

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO.

Ignacio Lombillo¹; Luis Villegas²; GTED-UC³.

¹ *Ingeniero de Caminos, C. y P. Doctorando UC (ignacio.lombillo@unican.es).*

² *Catedrático de Universidad. Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. (luis.villegas@unican.es).*

³ *Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander (gted@unican.es).*

1.- Introducción.

Las estructuras del patrimonio arquitectónico están sometidas a una serie de dificultades de diagnóstico y restauración, que limitan la aplicación de las disposiciones normativas y las pautas vigentes en el ámbito de la construcción. Ello hace tan deseable como necesario formular unas recomendaciones que garanticen la aplicación de unos métodos racionales de análisis y restauración.

En primer lugar cabe referir que la conservación, consolidación y restauración del patrimonio arquitectónico requieren un tratamiento multidisciplinar, enfocando la intervención desde el punto de vista de la integridad con el contexto cultural al que pertenece. Habitualmente, un equipo pluridisciplinar, cuya composición vendrá determinada por el tipo y la envergadura del problema, debe trabajar conjuntamente desde las primeras fases del proyecto, así como en el examen inicial del lugar y en la preparación del programa de investigación.

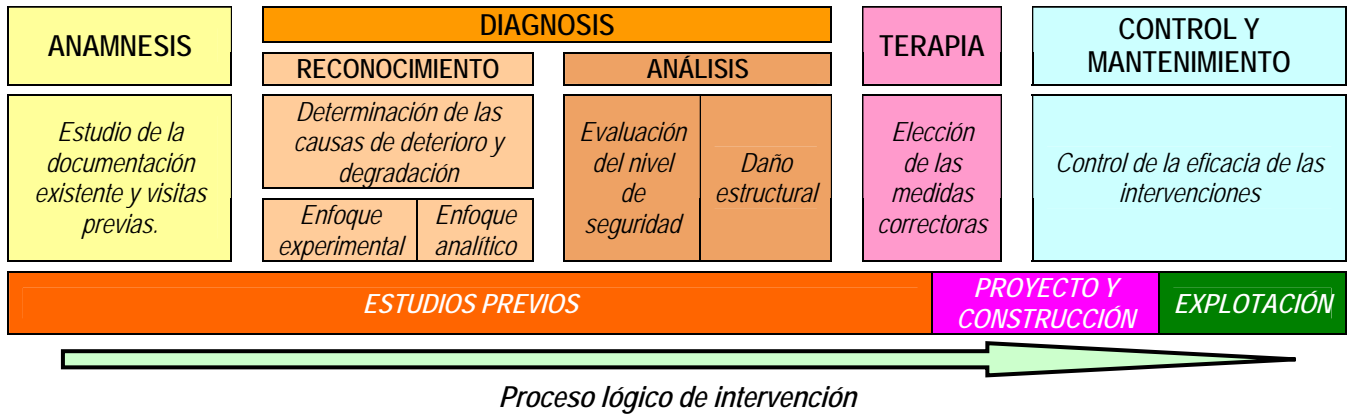
Merece la pena insistir en la idea de la multidisciplinaridad, se ha de plantear un enfoque que trascienda las simples consideraciones de una disciplina individual. Por ejemplo, un equipo bien coordinado puede favorecer que la investigación histórica descubra fenómenos sobre el comportamiento estructural, y en otras ocasiones las cuestiones históricas puedan responderse a partir del conocimiento del comportamiento estructural. Así pues, es importante contar con un equipo formado por investigadores que dispongan de una variedad de conocimientos adecuados en relación con las características del edificio y asimismo dirigido por alguien con la experiencia apropiada que sea capaz de articular todas las conclusiones obtenidas.

Existe una necesidad de poner en práctica metodologías que contribuyan a facilitar la comunicación entre los profesionales de diferentes campos del conocimiento implicados, para de esa forma disminuir la subjetividad inherente a cada profesional y evitando que, en función de los técnicos implicados, se planteen diferentes enfoques en los estudios (enfoque histórico, enfoque arquitectónico, enfoque arqueológico, enfoque ingenieril, etc.). De lo que se trata es de aprovechar las sinergias existentes entre los diferentes equipos participantes, quien más quien menos con conocimientos transversales con el campo del análisis, conservación y restauración del Patrimonio Construido, con la finalidad de obtener mayor número de datos de entrada y, por ende, enriquecer los contenidos y las conclusiones previas a la fase de intervención propiamente dicha.

Las peculiaridades que ofrecen las estructuras arquitectónicas, con su compleja historia, requieren que los estudios y propuestas se organicen en fases sucesivas y bien definidas, similares a las que se emplean en medicina (anámnesis, reconocimiento, diagnosis,

terapia y control), aplicados a la correspondiente búsqueda de datos reveladores e información.

Para conseguir un equilibrio óptimo entre el coste y los resultados, y producir el mínimo impacto posible en el patrimonio arquitectónico, utilizando los fondos disponibles de una manera racional, se hace normalmente necesario repetir estas fases de estudio dentro de un proceso continuado.



2.- Anámnesis.

En la fase de anámnesis¹ o de información es fundamental recabar información sobre la estructura en su estado original y en sus primeras etapas, las técnicas que se emplearon en la construcción, las alteraciones sufridas y sus efectos, los fenómenos que se han producido y, por último, sobre su estado actual.

El tipo de análisis desarrollado es eminentemente un **análisis cualitativo**, basado en la comparación entre la condición actual de la estructura y sus condiciones pasadas (análisis histórico), en la comparación entre la condición actual y la condición de otras estructuras similares cuyo comportamiento haya sido ya caracterizado, y en las vistas de aproximación desarrolladas.

2.1.- Investigación histórica (antecedentes).

El objetivo del estudio histórico es entender la concepción y la importancia del edificio, las habilidades y técnicas utilizadas en su construcción, los cambios que se hayan producido tanto en la estructura como en su entorno y finalmente los sucesos que puedan haber causado algún daño.

La historia es el laboratorio experimental más completo y opera, además, a escala real. La tarea del analista reside en desechar la información superflua e interpretar correctamente los datos pertinentes para describir el comportamiento estático y dinámico de la estructura. Puede constituir una indicación útil para estimar el nivel de seguridad en su estado actual. A pesar de tratarse de un factor importante que debe considerarse en el estudio del comportamiento futuro, el conocimiento de un comportamiento satisfactorio en el pasado no siempre constituye una guía fiable para predecir la seguridad y la supervivencia de una estructura.

Dentro de este apartado podríamos incluir el estudio de la documentación previa existente (antiguos proyectos, libros de fábrica, etc.).

¹ Conjunto de los datos clínicos relevantes y otros del historial de un paciente.

2.2.- Inspección visual de la estructura (visitas de aproximación) y experiencia previa.

Su finalidad reside en proporcionar una comprensión inicial de la estructura que, a su vez, permita enfocar apropiadamente las investigaciones posteriores.

