOLÓGICOS EN EL PUENTE MAYOR DE LIÉRGANES	FICHA 1 FECHA: 24/08/2025	FICHA 2 FECHA: 24/08/2025	FICHA 3 FECHA: 24/08/2025
DANO Agrietamiento de la bóveda mayor en la unión con la boquilla.	DESCRIPCIÓN Se observa una grieta longitudinal en la parte superior de la bóveda, justo en el punto donde se une con la boquilla. La grieta parece seguir la línea de la junta entre las dovelas y la boquilla. Además, hay vegetación, como musgo y pequeños helechos, que crecen en las juntas de las piedras.	POSIBLES CAUSAS - Asentamiento diferencial: El terreno sobre el que se apoya el puente puede haberse asentado de manera desigual con el tiempo. Un asentamiento en un extremo podría generar tensiones en la estructura y provocar la grieta. - Empuje de tierras: La presión lateral del terreno que contiene el muro de la boquilla puede ser excesiva, generando una fuerza que empuja la boquilla contra la bóveda y causa la fisura. - Acumulación de agua en el relleno: La falta de drenaje adecuado en la parte superior del puente o en el relleno detrás de la boquilla puede llevar a que el agua se acumule. El peso del agua saturada de tierra ejerce una presión hidrostática adicional que puede sobrecargar la estructura y causar el agrietamiento. - Envejecimiento del material y fatiga: Con el paso de los años, los materiales de construcción, como la piedra y el mortero, se degradan, pierden resistencia y son más propensos a agrietarse. El mortero puede haberse desmenuado o lavado, permitiendo el movimiento de las dovelas.	ALCANCE / EXTENSIÓN La grieta se ve desde la boquilla hasta la unión entre la boquilla y la bóveda. Sin una inspección más detallada, es difícil determinar la profundidad o si se extiende a otras partes de la estructura. Sin embargo, la presencia de vegetación sugiere que la grieta no es superficial y ha existido por un tiempo, permitiendo que las semillas se asienten y crezcan.
RIESGOS ASOCIADOS	POSIBLES CAUSAS - Acumulación de agua en el relleno: La falta de drenaje adecuado en la parte superior del puente o en el relleno detrás de la boquilla puede llevar a que el agua se acumule. El peso del agua saturada de tierra ejerce una presión hidrostática adicional que puede sobrecargar la estructura y causar el agrietamiento.	POSIBLES CAUSAS - Acumulación de agua en el relleno: La falta de drenaje adecuado en la parte superior del puente o en el relleno detrás de la boquilla puede llevar a que el agua se acumule. El peso del agua saturada de tierra ejerce una presión hidrostática adicional que puede sobrecargar la estructura y causar el agrietamiento.	POSIBLES CAUSAS - Acumulación de agua en el relleno: La falta de drenaje adecuado en la parte superior del puente o en el relleno detrás de la boquilla puede llevar a que el agua se acumule. El peso del agua saturada de tierra ejerce una presión hidrostática adicional que puede sobrecargar la estructura y causar el agrietamiento.



CONCLUSIONES

- Gran utilidad de la fotogrametría terrestre para la documentación geométrica.
- Identificación de limitaciones: dificultades en la alineación automática de imágenes y efecto de la vegetación en la precisión del levantamiento.
- Obtención de un modelo preciso que integra geometría, parámetros constructivos y daños.
- Potencial de los modelos H-BIM como bases de datos interdisciplinarias.
- Metodología aplicada eficaz, replicable y útil para la conservación preventiva.