

An aerial photograph of an archaeological site, likely a defensive fortification. The terrain is reddish-brown and shows various structures and walls. In the foreground, there is a prominent wooden structure, possibly a model or a reconstruction of a building. The background shows more of the site and some distant hills.

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CONTROL DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

**“EL CUARTEL DEFENSIVO DEL GENERAL
FAJARDO”**

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA Y CALIDAD EN ESTRUCTURAS. Curso 21/22

Profesor: GUILLERMO RUS CARLBORG

Alumna: EVA MORENO ÁLVAREZ

Contenido

1. SITUACIÓN:.....	3
2. PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO DE ESTUDIO:.....	3
Propiedad.....	4
Época.....	4
Breve historia.....	4
Levantamiento fotogramétrico.....	4
3. PLANIMETRÍA DEL EDIFICIO:	6
4. ANÁLISIS FOTOGRÁFICO:.....	8
5. INTRODUCCIÓN A LA EVALUACIÓN DEL EDIFICIO.....	17
6. TÉCNICA CONSTRUCTIVA	19
7. PATOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	19
Caída de revocos, enlucidos y pinturas.....	20
Asentamiento de cimentaciones.....	21
Erosión de la junta de mortero	21
Fisuras horizontales, diagonales, desconexiones y aplastamiento de los paneles murales...	21
Fisuras y riesgos de derrumbamientos en arcos y bóvedas.....	22
Efectos de las variaciones térmicas.....	22
8. TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICABLES.....	22
Una evaluación segura	23
Análisis estructural.....	24
Monitorización, control y evaluación.....	24
Técnicas aplicables en el exterior del patrimonio.....	26
Técnicas aplicables en el interior del patrimonio	28
9. CONCLUSIONES	37
10. BIBLIOGRAFÍA.....	39

1. SITUACIÓN:

El objeto arquitectónico a estudiar se encuentra ubicado en Cartagena (Murcia, Región de Murcia). Localizado en la parte oeste del Puerto de Cartagena. En el monte de Fajardo (o Soto de la Podadera). En concreto en su parte central. Se encuentra en territorio de la Base Naval de Cartagena. Se sitúa en el denominado complejo C-4 junto con las baterías de San Fulgencio, General Fajardo y La Podadera.



2. PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO DE ESTUDIO:

Se realizará una evaluación del cuartel defensivo y baterías del general Fajardo de Cartagena.

Se trata de un edificio de muros de fábrica mixta de mampostería careada y de ladrillos.

El cuartel es de forma rectangular con un patio interior y dos caponeras en sus esquinas diametralmente opuestas, que con sus parapetos, banquetas y aspilleras, flaqueaban los muros exteriores del edificio.

Su estado actual es de abandono y ruina. Progresivamente se va acumulando vegetación, y además actos vandálicos potencian el deterioro del complejo. Expolio de piezas y continuo desgaste de muros por las inclemencias del tiempo.

Personas sin hogar acuden en ocasiones a refugiarse en este espacio.

Actualmente está declarado Bien de Interés Cultural, en la categoría de Monumento (desde 7 de agosto de 1997). Pertenece a la lista roja del Patrimonio por su estado de continuo deterioro.

Propiedad

Del ministerio de Defensa.

Época

Siglos XVII – XIX

Breve historia

Su origen se remonta al siglo XVII, hasta que en el siglo XVIII se queda sin uso. En el año 1860 se aplica el Plan O'Donnell de Defensa.

Durante la Guerra Civil se da un uso intensivo al edificio provocando el desmonte de varias piezas. Esto provoca que pierda importancia militar hasta que en 1960 es desartillado por completo. Desde ese momento pasa a ser almacén de municiones. Pero en el año 1994 es totalmente abandonada.

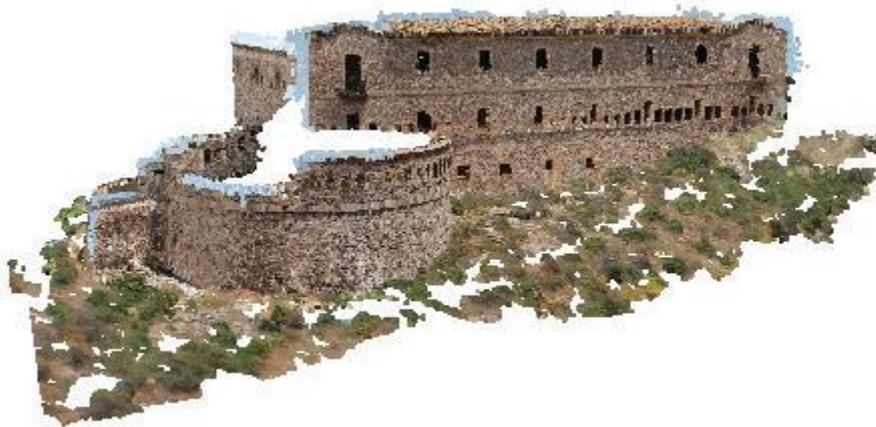
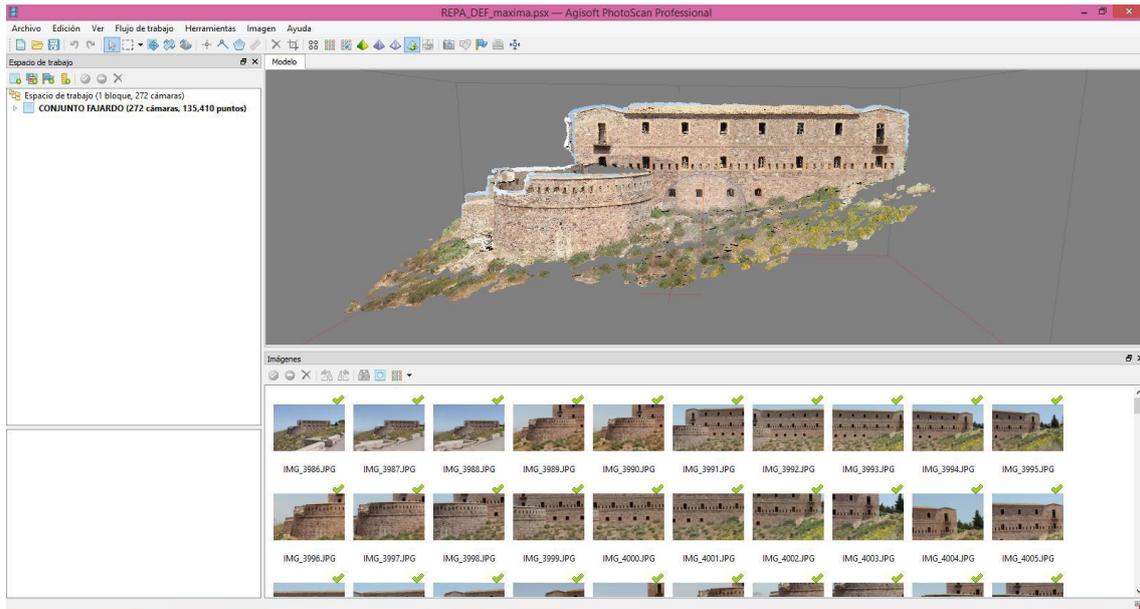
Levantamiento fotogramétrico

Para ello se ha realizado una visita y tomado fotografías de comunes características en cuanto a distancia focal y homogéneas condiciones de iluminación. Todas las imágenes tomadas deberán suponer ponerse unas con otras, de manera que se produzca solape entre las fotos para facilitar el procesado al programa. Allí en el propio emplazamiento tomamos medidas de elementos significativos que puedan ayudarnos posteriormente en el levantamiento.