El estudio de las alteraciones estructurales comienza con el levantamiento de los daños visibles (Figuras 1 y 2), de forma que pueda hacerse una idea sobre el comportamiento estructural. Es decir una evaluación de los síntomas de los procesos patológicos existentes.



Figura 1: Ficha para el levantamiento de daños visibles.

En esta fase se ha elaborado una toma de datos exhaustiva de los aspectos más característicos de la estructura, elaborando un reportaje fotográfico adecuado. La observación de las zonas donde se concentran los daños puede indicar posibles causas de los mismos.

La experiencia que se gana analizando y comparando el comportamiento de estructuras diferentes puede hacer viables las extrapolaciones y proporcionar las bases necesarias para evaluar el nivel de seguridad. Este análisis depende más del juicio personal que de procedimientos estrictamente científicos. Sin embargo, puede ser el análisis más racional en los casos en los que las incertidumbres inherentes a los problemas son tan

pronunciadas que otros tipos de análisis resultan más rigurosos y fiables sólo en apariencia. La fiabilidad de la evaluación dependerá del número de estructuras observadas y, por consiguiente, de la experiencia y conocimiento de las personas involucradas. Un programa de investigación apropiado y una monitorización de los fenómenos progresivos pueden aumentar el grado de fiabilidad del análisis.

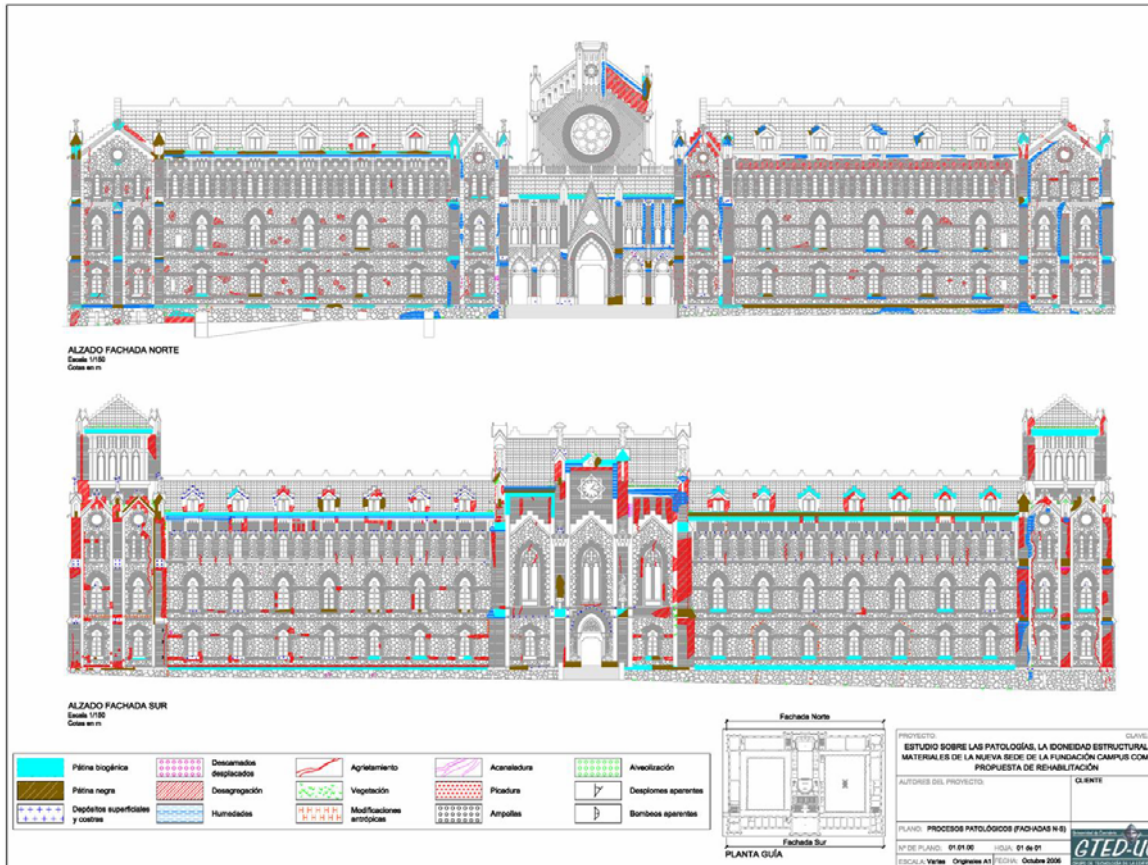


Figura 2: Levantamiento de procesos patológicos de las fachadas Norte y Sur del Seminario Mayor de Comillas

3.- Diagnóstico.

3.1.- Reconocimiento: identificación de causas.

La primera fase del diagnóstico consiste en identificar las causas del daño y del deterioro basándose en los datos obtenidos tanto a partir del **análisis cualitativo** de la fase de anámnesis, como del análisis cuantitativo propiamente de esta fase. Los primeros, análisis cualitativo, como ya se ha referido han de basarse principalmente en la observación de los daños estructurales y la degradación material, así como en la investigación histórica y arqueológica propiamente dicha; y los segundos, **análisis cuantitativo**, fundamentalmente en pruebas sobre los materiales y los elementos estructurales (campaña experimental), en la supervisión continua de los datos (monitorización) y en el análisis estructural (en muchos casos mediante modelización matemática).

El diagnóstico es a menudo una fase difícil, puesto que los datos disponibles normalmente se refieren a los efectos, mientras que es la causa o, más frecuentemente, son las distintas causas concomitantes lo que hay que determinar.

3.1.1.- Enfoque experimental

Desde el punto de vista de la tecnología de estructuras es **imprescindible conocer las geometrías, así como propiedades físicas y mecánicas de los diferentes elementos estructurales involucrados en una construcción**, para poder verificar la tolerabilidad de los niveles tensionales motivados por las acciones, y por ende discernir los coeficientes de seguridad y estimar la vida útil de las estructuras.

Como consecuencia, todos los esfuerzos encaminados a optimizar las metodologías experimentales existentes (ensayos in situ, preferentemente no destructivos y monitorización, preferentemente remota) se traducen de forma inmediata en una optimización de los resultados obtenidos con el empleo de las herramientas numéricas, ya que hay un desconocimiento generalizado de la tecnología de los materiales involucrados, sobretodo de las propiedades mecánicas, lo cuál hace que los modelos numéricos no deban contemplarse desde una visión eminentemente cuantitativa. De la misma forma además de contribuir a la obtención de dichos parámetros de entrada del modelo, de la forma menos destructiva posible, se pretende que las metodologías experimentales ayuden a calibrar dichos modelos matemáticos mediante la comprobación experimental de los resultados obtenidos por éstos en determinados puntos de control.

En la obra de fábrica el enfoque experimental debe identificar las características de los componentes de este material compuesto: las piedras (piedra caliza, arenisca, etc.) o ladrillos (cocidos o secados al sol, etc.) y el tipo de mortero (de cemento, de cal, etc.). También es necesario saber cómo están unidos los elementos (juntas secas, juntas de mortero, etc.) y la manera en la que se relacionan entre sí geométricamente. Pueden utilizarse distintos tipos de ensayos para determinar la composición de la pared (ensayos endoscópicos, acústicos, rádar, etc.).

3.1.1.1.- Investigación de campo y ensayos de laboratorio

Los ensayos normalmente tienen como objetivo identificar las características mecánicas (resistencia, deformabilidad, etc.), físicas (porosidad, etc.) y químicas (composición, etc.) de los materiales, las tensiones y deformaciones de la estructura y la presencia de cualquier discontinuidad dentro de la estructura.



Figura 3: Videoscopia a través de un agujero existente en una fábrica de arenisca.



Figura 4: Videoscopia a través de una perforación realizada en un mampuesto para obtener un testigo para ensayo en laboratorio.

Los ensayos no destructivos (figuras 3 y 4) son preferibles a los ensayos que impliquen alteraciones de la estructura; si no son suficientes, es preciso valorar el beneficio que se

obtendrá haciendo catas o pequeñas intervenciones en la estructura teniendo en cuenta la pérdida de material con valor cultural que ello pueda suponer. Si es posible deben utilizarse varios métodos y comparar los resultados.

Desde un punto de vista de caracterizar los materiales involucrados y el comportamiento de los diferentes elementos estructurales, cabe discriminar entre ensayos propiamente de laboratorio sobre muestras extraídas de material homogéneo, ensayos de laboratorio sobre material heterogéneo (bien para la caracterización de lo existente o para la caracterización del comportamiento futuro frente por ejemplo ante un refuerzo) y ensayos in situ no destructivos, o mejor dicho, ligeramente destructivos.

3.1.1.1.1.- Ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de material homogéneo.

Desde este punto de vista podemos discriminar en ensayos para caracterizar **químicamente** la muestra homogénea de material:

- Composición química elemental por energía dispersiva de rayos X (EDAX) (Figura 5).
- Análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido (Figura 6).
- Composición mineralógica por difracción de rayos X.
- Etc.

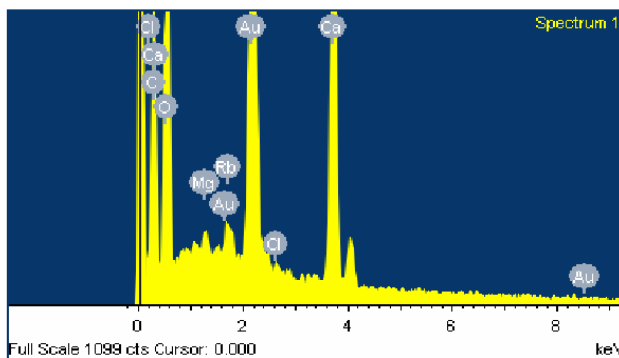


Figura 5: Composición química elemental por energía dispersiva de rayos X (EDAX) de una caliza del Palacio de Riva Herrera (Santander). Cortesía: LADICIM.

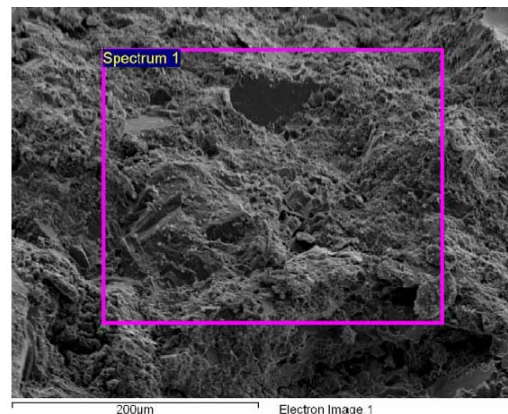


Figura 6: Análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido de una caliza del Palacio de Riva Herrera (Santander). Cortesía: LADICIM.

Para caracterizar sus **propiedades físicas** (figuras 7, 8 y 9):

- Densidades.
- Porosidades.



Figura 8: Cámaras de vacío para la saturación de muestras. Cortesía: LADICIM.



Figura 8: Pesado de muestras en balanza de precisión. Cortesía: LADICIM.



Figura 9: Secado en estufa de muestras hasta peso constante. Cortesía: LADICIM.

- Absorción.
- Caracterización de parámetros térmicos (coeficiente de dilatación térmica, conductividad térmica, etc.)
- Etc.

Para caracterizar sus **propiedades mecánicas**:

- Resistencia a compresión.
- Resistencia a tracción (Figura 10).
- Resistencia a flexotracción.
- Obtención del módulo de elasticidad (E) (Figura 11).
- Obtención del coeficiente de poisson (ν).
- Etc.



Figura 10: Ensayo brasileño (tracción indirecta) de un testigo de piedra caliza.



Figura 11: Ensayo para la obtención del módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de un mortero polimérico epoxi.

Evaluar el comportamiento del material frente a determinados mecanismos de alteración, es decir **propiedades relacionadas con la durabilidad**:

- Pérdida de masa y resistencia por hielo-deshielo (Figura 12).
- Ensayos de humedad-sequedad.
- Ensayos de abrasión.
- Ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina (Figura 13).
- Etc.



Figura 12: Testigos en el interior de la cámara frigorífica durante los ensayos de heladicidad. Cortesía: LADICIM.



Figura 13: Probetas en cámara para ensayo acelerado de corrosión por niebla salina. Cortesía: LADICIM.

3.1.1.1.2.- Ensayos de laboratorio sobre material heterogéneo.

Para obras de fábrica, por ejemplo:

- Ensayos de compresión simple: obtención de carga de rotura, módulo de elasticidad y coeficiente de poisson (Figuras 14 a 17).



Figura 14: Configuración general de un ensayo a compresión sobre una probeta de fábrica antigua de ladrillo macizo.

- Ensayos de compresión excéntrica.
- Ensayos de corte.
- Ensayos de flexión paralela a tendeles (Figura 17).
- Ensayos de flexión perpendicular a tendeles (Figura 18).



Figura 14: Ensayo a compresión de una fábrica cerámica



Figura 15: Ensayo en laboratorio a compresión de una probeta de fábrica antigua extraída de la construcción original



Figura 16: Ensayo a compresión de una fábrica de bloques



Figura 17: Ensayo de flexión paralela a tendeles de una fábrica cerámica



Figura 18: Ensayo de flexión perpendicular a tendeles de una fábrica cerámica

- Ensayos para **evaluar el comportamiento de posibles refuerzos** (Figuras 19 y 20) **o de comportamiento de sistemas estructurales basados en subsistemas independientes** (por ejemplo piedra – materiales poliméricos, Figuras 21 y 22).