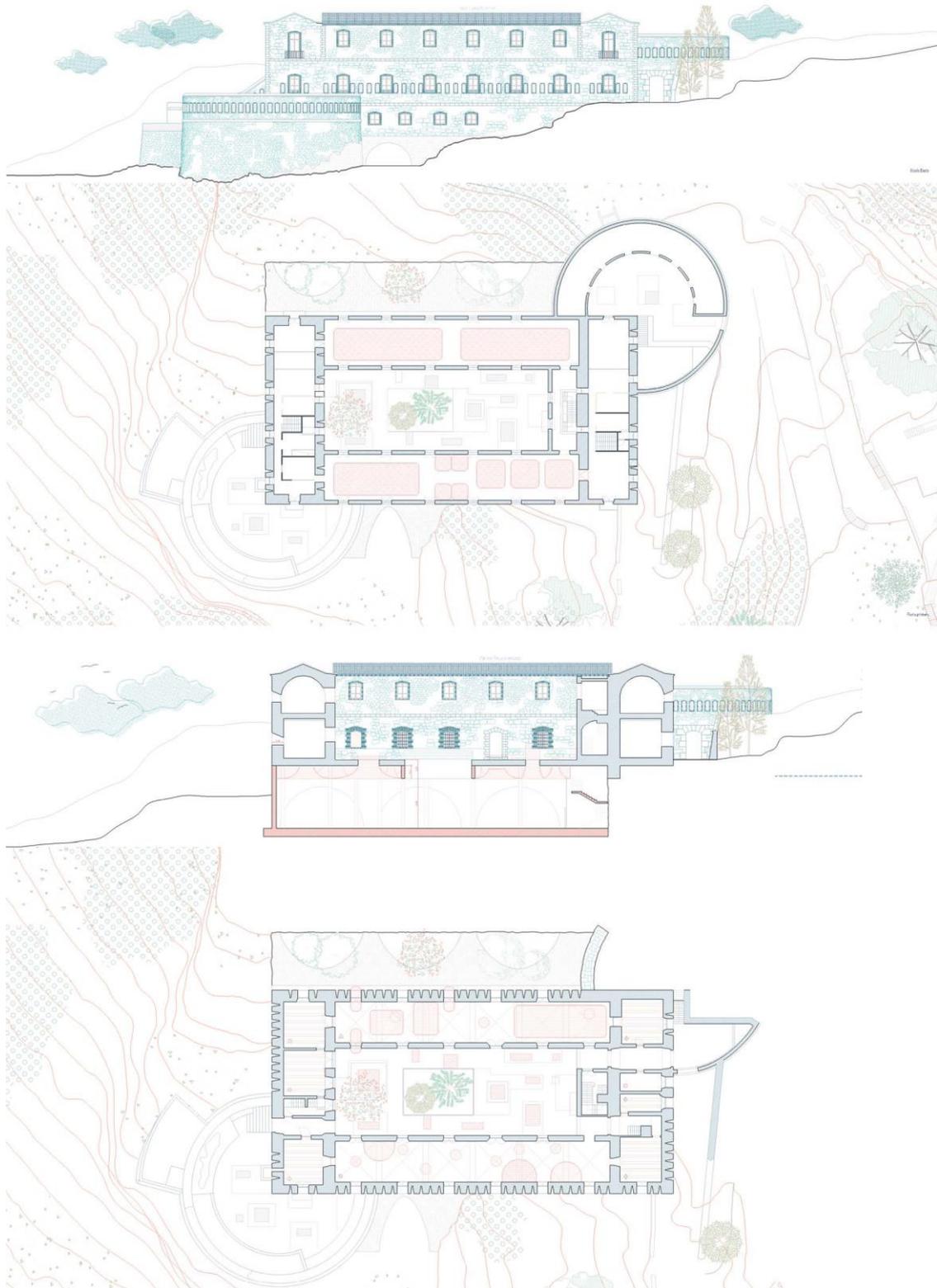
A continuación seleccionamos las fotografías, eliminando aquellas en las que pueda haber exceso de información incorrecta, o creen confusión.

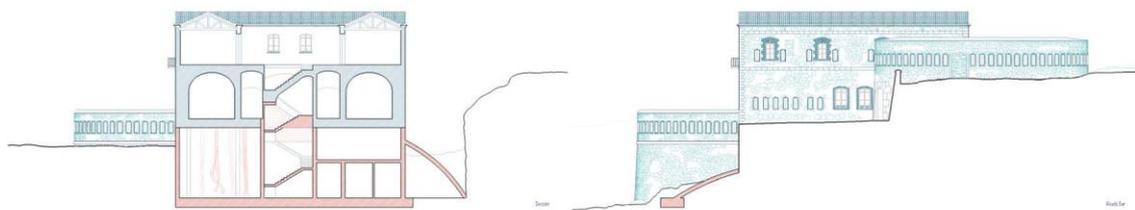
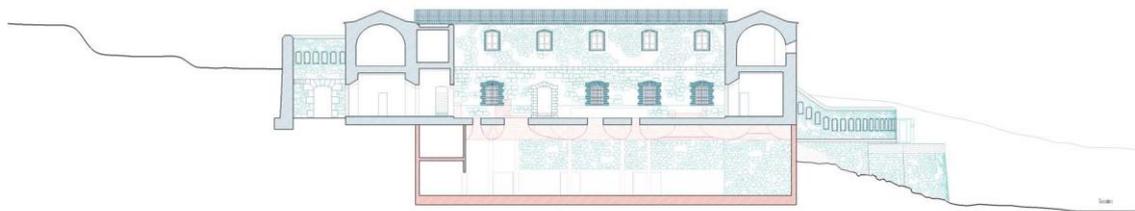
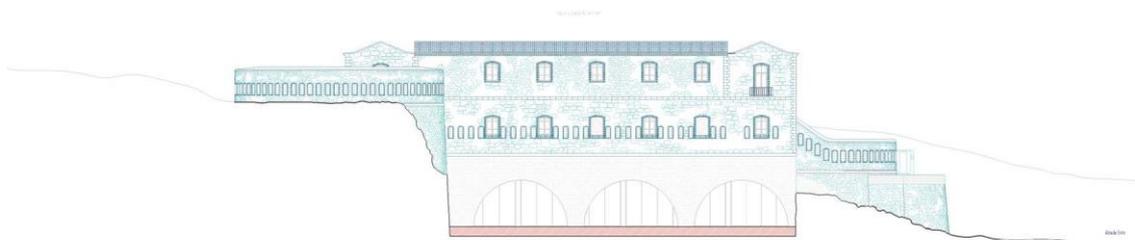
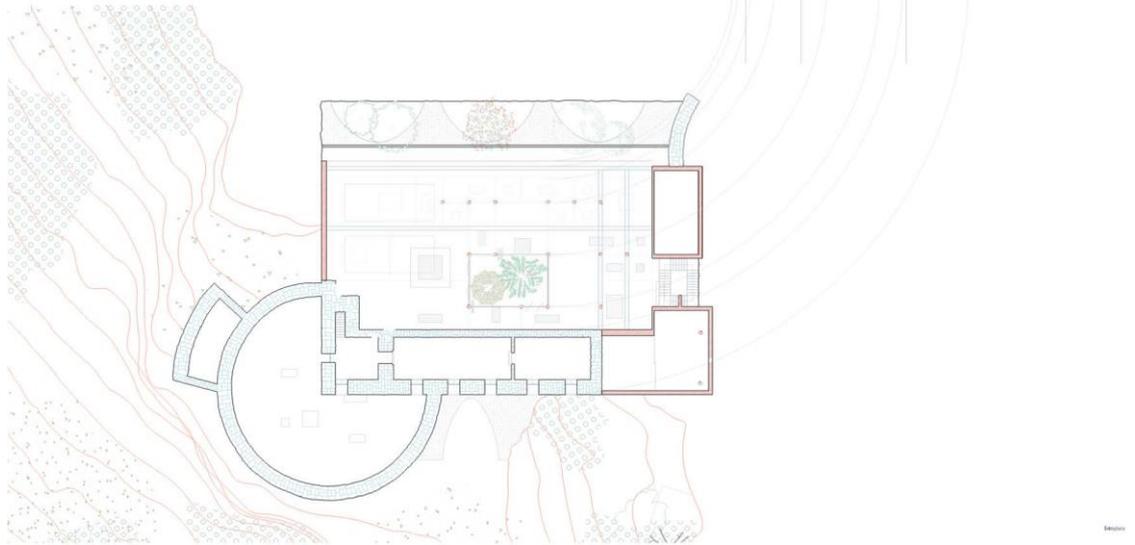
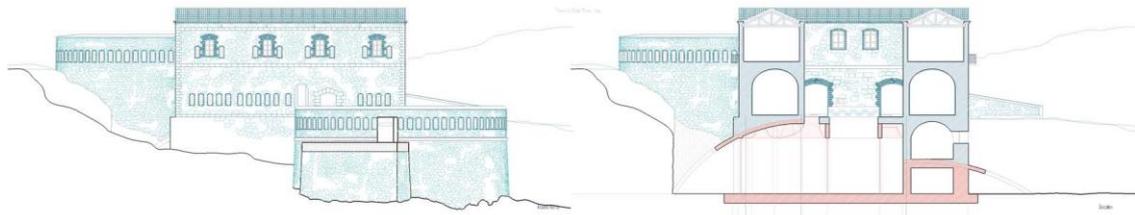
Mediante el programa "Agisoft PhotoScan Professional" agregamos las imágenes tomadas, realizando pruebas en calidad mínima hasta comprobar que el resultado será el deseado.