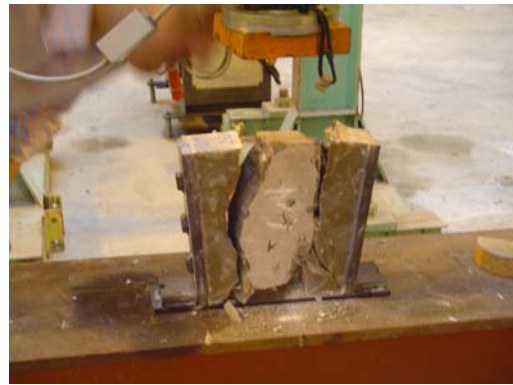


Figura 19: Ensayo para determinar la carga máxima a flexión en una probeta pétrea natural.



Figura 20: Ensayo para determinar la carga máxima a flexión en una probeta pétrea natural armada, frente a mecanismos de rotura a flexión y cortante, con acero inoxidable y mortero

polimérico.



Figuras 21 y 22: Ensayo para evaluar la tensión de adherencia a cortante entre una piedra caliza natural y un mortero polimérico epoxi

3.1.1.1.3.- Ensayos in situ.

Se trata de unos ensayos muy útiles para el subsector constructivo de la rehabilitación, en tanto que pueden orientar sobre las características de los elementos estructurales que interesen a escala real y en su localización real. Es preferible que se trate de ensayos no destructivos o ligeramente destructivos.

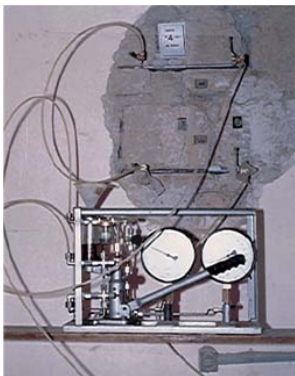


Figura 23: Ensayo de gato plano doble.



Figura 24: Martillo sónico.

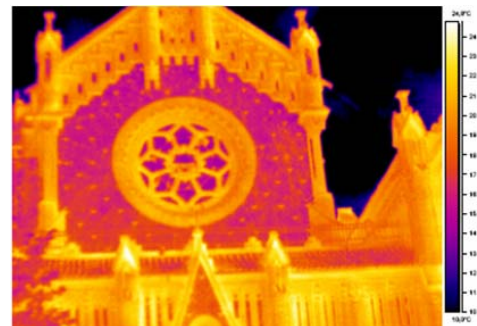


Figura 25: Termografía infrarroja en el Seminario Mayor de Comillas.

El objetivo de estos ensayos es variable. Desde el punto de vista de las estructuras de fábrica, los hay que tratan de obtener **valores cuantitativos de ciertos parámetros**:

ENSAYO	FUNDAMENTO	OBJETIVO
<i>Gato plano simple</i> (“Simple flat jack”)	Liberación de tensiones	Nivel tensional local asociado a un determinado plano.
<i>Gato plano doble</i> (<i>Double flat jack</i>) (Figura 23)	Ensayo a “compresión simple” de una probeta real de fábrica	Relación σ - ϵ . Módulo de deformación, coeficiente de poisson.
<i>Resistencia al corte de la junta de mortero</i> (“In situ shear test” o “push test”)	Ensayo a “corte”, bajo diferentes niveles de carga vertical, de una probeta real de fábrica	Índice de la resistencia in situ a corte en las juntas horizontales de fábricas sin reforzar. Relación ζ - σ .
“Hole drilling”	Tensiones residuales.	Nivel tensional. Posibilidad de obtención de tensiones principales. Posibilidad de obtención de estados a tracción.
<i>Dilatometría</i>	Registro de la presión suministrada y	Relación σ - ϵ en elementos de gran

		del incremento de volumen generado. La sonda ejerce una tensión radial conocida contra el material que la rodea. Relacionando esta tensión con la deformación medida en la misma dirección (a partir de consideraciones de variación volumétrica) se obtiene un índice del módulo de deformación de la fábrica en la zona de aplicación.	espesor. Módulo de deformación (módulo presiométrico).
Técnicas esclerométricas		Relacionan la resistencia del material con la penetración de un útil en su seno.	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del material (mortero, piedra, ladrillo, etc.).
“In situ bond test”		Aplicación de carga excéntrica	Proporciona una estimación de la resistencia a flexión de la junta de mortero.
“Pull out resistance”		Fuerza necesaria para el arrancamiento de un útil introducido en un tendel de la fábrica	Proporciona la resistencia al arrancamiento del mortero. Indirectamente proporciona la resistencia mecánica del mortero
“Drilling resistance”	Penetrómetro PNT-G	Correlacionar la resistencia del mortero de cal con la energía necesaria para reducirlo a arena	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del mortero.
	Taladro DRMS	Correlaciona la resistencia al avance con la resistencia mecánica. El uso del Par permite la corrección a la abrasión debida a la naturaleza distinta dureza de los áridos	Orden de magnitud de la resistencia y calidad del mortero.

Por el contrario los hay que proporcionan **órdenes de magnitud cualitativos** sobre la composición de los muros (en hojas de diferentes materiales), distribución de defectos, etc.:

ENSAYO	FUNDAMENTO	OBJETIVO
Endoscopia y videoendoscopia (Figuras 3 y 4)	Observar cavidades de difícil acceso de forma sencilla y precisa, con un grado de nitidez, fidelidad en la reproducción de los colores y luminosidad que resultan decisivos	Tamaño de defectos. Composición de las hojas de un muro. Etc.
Velocidad de pulso ultrasónico (ensayo directo o transparencia)	Medida del tiempo de propagación de la onda ultrasónica. Evaluación de elementos pétreos aislados (mampuestos o sillares de compacidad adecuada) o probetas extraídas de los mismos. No son adecuados para evaluar materiales muy heterogéneos (p. ej.: fábricas).	Estimación, mediante correlaciones, de propiedades físicas (densidad) y mecánicas. Rangos de velocidades relacionados con la calidad del material.
Velocidad de pulso sónico (ensayo directo o transparencia) (Figura 24)	Se mide el tiempo que toma el impulso para cubrir la distancia entre el transmisor y el receptor (tiempo de viaje) → Se deduce la V_{onda} . Más adecuado para evaluar materiales muy heterogéneos (p. ej.: fábricas).	Calificar la fábrica. Detectar la presencia de vacíos y defectos. Encontrar patrones de agrietamiento y modelos de daño. Controlar la eficacia de una inyección. Detectar cambios en las características físicas de los materiales
Impacto eco (sónico o	En un material heterogéneo, como la fábrica, se producirá una reflexión de	Calificar la fábrica.

<i>ultrasónico)</i>	<p>la onda acústica de llegada siempre que haya una discontinuidad del material, produciéndose una pérdida de velocidad respecto a la que se obtendría en un material homogéneo.</p> <p>Si se mide el tiempo de viaje (ida y vuelta), y si se conoce la velocidad de propagación de la onda puede determinarse la distancia a que se produce la reflexión (profundidad e intensidad de la interfase reflectora: defecto o cara opuesta)</p>	<p>Detectar la presencia de vacíos y defectos.</p> <p>Controlar la eficacia de una inyección.</p> <p>Detectar cambios en las características físicas de los materiales</p>
<i>Tomografía sónica o ultrasónica</i>	<p>Técnica computacional que utiliza un método iterativo para el procesado de una gran cantidad de datos</p> <p>La tomografía reproduce la estructura interna de un objeto a partir de medidas (sónicas o ultrasónicas) recogidas desde su superficie externa.</p>	<p>Mapa de distribución de velocidades acústicas en el interior de la fábrica.</p> <p>Permite zonificar la fábrica desde un punto de vista de su calidad, detectar la presencia de vacíos y defectos, controlar la eficacia de una inyección y detectar cambios en las características físicas de los materiales</p>
<i>Termografía infrarroja (Figura 25)</i>	<p>Las radiaciones infrarrojas del espectro electromagnético, invisibles al ojo humano, que todo cuerpo a temperatura superior al cero absoluto (-273.15 °C) se emiten en forma de calor, con una distribución espectral en función de la temperatura, de la composición del cuerpo y de su emisividad.</p>	<p>Localización de humedades.</p> <p>Identificación de estructuras ocultas.</p> <p>Localización de huecos cegados.</p> <p>Identificación de grietas.</p> <p>Localización de diferentes materiales.</p> <p>Etc.</p>
<i>Técnicas radar</i>	<p>Basada en el estudio de las reflexiones de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Los impulsos emitidos se reflejan entre los interfaces de materiales con propiedades dieléctricas diferentes como las superficies de un muro, huecos, inclusiones, etc.</p>	<p>Ámbito de la arqueología y paleontología: definición de zonas de excavaciones en yacimientos arqueológicos y paleontológicos, localización de vías, murallas, restos fósiles, etc.</p> <p>Localización de cavidades bajo superficies rígidas.</p> <p>Localización de tuberías de servicios y cables enterrados en medios urbanos</p> <p>Etc.</p> <p>En fábricas: localizar la posición de grandes vacíos e inclusiones de materiales diferentes como acero, madera, etc., identificar el estado de conservación o daño de estructuras, definir la presencia y nivel de humedad, controlar la eficacia de reparación por técnicas de inyección, descubrir la morfología de la sección de muros de múltiples hojas de piedra y/o ladrillo.</p>

3.1.1.2.- Monitorización

Entre las técnicas disponibles por parte de los técnicos para un mejor conocimiento de las estructuras se encuentra la instrumentación y monitorización de las mismas. Es una metodología no destructiva que permite mediante la colocación de una serie de referencias y equipos conocer como se deforman las estructuras en un periodo de tiempo.

La observación de la estructura durante un cierto período de tiempo puede ser necesaria no sólo para obtener información útil acerca de la existencia de fenómenos progresivos, sino también para el seguimiento de un proceso de renovación estructural de carácter secuencial. En este último caso, se monitoriza el comportamiento en cada fase (enfoque observacional) y los datos que se obtienen proporcionan la base para cualquier acción posterior.

Un conocimiento del comportamiento de la estructura, lo más real posible, permite a los técnicos emitir un adecuado diagnóstico de los problemas de las estructuras y permite definir soluciones que no aumenten el costo de las mismas y que no dañen de forma irreversible al monumento.

Puede discriminarse entre el control de estructuras mediante técnicas convencionales denominado manual (colocación de referencias y medida de las mismas con equipos portátiles), y el control remoto de estructuras. Con ambas técnicas se pueden obtener resultados similares, si bien la calidad de los datos, frecuencia de lecturas y flexibilidad en las mismas es superior en el caso de la remota. La medición manual se impone en casos de entidad menor, de menor puntos de lectura o bien cuando los recursos disponibles se encuentran más limitados.

3.1.1.2.1.- Monitorización manual.

La monitorización manual consiste en la colocación de una serie de referencias que se fijan a las zonas de la estructura a estudiar para su lectura manual mediante equipamiento portátil. En función del riesgo existente, la evolución de los daños, el objeto de la auscultación y de los recursos disponibles, el periodo de medida puede variar entre un máximo de tres meses y el mínimo que se desee, incluso con periodicidad diaria en situaciones de posible riesgo estructural.



Figura 26: Cinta de convergencia en proceso de lectura. Cortesía: LABEIN.



Figura 27: Torpedo inclinométrico con electrónica de medida

3.1.1.2.2.- Monitorización remota.

Como alternativa a la monitorización manual es posible la realización de una monitorización remota, bien mediante sensores convencionales, sensores inalámbricos, sensores basados en la tecnología del hilo vibrante o sensores de fibra óptica mediante medidas cuasi-distribuidas o distribuidas.



Figura 28: Extensómetro. Cortesía: LABEIN. Figura 29: Clinómetro. Cortesía: LABEIN.

Los datos que se obtienen con este sistema son mucho más numerosos y con mayor precisión. El estándar de medida habitual incluye en registro de datos dos veces al día durante el periodo de medición, de tal manera que resulta factible efectuar un seguimiento de mayor calidad, discriminando además los posibles efectos por variación de temperatura en una misma jornada. Así, al final del periodo de seguimiento, existen datos continuos de los movimientos, y que incluso, en aquellos casos en que sea de aplicación, pueden relacionarse fácilmente con las fases de ejecución de obras. De esta forma, podría valorarse en el comportamiento estructural la incidencia inmediata de la colocación de nuevas cubiertas, refuerzos, excavaciones, aperturas de huecos, etc.

DISPOSITIVO	OBJETIVO
<i>Testigos de fisuración</i>	Comprobar el progreso o no de fisuras.
<i>Referencia para fisuración en obra de fábrica</i>	Obtener la lectura de la separación entre las referencias mediante calibre.
<i>Extensómetros (Crackmeter) (Figura 28)</i>	Se emplean para la medición de la variación de espesor de fisuras
<i>Galgas extensométricas</i>	Registro de deformaciones
<i>Referencias de control de desplazamientos angulares</i>	Detectar variaciones en la inclinación.
<i>Referencias de nivelación</i>	Control de los posibles movimientos verticales que pueda sufrir la estructura.
<i>Cintas de convergencia (Figura 26)</i>	Se emplean para el registro de medida del movimiento relativo entre dos paramentos (fundamentalmente muros y pilares)
<i>Clinómetros (Figura 29)</i>	Se emplean para el registro de la inclinación de elementos estructurales (fundamentalmente muros y pilares)
<i>Inclinómetros (Figura 27)</i>	Controlar los posibles movimientos en el subsuelo. Con esta técnica se puede conocer las deformaciones en profundidad en el terreno, hecho especialmente interesante cuando pudieran existir patologías asociadas a movimientos del terreno o bien se prevén excavaciones en zonas cercanas.