Tras lograrlo, derivamos a procesar el modelo. Orientamos las fotos en máxima calidad, y tras ello realizamos una nube de puntos más densa en calidad mínima. En ella limpiamos el modelo de puntos que no aportan información. Una vez limpio creamos una nube de puntos densa en calidad extra alta.



3. PLANIMETRÍA DEL EDIFICIO:





4. ANÁLISIS FOTOGRÁFICO:





















5. INTRODUCCIÓN A LA EVALUACIÓN DEL EDIFICIO

El patrimonio forma parte de nuestra historia y de la identidad de muchas ciudades. Estructuras de carácter histórico que necesitamos inspeccionar cada cierto tiempo para verificar que son seguras, soportan los efectos medioambientales y mantienen su integridad para perdurar. El interés por su conservación proviene además por el hecho de ser inmuebles declarados Monumento Histórico o Bien de Interés Municipal. Edificios que llegan a superar 140 años en servicio.

Esta labor de inspección mediante ensayos no destructivos puede revelar el daño progresivo de manera temprana permitiendo una reparación antes que se produzca un accidente o llegue si irreversible deterioro.

Si nos centramos en las estructuras de fábrica, que se mantienen en su lugar después de siglos también deben evaluarse, pues poseen un cierto riesgo de caerse. Aunque en apariencia no se encuentren en mal estado puede llegar el colapso. Algunos ejemplos de ello son:

- Basílica de Santa María de los Ángeles en Cuneo
- Catedral de Noto
- Campanario de Venecia
- Campanario de Pavía

Las causas del colapso pueden deberse a fenómenos de la naturaleza como terremotos, inundaciones o fuertes vientos; una degradación de los materiales o un mal mantenimiento.

Reducir la incertidumbre en cuanto a comportamiento a futuro próximo de la estructura es necesario para evitar el deterioro irreversible o poner en peligro la vida de las personas.

Como estrategia de mantenimiento del edificio histórico puede plantearse el empleo de procedimientos de monitorización, con una extensa red basada en la recogida y procesamiento de datos, análisis de riesgo y procedimientos de optimización.

Los avances de hoy día como:

- La mejora de sensores
- Adelanto en los métodos de procesamiento de datos

Han hecho mejoras en las metodologías de evaluación, haciendo que haya diferencias significativas en la manera de monitorizar hoy frente a las de inicios del SXXI.

El fuerte vínculo de la arquitectura histórica a la mampostería debe su desempeño a la naturaleza y forma de trabajo conjunta entre mampuestos y morteros (ladrillos macizos artesanales, mampuestos de piedra y morteros de arena y cal).

Hay una escasa información técnica disponible referente a este tipo de estructuras, con una ausencia de una metodología consolidada para evaluación (preferentemente) no destructivas.

Mediante este trabajo se pretende la definición de una metodología para el análisis de técnicas no destructivas que nos den un diagnóstico del estado. Las técnicas empleadas para otros usos serán extrapoladas a la aplicación en este tipo de edificaciones históricas, teniendo en cuenta:

- La naturaleza de los materiales
- El vínculo con técnicas convencionales destructivas.
- Su aplicabilidad in situ en el patrimonio con el mínimo impacto posible.
- Cómo se puede complementar.

Con ello podremos establecer técnicas complementarias capaces de evaluar estas estructuras cualitativamente en un primer momento y posteriormente determinar cuantitativamente su desempeño, sin implicar perjuicios a las características materiales de los edificios

Como objetivo fundamental se pretende establecer una recomendación para la evaluar y controlar de los sistemas estructurales en mampostería.

6. TÉCNICA CONSTRUCTIVA



Los muros de piedra se realizan con fragmentos de roca, en función de su labrado distinguimos:

- Muros de mampostería: ejecutado con piedras naturales sin labrar o con un ligero labrado para acoplamiento entre ellas.
- Muros de sillería: las piedras están trabajadas y modeladas generalmente en forma prismática para su puesta en obra.

En el caso del Cuartel Defensivo del General Fajardo encontramos muros de gravedad de Mampostería. El tamaño y peso de los mampuestos permiten su colocación con la única ayuda de las manos. Su forma y tamaño es irregular siendo más o menos heterogéneo en función del tipo de roca del que provienen.

En función del tipo de muro se necesita una manipulación previa o no de la mampostería, adaptándola a su tamaño o evitando salientes agudos que dificulten el acoplamiento. Las cualidades que deberá reunir son:

- Resistir a las acciones de los agentes atmosféricos
- Ser resistente a la abrasión
- Baja helacidad, evitando el deterioro, desprendimiento, exfoliación o rotura por el aumento de volumen del agua en su interior al convertirse en estado sólido.

El caso de estudio se trata de una edificación con mampostería ordinaria procedente de cantera, sin labrar y colocados con aparejo irregular.

7. PATOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

El estudio previo in situ es útil para proporcionar detalles de la geometría de la estructura e identificar puntos en los que deben concentrarse las observaciones.

Ese estudio previo nos conduce a una investigación más refinada, identificando irregularidades (desviaciones verticales, rotaciones, etc.).

Será importante conocerse la evolución histórica de la estructura para poder explicar las muestras de daño detectadas en la construcción.

Entre las patologías destacables será de especial importancia el estudio y trazado de los patrones de rotura. Una interpretación de los mismos puede ser de gran ayuda para entender el estado de daño de una estructura, sus posibles causas y el tipo de estudio a desarrollar.

A menudo los detalles geométricos de la estructura necesitan un estudio refinado especial en el caso de que sean complejos o de difícil interpretación con los procedimientos habituales. La fotogrametría puede ser de gran ayuda para definir la geometría de bóvedas y arcos.

El conocimiento exacto de la geometría es de suma importancia para la estabilidad de las bóvedas de obra de fábrica. Todas las irregularidades de la geometría se detectan detalladamente y sirven para un modelo de análisis estructural.

El Cuartel Defensivo de Fajardo ha sido construido mediante muros de carga de mampostería de piedra dotado pilares de sillería como refuerzo de esquinas y vanos de acceso.

Su proximidad al puerto hace que los mampuestos sean una apuesta adecuada a fin de evitar las humedades de capilaridad.

El material, por su naturaleza heterogénea tiene unas características mecánicas variables. Los principales agentes naturales causantes de patologías son el agua, el viento y la temperatura.

La intervención en el patrimonio y restauración de obras de mampostería plantea el reto de la adecuada elección de las técnicas y de los materiales para lograr los objetivos:

- Reconocer si presenta una inestabilidad estructural y los fenómenos químico-físicos de degradación o inestabilidad.
- Recuperar la capacidad estructural y que la intervención tenga alta fiabilidad y duración.
- Reducir los efectos negativos de los agentes que deterioran el patrimonio en ese emplazamiento.

Entre las patologías más comunes encontramos:

Caída de revocos, enlucidos y pinturas

La humedad circula por el interior de las paredes con un contenido en sales disueltas provenientes del terreno, de los aglomerantes o de los propios mampuestos.