3.1.2.- Enfoque analítico

Se trata de un procedimiento deductivo. Sin embargo, las incertidumbres que pueden afectar a la representación de las características de los materiales y del comportamiento estructural, junto con las simplificaciones adoptadas, pueden llevar a resultados que no siempre son fiables o que incluso están muy alejados de la situación real.

Los modelos matemáticos (Figuras 30 y 31) son las herramientas más frecuentemente utilizadas en el análisis estructural.

Los modelos que describen la estructura original, si han sido adecuadamente calibrados mediante procedimientos experimentales, permiten comparar el daño teórico producido por diferentes tipos de acciones con el daño observado en la realidad, y proporcionan así una herramienta útil para identificar sus causas.

Los modelos matemáticos de la estructura dañada y de la estructura reforzada ayudan a evaluar los niveles de seguridad actuales y valorar los beneficios de las intervenciones propuestas.

El análisis de la estructura es una herramienta indispensable. Incluso en los casos en los que sus resultados no puedan ser precisos, los cálculos y análisis pueden indicar el flujo de las tensiones y de las posibles zonas críticas.

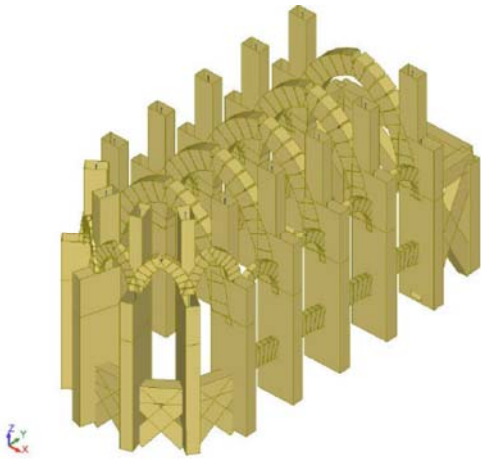


Figura 30: Modelo de barras de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

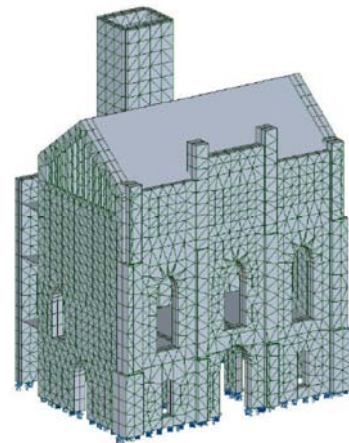


Figura 31: Modelo del volumen central sur del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

Todo modelo matemático debe tener en cuenta los tres aspectos siguientes:

3.1.2.1.- Geometría y Condiciones de Contorno.

De forma implícita al hablar de la geometría y de las condiciones de contorno nos estamos refiriendo al **esquema estructural**.

El comportamiento real de un edificio es normalmente tan complejo que obliga a representarlo como un “esquema estructural” simplificado. El esquema estructural muestra cómo el edificio transforma las acciones en esfuerzos y asegura la estabilidad. Por ello es necesario:

- Disponer de una **caracterización geométrica** lo más fiel posible a la realidad para optimizar en lo posible el modelo. Para realizar el levantamiento geométrico existen técnicas como las de la topografía clásica, la fotogrametría y el láser escáner 3D (Figura 32).

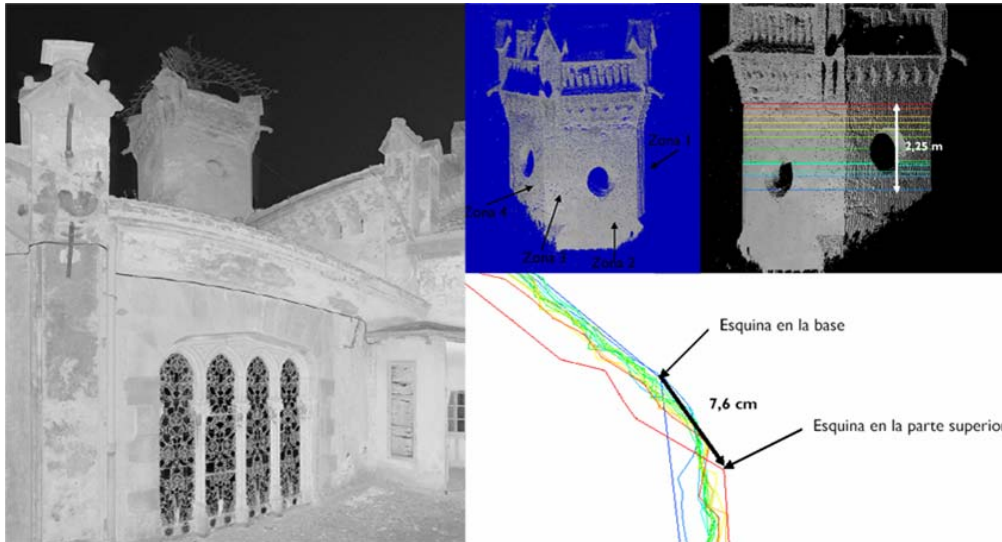


Figura 32: Técnica de láser escáner 3D aplicada en el Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: GIM GEOMATICS.

- Conocer la **tipología (composición) de los diferentes elementos estructurales** involucrados: hojas en las que se descompone un muro, etc. Dicho conocimiento hay que tratar de obtenerlo de la forma menos intrusiva posible, es decir empleando metodologías como la endoscopia o videoendoscopia, técnicas acústicas y técnicas rádar.
- De la misma forma es condición necesaria el proceder a realizar un estudio geotécnico (Figuras 33 y 34) previo con la finalidad de conocer la condición de contorno que constituye el terreno de cimentación para la estructura (establecer la tipología de la cimentación, las condiciones generales de cimentación y su relación con las patologías estructurales existentes), y la respuesta del mismo ante las cargas transmitidas por la estructura.



Figura 33: Calicata para conocer las condiciones de cimentación de un muro. Cortesía: TRIAX.

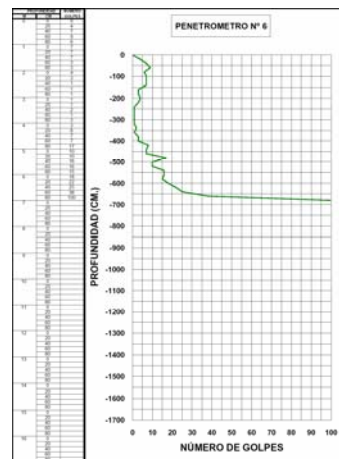


Figura 34: Registro de un penetrómetro. Cortesía: TRIAX.