Esa circulación interna del agua tiende a ir hacia el extradós del enlucido. En este punto el agua se evapora y las sales se depositan tanto en los poros como en la superficie externa en forma de cristales.

El efecto de esa humedad forma una pátina blanca llamada eflorescencia. En ese punto los cristales incrementan su volumen y generan tensiones de tracción que dan lugar a “presiones

de cristalización”, que traen como consecuencia la disgregación del enlucido y del mortero de unión entre mampuestos.

Asentamiento de cimentaciones

Las cimentaciones en zapata corrida es la más común en muros de carga por gravedad (posiblemente por su naturaleza histórica pueda incluso carecer de cimentación). Se realiza en terrenos estables y a poca profundidad.

El apreciar asentamientos puede deberse a:

- Modificaciones en el tiempo de las características del terreno.
- Influencia de movimientos del terreno.
- Aumento de las cargas transmitidas al cimiento.

Los asentamientos en la cimentación modifican la distribución de esfuerzos que suele traducirse en la aparición de fisuras verticales, desplazamientos, rotaciones relativas,...

Erosión de la junta de mortero

Los puntos de mayor vulnerabilidad en los muros de mampostería son las juntas de mortero. Podemos evidenciar su daño por la carencia parcial de este mortero. Esta pérdida puede estar vinculada con problemas estructurales, una mala ejecución...

El desmoronamiento de porciones de material puede deberse al lavado y caída del aglomerante como efecto de lluvia ácida o por la cristalización de sales causada por la humedad ascendente.

Fisuras horizontales, diagonales, desconexiones y aplastamiento de los paneles murales

Los esfuerzos de compresión excéntrica y eventuales acciones sísmicas horizontales provocan un esfuerzo por compresión-flexión y cortante que debe valorarse.

Teniendo en cuenta si se ha superado la resistencia a compresión, que podemos apreciarlo en la degradación del mortero.

En el caso de la formación de fisuras horizontales queda de manifiesto la presencia de flexiones fuera del plano por excentricidad de las cargas verticales y cargas horizontales.

Si apreciamos fisuras diagonales debidas a la superación de la resistencia al corte.

La acción sísmica predomina en horizontal, y es muy agresiva en este tipo de edificaciones patrimoniales por su baja resistencia a tracción y reducida ductilidad de los materiales. Se deberá tener en cuenta su efecto y actuar para paliar posibles daños.

Fisuras y riesgos de derrumbamientos en arcos y bóvedas

Las estructuras de bóvedas tabicadas son frágiles por lo que respecta a los esfuerzos de tracción. Estos esfuerzos son de menor importancia en las estructuras curvas (frente a horizontales y verticales) pero igualmente están presentes.

Cuando se dan cargas no simétricas como acciones sísmicas o asentamientos diferenciales esta tracción en las bóvedas se vuelven significativos y las fisuras se forman inmediatamente en la dirección ortogonal a la dirección de tracción principal. Esta patología es delicada, pues la pérdida de continuidad puede generar derrumbamientos imprevistos de porciones de bóveda o de la estructura entera.

Efectos de las variaciones térmicas

Las variaciones térmicas, diarias y estacionales, no producen problemas sustanciales en las estructuras murales tal cual, excepto en el caso de las chimeneas. Pero, cuando la estructura mural se encuentra en contacto o en coacción con elementos metálicos o elementos en hormigón, la diferencia en el coeficiente de expansión térmica de los dos materiales puede generar fisuras y fracturas en la mampostería.

8. TÉCNICAS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICABLES.

La conservación del patrimonio cultural está considerada como un principio fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas. El desarrollo de la inspección, ensayos no destructivos, monitorización y análisis estructural de monumentos nos ayudan a la comprensión, el análisis y la reparación de construcciones históricas continúa siendo uno de los desafíos más importantes de las técnicas modernas.

Los métodos no destructivos son necesarios para obtener las características mecánicas necesarias para el análisis y comprensión del comportamiento mecánico de las construcciones históricas, así como, para validar el análisis en sí mismo.

Estas técnicas de evaluación no destructiva nos ayudan a de detectar elementos estructurales ocultos, huecos y defectos internos, realizar mapas de heterogeneidad de materiales, evaluación de la extensión de daños mecánicos, evaluación del contenido de humedad y ascensión capilar, evaluación de las propiedades mecánicas y físicas de morteros, piedras o ladrillos, etc.

Los métodos no destructivos están siendo cada vez más empleados especialmente la conservación del patrimonio cultural e histórico. Algunas de las técnicas no destructivas para la evaluación pueden ser:

- Inspección visual
- Ultrasonidos
- Radiografía
- Penetrante líquido
- Partículas magnéticas

- Corrientes de Inducción

Tras conocer la metodología constructiva y técnica de puesta en obra los mampuestos en edificaciones estudiaremos las técnicas de evaluación no destructiva aplicables para análisis del patrimonio de mampostería.

Comenzaremos por aportar un marco normativo en el que basarnos para llevar a cabo la evaluación. En concreto la institución investigadora, de desarrollo y normalización en el ámbito de las mamposterías de piedra es la RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras) destacando su comité técnico:

- TC 216-SAM (Strategies for the assessment of historic masonry structures with NDT).

En cuanto a normativa europea que nos ayuda al diagnóstico de edificios históricos y conservación del patrimonio cultural, encontramos:

- CEN/TC WG1: General methodologies and terminology
- CEN/TC WG2: Characterization and analysis of porous inorganic materials constituting cultural heritage
- CEN/TC WG3: Evaluation of methods and products for conservation works on porous inorganic materials constituting cultural heritage),

La Organización Internacional de Normalización (ISO) también nos aporta una base normativa:

- Comité técnico TC 179 Masonry y las recientemente aprobadas normas europeas sobre Diagnóstico de edificios históricos que incluyen a las obras denominadas de fábrica.

Algunas normas UNE

- UNE-EN 583-1:1999. PARTE 1: principios generales.
- UNE-EN 583-2:2001 Examen por ultrasonidos. PARTE 2: Ajuste de la sensibilidad y de la base de tiempos
- UNE-EN 583-3:1997 Examen por ultrasonidos. PARTE 3: Técnica de transmisión
- UNE-EN 1330-4:2000 Terminología. PARTE 4: Términos utilizados en ensayos por ultrasonidos
- UNE-EN 583-5:2001 Examen por ultrasonidos. PARTE 5: Caracterización y dimensionamiento de discontinuidades.
- UNE-EN 61206:1996 Ultrasonidos. Sistemas Doppler de onda continua. Procedimiento de ensayo

Una evaluación segura

La necesidad de mantener la seguridad y como prevención de lleva a cabo la rehabilitación que pueden lograrse con éxito si se ha llevado cuidadosamente el diagnóstico del estado de daño de un edificio.

Históricamente la necesidad de rehabilitación y reparación de edificios aplicaban la experimentación de las técnicas tradicionales y avanzadas, sin embargo estas últimas se usaron en sus inicios sin control previo por la situación de urgencia y falta de tiempo.

En los últimos años se han investigado y mejorado una serie de procedimientos de investigación con el empleo de técnicas no destructivas.

Este tipo de evaluaciones nos pueden ser de utilidad para conocer patologías ocultas como pueden ser hueco, defectos internos en una sección de muro.

Calificar el estado de conservación de muros de piedra, sus defectos internos, la presencia de múltiples capas y cómo se conectan entre sí será necesario el conocimiento del interior.

Además tendrá importancia como varía en el tiempo la exposición de la edificación a ambientes agresivos, fenómenos naturales como pueden ser fuertes vientos, sismo, lluvia ácida...

Análisis estructural

Los edificios históricos deben mostrar estabilidad estructural, disminuyendo cualquier posibilidad de víctimas humanas. La evaluación del estado de algunos edificios históricos ha demostrado que en ciertos casos la seguridad estructural es bastante baja.

El análisis estructural, empleado de manera apropiada y racional puede ayudar a definir el estado final de peligro e incluso el futuro comportamiento de la estructura. Para lograr este objetivo será necesaria la definición de las propiedades mecánicas de los materiales, el conocimiento de las leyes constitutivas de los materiales deteriorados y la mejora de los criterios de fiabilidad.

El comportamiento estructural de un muro mampostería podrá deducirse conocidas:

- La geometría de los muros
- Las características compositivas del mismo (conexión del material, presencia de diversas capas...)
- Características físicas, químicas y mecánicas de los componentes (piedras, mortero)
- Las características en su conjunto como un material compuesto.

Monitorización, control y evaluación.

- **Monitorización estática**

Cuando se detecta un patrón de rotura de importancia y su progresivo crecimiento se debido a asientos del suelo, variaciones de temperatura o cargas excesivas, será necesario medir los desplazamientos en la estructura en función del tiempo.

Este tipo de estudio se aplica a construcciones importantes, y el sistema puede permanecer instalado durante años antes de tomar la decisión de ejecutar reparaciones o refuerzos.

Pueden aplicarse también a la monitorización de grietas importantes, donde la apertura de las mismas a lo largo del tiempo puede medirse mediante extensómetros desmontables de alta resolución. Este sistema es sencillo y puede dar mucha información importante

En todos los casos la monitorización debería ser a largo plazo, no menos de año y medio, para determinar la influencia de la variación de temperatura en cada lectura de los desplazamientos.

- **Monitorización dinámica**

En empleo de métodos dinámicos para ensayos in situ es un procedimiento no destructivo de confianza para verificar el comportamiento estructural y la integridad de una estructura controlando la vibración.

Este tipo de evaluación será esencial para el mantenimiento con la comprobación sistemática de las estructuras, antes, durante y después de la fase de reparación.

Se seleccionan partes significativas de la estructura en las que instalar una red de acelerómetros. El análisis espectral puede usarse para extraer los parámetros modales de la vibración.

Con el análisis modal, la respuesta de la vibración se obtiene sumando la contribución de los distintos modos de vibración naturales, cada uno multiplicado por una función de tiempo; los modos propios, obtenidos del análisis de vibraciones son función de las propiedades del sistema y las condiciones de contorno solamente.

Los ensayos de vibración permiten detectar las frecuencias, modos de vibración y el amortiguamiento de la estructura.

- **Monitorización de emisión acústica (AE)**

Las técnicas de monitorización y diagnóstico están asumiendo una creciente importancia en la evaluación de las condiciones de seguridad y la fiabilidad de las estructuras. Entre estos métodos, la metodología no destructiva basada en emisión acústica (AE) demuestra ser muy efectiva.

Con el tiempo, el nivel de interés en la investigación ha llegado a ser tan alto que se organizan congresos internacionales de AE por todo el mundo. En respuesta a este alto nivel de actividad, AE ha sido cada vez más investigada como una herramienta de diagnóstico para estructuras fábrica y de hormigón.

Entre los fundamentos de esta monitorización vemos que se representa por la clase de fenómeno a través del cual se generan ondas elásticas transitorias por la rápida liberación de energía desde fuentes localizadas en el material.

Todos los materiales producen emisión acústica durante la generación y propagación de grietas. Las ondas elásticas se mueven a través de la sólida superficie, donde son detectadas por sensores. Estos sensores son transductores que convierten las ondas mecánicas en señales eléctricas. De esta manera, se obtiene la información acerca de la existencia y localización de posibles fuentes de daño.

Este fenómeno es similar al de la sismicidad, donde las ondas sísmicas alcanzan la estación colocada en la superficie terrestre. Por lo tanto, entre los ensayos no destructivos, la técnica de monitorización AE es la única capaz de detectar un proceso de daño al mismo tiempo que éste sucede.

El método AE, considera el número de ondas más allá de un cierto umbral (medido en voltios) y es ampliamente usado para el análisis de defectos

Como primera aproximación, de hecho, el número acumulado de mediciones N puede ser comparado con la cantidad de energía liberada durante el proceso de carga, asumiendo que ambas cantidades se incrementan con la extensión del daño.

Por medio de esta técnica, se analiza la evolución de las grietas y se estima la energía liberada durante la propagación en elementos estructurales; en particular, edificios históricos.

Técnicas aplicables en el exterior del patrimonio

1- Prospección geofísica

Para la valuación del entorno exterior emplearemos la prospección geofísica que consiste en emplear técnicas físicas y matemáticas, no destructivas, para explorar el subsuelo.

El ámbito de aplicación de estas técnicas es muy amplio (el estudio de las regiones más profundas de la Tierra hasta la detección de estructuras muy someras)

El principio físico de todo su ámbito es similar, pero las estrategias en cada caso varían. Pues no será lo mismo estudiar capas profundas de la Tierra (con la energía mecánica liberada por los grandes terremotos) o evaluar la disposición de materiales de los primeros metros del subsuelo (con la energía producida por un golpe de martillo).

Los diferentes métodos de prospección geofísica de superficie se generan adaptando las leyes físicas del universo. En esta tabla vemos algunos de los métodos de prospección y sus campos de aplicación:

Principio Físico	Propiedad	Métodos de prospección	Aplicación
Campo gravitatorio Ley de la Gravitación Universal	Masa	Gravimetría Microgravimetría	Detección de grandes estructuras Detección de cavidades, muros, restos arqueológicos, etc
Energía mecánica	Densidad y estructura interna	Sismología Prospección sísmica, cross-hole, etc	Estudio del interior de la Tierra Detección de estructuras de tamaño mediano (geología, arqueología, hidrología)
Campo gravitatorio	Constante dieléctrica, conductividad, susceptibilidad magnética, radiación	Resonancia magnética protónica VLF Prospección eléctrica Radar de subsuelo	Contenido de agua y porosidad Detección de fracturas y contactos verticales Detección de estructuras del subsuelo (hidrología, arqueología)
Energía calorífica	Conducción térmica Temperatura	Flujo térmico, gradiente térmico	Detección de anomalías térmicas de tamaño grande y superficiales



Prospección geofísica

Para llevar a cabo el empleo de esta técnica aplicaremos la siguiente metodología:

- Definir entorno de estudio
- Establecer el método a emplear
- Planificar el trabajo de campo (Equipos necesarios, hojas de anotaciones en campo, días de trabajo, permisos necesarios...)
- Toma de datos en campo
- Trabajo en gabinete con el procesado de los datos
- Interpretación de los resultados.

2- Radar de Subsuelo (GEO-RÁDAR, GPR)

Se trata de un método electromagnético con la ventaja de que no requieren un contacto directo con el suelo como en el caso de los métodos eléctricos en los que los electrodos deben de clavarse en el terreno.



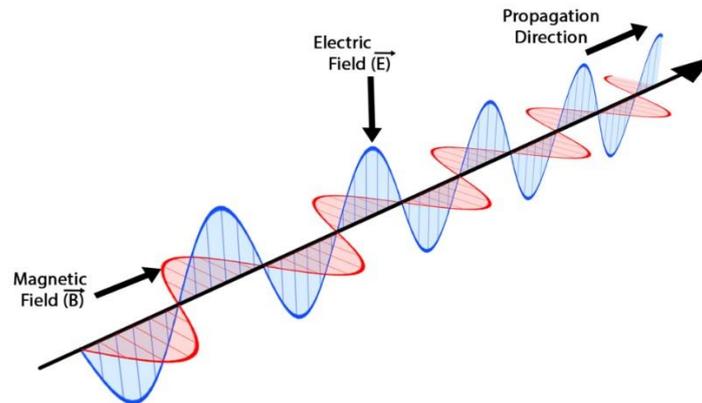
Prospección con geo radar

Por ello el tiempo que se emplea en campo es mucho menor. Los métodos electromagnéticos utilizan las respuestas del terreno frente a la propagación de las ondas electromagnéticas.

Dicha propagación está regulada por las ecuaciones de Maxwell que describen los campos magnético y eléctrico de una onda en función de las propiedades electromagnéticas del terreno por el que viaja; es decir por la constante dieléctrica ϵ (F/m), la permeabilidad magnética μ (H/m) y la conductividad eléctrica σ de los materiales.