- De la misma forma es necesario tener un conocimiento certero de las **interfases existentes entre los diferentes elementos estructurales** (por ejemplo el encuentro de forjados en muros para evaluar el grado de empotramiento de éstos en la estructura portante de fábrica) que componen el esquema estructural global.

3.1.2.2.- Resistencia de los elementos estructurales involucrados.

La resistencia de los elementos estructurales está íntimamente relacionada con las características de los materiales intervinientes. Como ya se ha mencionado al referirnos al enfoque experimental cuantitativo, es necesario conocer las características de los materiales (particularmente las de carácter mecánico), en tanto que son parámetros básicos para realizar cualquier cálculo. Por ello que cuanto más fidedigno sea su conocimiento, mejores resultados obtendremos del modelo matemático.

3.1.2.3.- Acciones a las que está sometida la estructura.

Finalmente es de crucial importancia disponer de un conocimiento lo más exhaustivo posible de las acciones involucradas en una determinada construcción.

De forma general las acciones pueden dividirse en acciones mecánicas que afectan a la estructura y acciones biológicas, físicas y químicas que afectan a los materiales.

Las **acciones mecánicas** que actúan sobre la estructura producen esfuerzos y tensiones en los materiales, y pueden tener como resultado grietas, fisuras, aplastamientos y movimientos visibles. Pueden ser:

- **Acciones estáticas**, que a su vez pueden ser de dos tipos:
 - **Acciones directas**, esto es, las cargas aplicadas. Pueden producir un incremento de las tensiones y, por lo tanto, causar daños en la estructura. Las acciones directas incluyen las cargas muertas (peso propio del edificio, etc.) y las sobrecargas de uso (mobiliario, personas, nieve, etc.).
 - **Acciones indirectas**. Se trata de acciones como los asentamientos del terreno, movimientos térmicos, fluencia, retracción del mortero, etc. Producen fuerzas sólo si las deformaciones no tienen libertad para desarrollarse.
- **Acciones dinámicas**. Las acciones dinámicas se producen cuando se transmiten aceleraciones a una estructura, debido a vibraciones (asociadas al tráfico rodado, a obras próximas, etc.), terremotos, viento, etc.

Las **acciones químicas, físicas y biológicas** son de naturaleza completamente diferente. Actúan sobre los materiales cambiando sus propiedades y, por ende, pudiendo afectar a la resistencia de los materiales si el cambio referido induce un deterioro de los mismos.

3.2.- Análisis de su situación.

El análisis de la situación en que se encuentra la estructura, tanto en su actualidad como en las condiciones futuras, en otras palabras, la **evaluación del nivel de seguridad**, debe determinar, a partir de un análisis de la condición actual de la estructura y los materiales, si los niveles de seguridad son aceptables o no.

En base al nivel de seguridad evaluado se toman las decisiones respecto a la necesidad y el alcance de cualquier medida terapéutica.

Por una parte los códigos legales y de práctica profesional actuales adoptan un enfoque conservador que supone una aplicación de factores de seguridad que tienen en cuenta las diversas incertidumbres. Este enfoque es apropiado para las estructuras nuevas, en las que la seguridad puede mejorarse con incrementos modestos del tamaño de las secciones y el coste de los elementos. Sin embargo, tal enfoque resulta inapropiado en estructuras históricas, en las que los requisitos para mejorar la resistencia pueden conducir a una pérdida de fábricas históricas o a alteraciones en la concepción original

de la estructura. En las estructuras históricas es preciso adoptar un enfoque más amplio y flexible para relacionar más claramente las medidas terapéuticas con el comportamiento estructural real y para mantener el principio de mínima intervención.

Por otra, los métodos de análisis estructural utilizados para construcciones modernas pueden no ser ni exactos ni fiables cuando se aplican a estructuras históricas, lo cual puede llevar a tomar decisiones incorrectas. Así pues, un enfoque cuantitativo basado en modelos matemáticos no puede ser el único procedimiento utilizado. Como en la fase de diagnóstico relativa a la identificación de causas, también debe partirse de enfoques cualitativos basados en la investigación histórica y en la observación de la estructura.

Otra situación podría ser la relacionada con la existencia de daño estructural. El daño estructural se produce cuando las tensiones producidas por una o más acciones exceden la resistencia de los materiales en zonas significativas, ya sea porque las propias acciones han aumentado (por ejemplo cambio de uso de una construcción) o porque la resistencia de los materiales se ha visto reducida (procesos de deterioro en general asociado a acciones químicas, físicas y biológicas). Los cambios sustanciales en la estructura, incluso las demoliciones parciales, también pueden ser una fuente del daño.

Para identificar las causas del daño, en obras de fábrica, resulta útil un análisis de la distribución de las tensiones. Para entender la causa del daño (primera fase del diagnóstico) en primer lugar es necesario determinar los niveles y la distribución de las tensiones, aunque sea de manera aproximada (Figuras 35 y 36). Dado que las tensiones son normalmente muy bajas, errores pequeños en su evaluación no afectan de manera significativa al margen de seguridad. Una inspección visual detallada del cuadro fisurativo puede proporcionar una indicación de las trayectorias de las cargas en la estructura.

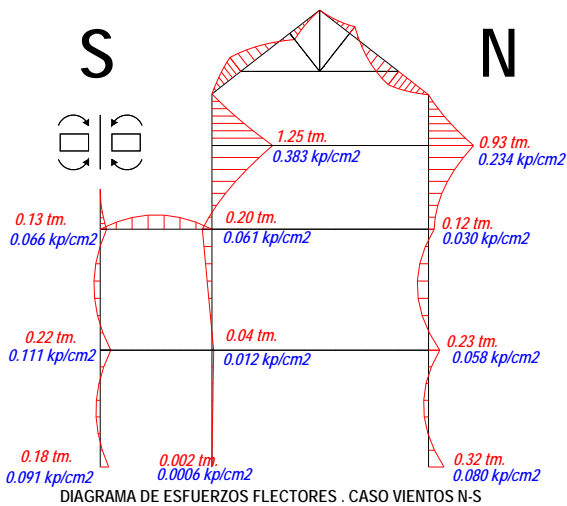


Figura 35: Modelo de barras de una de las secciones transversales del Seminario Mayor de Comillas.