Si la dirección de propagación es en el eje x, las ondas electromagnéticas están compuestas por dos campos perpendiculares entre sí:

- el de la intensidad eléctrica E (eje z)
- el del campo magnético H (eje y)



Ondas electromagnéticas

La propagación de las experimentan variaciones electromagnéticas en el medio por a un cambio litológico dentro del suelo o un cambio de humedad, se producen diversos efectos:

- Generación de nuevos campos electromagnéticos. La componente magnética de la onda incidente (campo primario) provoca corrientes alternativas en el subsuelo (litologías conductoras) que generan por sí solas un campo electromagnético secundario. Se estudian las distintas relaciones entre los campos primario y secundario: amplitudes, retrasos de fases, decaimiento, etc.
- Propagación (ondulatoria). La propagación de ondas electromagnéticas en medios heterogéneos genera también ondas en las interfases electromagnéticas con geometrías y modos de propagación regidas por los principios de la óptica ondulatoria.

Técnicas aplicables en el interior del patrimonio

1- Equipos de ultrasonidos:

Se introducen ondas de sonido a alta frecuencia en el material, que se reflejan contra superficies o defectos. La energía de sonido reflejada se representa en función del tiempo, lo que permite visualizar una sección del defecto mostrando la profundidad de los reflectores.

Los resultados pueden aportarnos imágenes de alta resolución representando la intensidad de la señal o su tiempo de vuelo medido mediante un escáner controlado por ordenador.

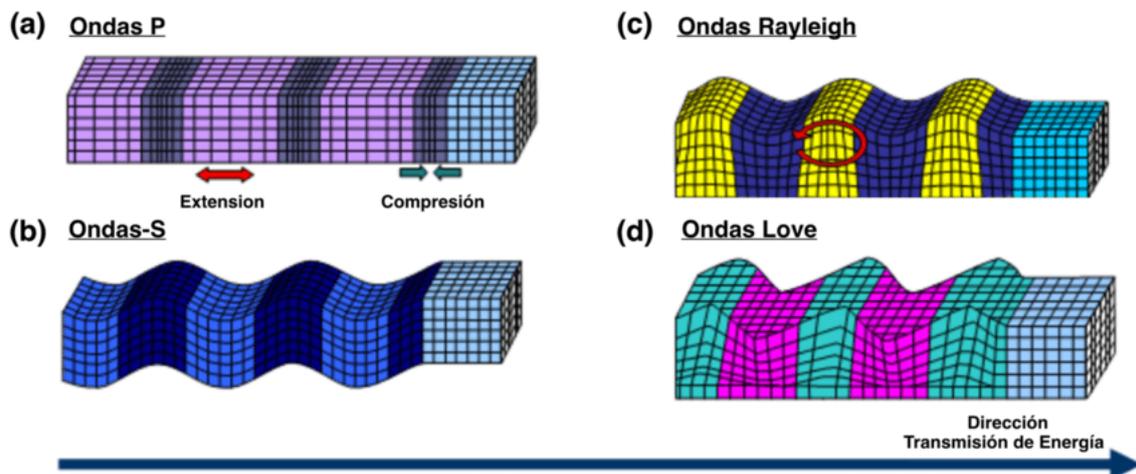
Por regla general cuanto más compacta sea una roca a más velocidad viajarán las ondas a través de ella. Esta característica comporta que las diferentes técnicas para proporcionar imágenes de la estructura e información cuantificada sobre el estado mecánico de los diferentes materiales.



Equipo para el ensayo de ultrasonido

El principio físico se basa en la propagación de la energía.

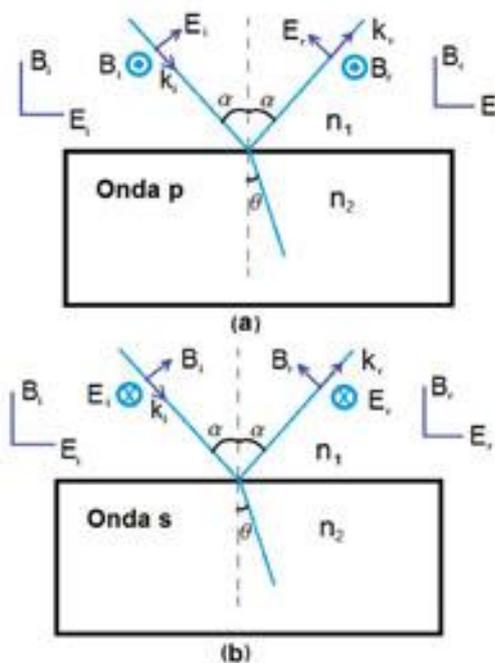
- Las ondas P o "push-pull" son ondas internas que se producen cuando la energía pasa a través de las partículas moviéndolas en la dirección de su propagación. Son las que viajan con más velocidad y lo pueden hacer a través de medios sólidos o fluidos.
- Las ondas S o "shear" son ondas internas que se producen cuando la energía pasa a través del medio moviendo las partículas en direcciones perpendiculares a la propagación. Son menos rápidas y este movimiento solo puede darse en los sólidos.
- Las ondas Love son ondas superficiales que hacen moverse a las partículas transversalmente a la dirección de la propagación. Son las más rápidas de las superficiales.
- Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que hace moverse a las partículas con un movimiento retrógrado en dirección a la propagación similar a las ondas marinas.



En la siguiente tabla se muestran algunas de las relaciones entre las ondas P y S en diferentes materiales:

Material	Velocidad ondas P	Velocidad ondas S
Aire	0,33	-
Petróleo	1,20-1,40	-
Agua	1,50	-
Lodo	1,50-1,60	-
Lutita	1,60-4,10	-
Arenisca	1,90-4,90	2,15
Caliza	1,90-3,50	1,35
Carbón	3,90-6,10	-
Sal	4,50	2,0-3,0
Dolomía	4,90-7,10	1,8-3,8
Yeso y anhidrita	5,70-6,20	2,0-3,0
Granito	5,20	3,00
Arenas	0,3-0,8	0,1-0,5
Morrenas glaciares	1,5-2,7	0,9-1,3

Cuando la onda interna encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una superficie que separa dos capas geológicas; parte de la energía continua en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios de dirección de propagación, de velocidad, y de modo de vibración. Las trayectorias internas más importantes que se generan a partir de un frente de ondas incidente se describen en las siguientes figuras:



La lectura de los tiempos de primeras llegadas y el espaciado entre los transductores proporcionan los datos necesarios para aplicar las ecuaciones de las trayectorias de los rayos críticos y calcular las velocidades de propagación de las ondas en cada capa que pueda existir por debajo del dispositivo experimental, así como su espesor.

Esquemáticamente el proceso consiste en:

- Toma de dato en los tiempos de primeras llegadas

- Se calcula un campo de velocidades inicial
- Calculamos los correspondientes tiempos teóricos de primeras llegadas

Para el cálculo del módulo elástico del material es necesario determinar las velocidades de propagación de las ondas P y de las ondas S. Aplicando la siguiente formulación obtendremos su valor:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \quad \sigma_{ij,j} + b_i =$$

$$(\lambda + \mu)u_{j,ji} + \mu u_{i,jj} + \rho b_i = \rho \ddot{u}_i$$

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

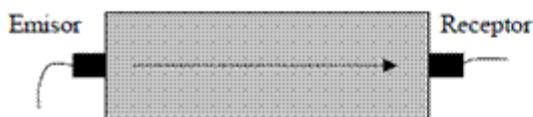
$$c_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

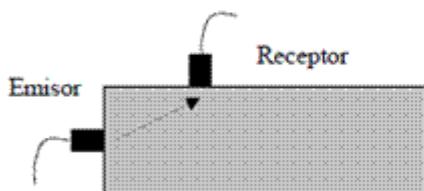
$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

En función de la disposición de los traductores distinguimos:

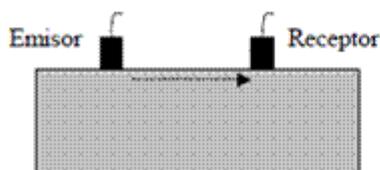
- Configuración directa: cuando los transductores se posicionan en caras opuestas.
- Configuración semidirecta: cuando los transductores se posicionan en caras adyacentes.
- Configuración indirecta: cuando los transductores se posicionan en la misma cara.