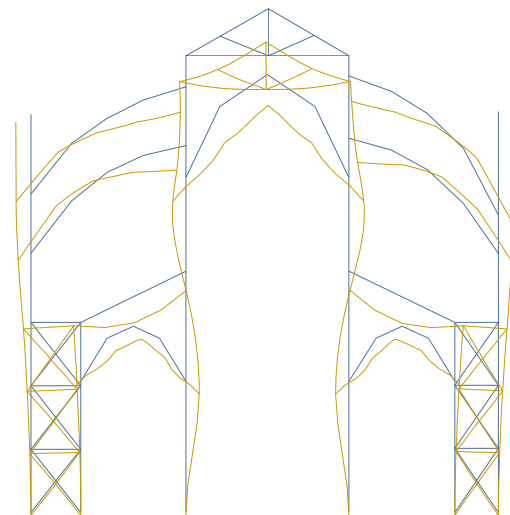


Figura 36: Modelo de barras de la sección transversal de la Iglesia de Santa María de Castro Urdiales

Cuando las tensiones en áreas significativas se aproximen a la resistencia máxima, es preciso realizar un análisis más exhaustivo de la estructura (Figuras 37 y 38) o ensayos específicos para conocer las tensiones existentes en la obra de fábrica (ensayo de gato plano, hole drilling, etc.) con el fin de obtener una valoración más precisa del margen de seguridad.

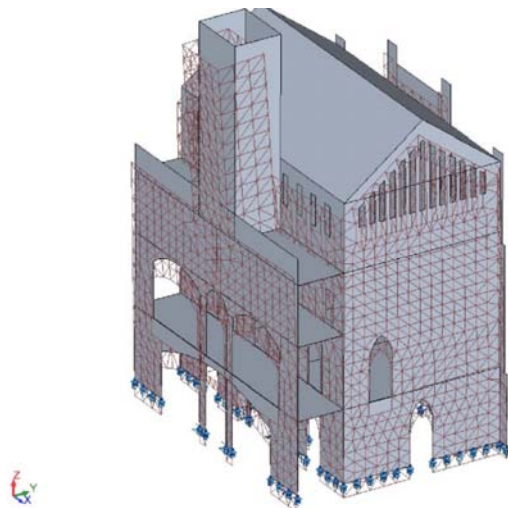


Figura 37: Comportamiento del cuerpo central sur del Seminario Mayor de Comillas. Cortesía: DYNAMIS.

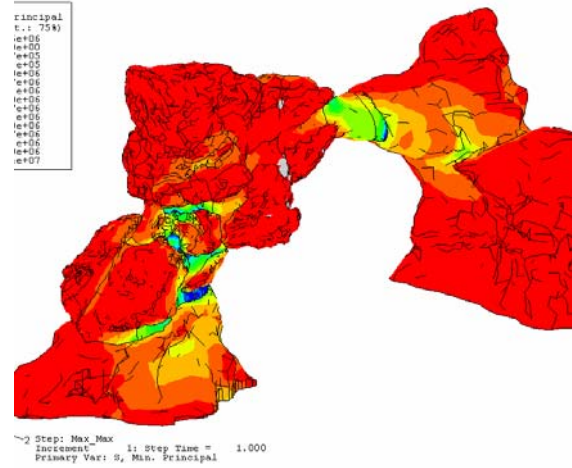


Figura 38: Modelo numérico del arco de la isla Horadada de Santander. Cortesía: GCAE.

Concretando, en la evaluación de la seguridad estructural, que constituye la última fase de la diagnosis, y en la que se determina la necesidad de aplicar una medida terapéutica, se deben estudiar conjuntamente las conclusiones de los análisis cualitativos y cuantitativos: la observación directa, la investigación histórica, el análisis estructural y, en su caso, los resultados experimentales y las pruebas que se hayan realizado.

4.- Terapia

La terapia ha de contemplarse bien cuando el nivel de seguridad que ofrece la estructura no sea suficiente o cuando exista un daño estructural, debiendo de estar dirigida a las raíces del problema (causa diagnosticada de un determinado proceso patológico) más que a los síntomas existentes. Es decir frente a un muro de carga agrietado la solución terapéutica adoptada no debe ser únicamente el relleno sistemático de grietas, sino que además de lo referido, previamente, habrá que actuar sobre la causa generadora del proceso patológico, por que sólo actuando sobre la causa se resolverá el problema.

El proyecto de intervención deberá basarse en una comprensión clara de la clase de factores que causaron el daño y la degradación, así como de los que hayan de tenerse en cuenta para analizar la estructura tras la intervención, puesto que el proyecto debe realizarse en función de todos ellos.

De la misma forma en el proyecto de intervención hay que tener en cuenta que el valor del patrimonio arquitectónico no reside únicamente en su aspecto externo, sino también en la integridad de todos sus componentes como producto genuino de la tecnología constructiva propia de su época. Bajo este punto de vista, el vaciado de las estructuras internas de una construcción para mantener solamente las fachadas, su piel, no responde al criterio de conservación aludido.

Siempre que sea posible, las medidas que se adopten deben ser “reversibles”, es decir, que se puedan eliminar y sustituir por otras más adecuadas y acordes a los conocimientos que se vayan adquiriendo. En el caso de que las intervenciones practicadas no sean completamente reversibles, al menos no deberán limitar la posible ejecución de otras posteriores.

Deben determinarse todas las características de los materiales (especialmente cuando son nuevos) que vayan a utilizarse en una obra de restauración, así como su compatibilidad con los existentes. En ese estudio deben incluirse los impactos a largo plazo, a fin de evitar efectos secundarios no deseables.

Cada intervención debe respetar, en la medida de lo posible, el concepto, las técnicas y los valores históricos de la configuración primigenia de la estructura, así como de sus etapas más tempranas, y debe dejar evidencias que puedan ser reconocidas en el futuro.

La intervención debe responder a un plan integral de conjunto que tenga debidamente en cuenta los diferentes aspectos de la arquitectura, la estructura, las instalaciones y la funcionalidad.

Las estructuras arquitectónicas deterioradas deben ser reparadas, y no sustituidas, siempre que resulte factible.

Deberán mantenerse las imperfecciones y alteraciones que se hayan convertido en parte de la historia de la edificación, siempre que no atenten contra las exigencias de la seguridad.

5.- Control y mantenimiento.

Cualquier propuesta de intervención debe ir acompañada de un programa de control que, en la medida de lo posible, deberá llevarse a cabo mientras se ejecuta la obra.

De la misma forma, una vez finalizada la intervención debe programarse un mantenimiento efectivo de la construcción que vele por la integridad de la misma en la fase de explotación futura, y es que la aplicación de medidas de mantenimiento de índole preventiva es la mejor estrategia terapéutica.

RECONOCIMIENTO

Los autores de este artículo técnico desean agradecer a las entidades que se citan seguidamente el habernos confiado los “Estudio previos” a la rehabilitación de edificios de su propiedad y de los cuales se han recogido la mayoría de las fotografías y dibujos que ilustran el presente artículo:

- Empresa de Residuos de Cantabria, S.A. (Empresa pública del Gobierno de Cantabria).
- Excmo. Ayuntamiento de Santander.
- Medio ambiente, Agua, Residuos y Energía, S.A.: MARE. Empresa pública del Gobierno de Cantabria, adscrita a la Consejería de Medio Ambiente.
- Sociedad de Activos Inmobiliarios Campus Comillas, S.L.