Configuración directa



Configuración semi-directa

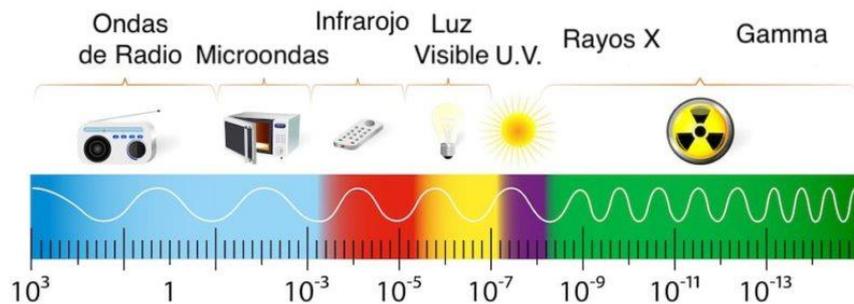


Configuración indirecta

2- Termografía infrarroja

Entre las técnicas no destructivas, los rayos infrarrojos (IR) termografía representa una herramienta valiosa para la investigación de estructuras arquitectónicas y ha tenido una amplia aplicación en el campo del patrimonio cultural también de la posibilidad de investigar grandes áreas en poco tiempo.

Esta técnica se basa en la propiedad de que cada cuerpo de manera espontánea emite radiación electromagnética infrarroja (región del espectro electromagnético entre la luz visible y las microondas, con un rango de longitudes de onda comprendido entre 0.75 y 10 μm), cuando llega a una temperatura dada.



Esquema del espectro electromagnético

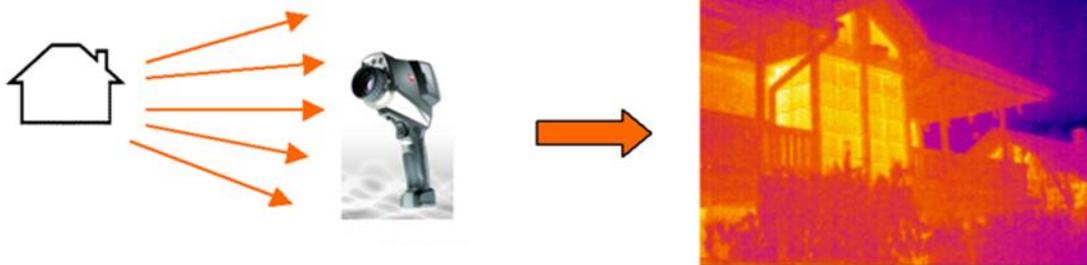
Las mediciones se llevan a cabo por el calentamiento del objetivo y el registro de la radiación infrarroja emitida durante su enfriamiento. La temperatura de cualquier superficie se ve influenciada por la propagación del calor interno, que a su vez está influenciado por las condiciones ambientales. Una variación de tales condiciones, ya sea natural o artificial, provoca un desequilibrio térmico que puede ser fácilmente visualizada a través de la termografía infrarroja.



Cámara térmica adaptable para dispositivo móvil.

Para el ensayo de termografía infrarroja es necesario la existencia de un gradiente térmico (generalmente diario y/o estacional) para inducir la respuesta térmica de las superficies. Se considera que una diferencia de 20 °C es satisfactoria, así, las medidas se tomarán sobre edificios que estén calientes a temperaturas ambiente frías.

La termografía es una técnica que, basada en los principios físicos de transmisión de calor, permite obtener a partir de la energía emitida por un objeto. El rango de infrarrojos, la temperatura superficial del mismo. Esta radiación es recogida por una cámara termográfica, a través de unos dispositivos ópticos, y trasformada en señales eléctricas. De esta forma se obtienen los llamados termogramas, mapas térmicos donde cada tono de color representa la temperatura de la superficie en ese punto, estableciéndose según un rango de valores las diferencias de temperaturas del objeto.



Esta radiación, definida físicamente mediante la ley de Stefan-Boltzmann, es proporcional a la temperatura del cuerpo y a las propiedades térmicas propias del material como la emisividad, que a su vez es función de la longitud de onda, de la temperatura y de ángulo de incidencia.

Así, objetos que tengan la misma temperatura superficial pueden aparecer con distintas temperaturas si tienen distintas emisividades.

$$Q_{\text{emitida}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \text{ W (vatios)}$$

Q_{emitida} : Componente emitida de la radiación total que fluye desde el cuerpo.

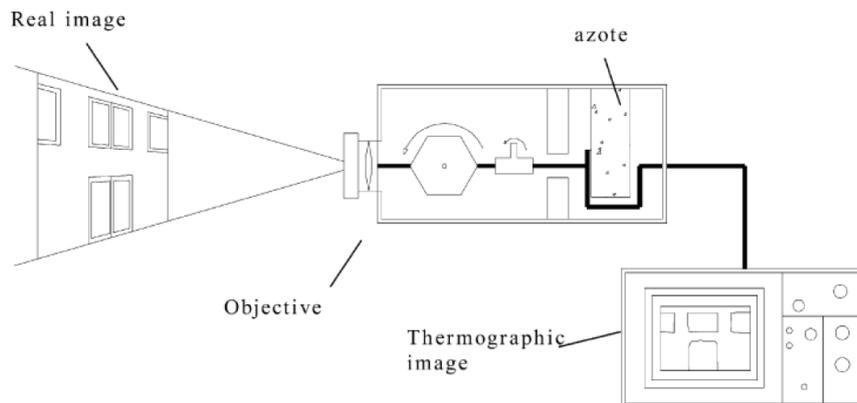
ε : Emisividad del material.

σ : $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann.

A_s : Área de superficie.

T_s : Temperatura de la superficie.

Podemos ver un esquema del funcionamiento de una cámara termográfica:



Esquema de funcionamiento de Binda, 2000

Tener en cuenta el momento del día también es importante. En función del tipo de edificio se realizarán:

- En edificios con muros de carga preferentemente después de anochecer. Por su espesor considerable almacenan calor, es por esto que al anochecer los muros de carga emiten más radiación térmica, ya que por la falta de radiación solar se produce un descenso de las temperaturas más acusado del resto de elementos.
- En edificios con estructuras internas es preferible al amanecer, ya que a esta hora del día el interior del edificio normalmente está a mayor temperatura que el exterior. El muro de fachada permanece todavía a baja temperatura lo que resulta en un mayor contraste interior-exterior.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los resultados que podemos apreciar con facilidad en una termografía:

Tipo de error	Ejemplo	En la termografía aparece como
Defecto de fábrica	Impurezas y bolsas de gas	Un "punto caliente" o "punto frío"
	Grietas en las celdas	Calentamiento de las celdas, con forma principalmente alargada
Daño	Grietas	Calentamiento de las celdas, con forma principalmente alargada
	Grietas en las celdas	Una parte de la celda aparece más caliente
Ensombrecimiento temporal	Contaminación	Puntos calientes
	Excrementos de pájaro	
	Humedad	
Diodo de derivación defectuoso (provoca cortocircuitos y reduce la protección del circuito)	N.a.	Un "patrón mosaico"
Problemas en las conexiones	Placa o hilera de placas sin conectar	Una placa o hilera de placas está constantemente más caliente.

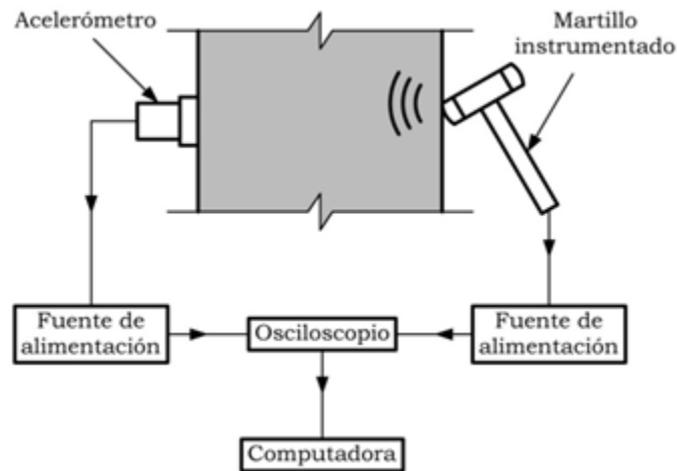
Aplicado en la construcción este sistema nos permite detectar defectos de manera rápida, algunos de los más destacables son:

Pérdidas de energía	Aislamiento defectuoso o ausencia de aislamiento	Fugas de aire	Humedad en el aislamiento, tejados y muros
Moho y áreas mal aisladas	Puentes térmicos	Filtraciones de agua en tejados planos	Roturas en tuberías de agua caliente
Fallos de construcción	Supervisar el secado de edificios	Averías en el tendido eléctrico y en la calefacción central	Fallos eléctricos

3- Resonancia

Además del ultrasonido existen otras técnicas de transmisión de pulso disponibles para estudiar el comportamiento de los materiales. Estas técnicas, vinculadas a pulsos generados por impactos mecánicos, presentan un contenido de frecuencia sensiblemente más bajo que el ultrasonido, que varía entre 1 y 10 kHz, y una mayor dispersión (Elhakam, A. et al).

La transmisión del pulso se inicia al impactar el martillo contra el material siendo recibido, al atravesar el material, por el acelerómetro, generalmente colocado en la cara opuesta a la cara donde se aplica el golpe (ASTM C-215):



Este debe ser acoplado a la superficie del material usando cera, grasa u otros productos comerciales para tal fin, con el objetivo de fijarlos y de maximizar la transmisión de energía. Las señales en el osciloscopio se estudian y grafican, para analizar cualquiera de los parámetros asociados al pulso recibido, como el tiempo o el contenido de frecuencia, que brindan información sobre la estructura interna del material.

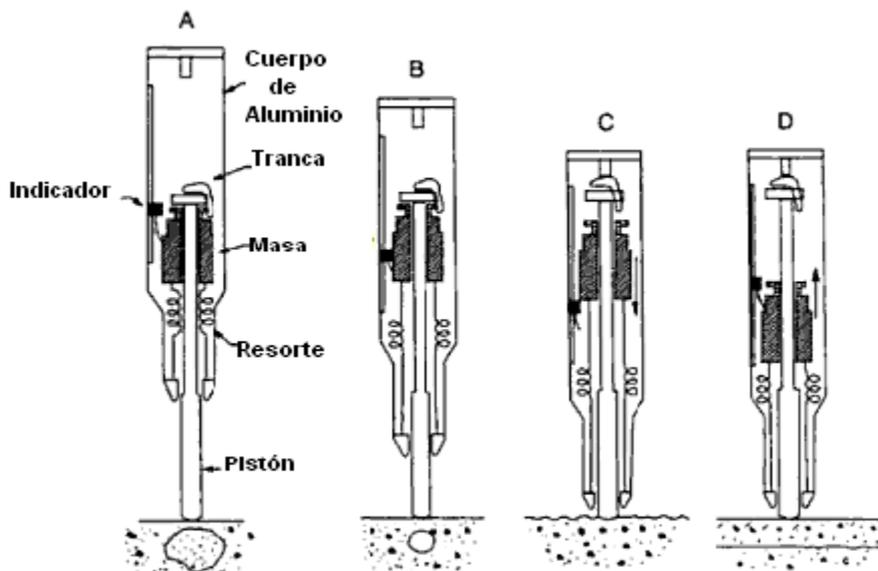
Diferentes modos de vibración pueden excitarse al ensayar probetas de morteros, pudiendo obtenerse así la frecuencia de vibración longitudinal y flexional. Luego es fácil calcular el módulo de elasticidad dinámico de la muestra ensayada.

4- Esclerometría

El esclerómetro o martillo Schmidt es un instrumento para la medición de la dureza superficial de distintos materiales empleados en la ingeniería civil. En este Proyecto fue usado el martillo Schmidt, marca Proceq de baja energía, tipo L, adecuado para la mampostería patrimonial o de baja calidad, mostrado en la Figura 3.14, que consiste en un pistón de acero endurecido unido a una pesa tensada con un resorte (ver Figura 3.15). Al presionar el equipo contra la mampostería el resorte se libera, impulsando la masa contra la superficie. El rebote de la masa es medido obteniéndose así un valor adimensionado en función de la dureza superficial del material, llamado número de rebote.



Martillo Schmidt



Principio de funcionamiento del Martillo Schmidt (por Morquio, Atilio; Aulet, Alina; Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Moltini, Gonzalo; Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola; Mussio, Gianella; Dalchiele, Enrique)

La principal aplicación del martillo Schmidt es la determinación de las variaciones en la condición de la mampostería y mortero a lo largo de la estructura. De manera rápida, sencilla y poco costosa pueden detectarse áreas deterioradas en las que sea necesario aplicar técnicas más complejas y probadas. La técnica es clasificada como no destructiva aunque suele dejar pequeñas marcas en la superficie de la mampostería, principalmente en ladrillos y morteros de baja calidad. (Método RILEM MS.D.2; ACI 228.1R; ASTM C805)

9. CONCLUSIONES

Tras este detallado análisis del estado actual y metodología de evaluación se procede al estudio del edificio in situ.

El conocer estas técnicas serán de ayuda para una toma eficaz de datos y una correcta interpretación de los resultados. Siendo la Evaluación no destructiva del patrimonio una parte esencial que formará parte del trabajo fin de máster de la autora de este documento.



10. BIBLIOGRAFÍA

Alina Aulet, « Evaluacion y control de estructuras del patrimonio arquitectónico nacional en mampostería aplicando técnicas no destructivas », s. f. https://www.researchgate.net/profile/AlinaAulet/publication/304011607_Evaluacion_y_control_de_estructuras_del_patrimonio_arquitectonico_nacional_en_mamposteria_aplicando_tecnicas_no_destructivas/links/576a906108aefcf135bd1fa2/Evaluacion-y-control-de-estructuras-del-patrimonio-arquitectonico-nacional-en-mamposteria-aplicando-tecnicas-no-destructivas.pdf

FLIR Systems y Centro de Formación de Infrarrojos (ITC). «*Guía sobre termografía para aplicaciones en edificios y energía renovable.*» FLIR Systems AB, 2011.

Lombillo, L., L. Villegas , D. Silió , C. Hoppe , y GTED-UC. «*Evaluación no destructiva del patrimonio construido.*» Ingeniería EStructural y Mecánica, Universidad de Cantabria, 2008

PANATEC. *Agua & Medio Ambiente*. s.f. <http://www.panatec-agua.com/>.

SCI. Control & Inspección. s.f. <https://scisa.es>.

Tavukçuoğlu, Ayşe. «*Non-Destructive Testing for Building Diagnostics and Monitoring: Experience Achieved with Case Studies.*» MATEC Web of Conferences 148, nº 01015 (2018).

Caez Pérez, JC, «*Caracterización y patología de la mampostería en la ciudad de Baranquilla*», 2004. S. f. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10167/u245496.pdf?sequence=1>

Javier Suárez , « Actuaciones en obras de mampostería con morteros de cal » - 09 junio, 2021

Morquio, Atilio; Aulet, Alina; Cetrangolo, Gonzalo; Domenech, Leandro; Moltini, Gonzalo; Sabalsagaray, Stela; Romay, Carola; Mussio, Gianella; Dalchiele, Enrique. «*Evaluación y control de estructuras del patrimonio arquitectónico nacional en mampostería cerámica aplicando técnicas no destructivas*»

Otros documentos:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5770834>

La petrologia..pdf (ucm.es)

https://oa.upm.es/9438/1/Tesis_master_Victor_Franco_Benito.pdf