



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y MECÁNICA

TESIS DOCTORAL

**INVESTIGACIÓN TEÓRICO – EXPERIMENTAL SOBRE
ENSAYOS LIGERAMENTE DESTRUCTIVOS (MDT)
UTILIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA
IN SITU DE ESTRUCTURAS DE FÁBRICA DEL
PATRIMONIO CONSTRUIDO**

Autor

IGNACIO LOMBILLO VOZMEDIANO
INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Director

PROF. DR. LUIS VILLEGAS CABREDO
DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SANTANDER, MAYO DE 2010

1

INTRODUCCIÓN, ALCANCE, NECESIDADES, OBJETIVOS, METODOLOGÍA, PLAN DE ENSAYOS Y ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

1.1 Introducción: Metodología de intervención en construcciones del Patrimonio construido.

La conservación del patrimonio cultural esta considerado como un principio fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas. En los últimos años, se han realizado extensas investigaciones en torno a esta área, conduciendo a desarrollos en la inspección, ensayos no destructivos, monitorización y análisis estructural de monumentos (Gregorczyk y Lourenço 2000).

Por otra parte, el análisis de construcciones antiguas formula importantes desafíos dada la complejidad de su geometría, la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, las diferentes técnicas de construcción, la ausencia de conocimiento sobre los daños existentes, y de cómo afectan determinadas acciones a las construcciones a lo largo de su vida (Roca 2007). Dichos desafíos suponen que las construcciones del patrimonio arquitectónico estén 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 general de la construcción. Y es por todo ello que la comprensión, el análisis y la reparación de construcciones históricas continúa siendo uno de los desafíos más importantes de los técnicos modernos (Lourenço et al. 2008).

Hasta recientemente, era normal llevar a cabo una intervención sin dedicar recursos adecuados (tiempo y dinero) al estudio de las razones de porqué se requería la intervención. Conviene recurrir, por primera vez, a la analogía con la Medicina: ¿sería razonable operar a un enfermo sin tener constancia objetiva plena del mal que adolece?, en ese caso ¿porqué intervenimos en nuestra herencia cultural sin tener conocimiento contrastado de las causas desencadenantes de sus procesos patológicos?

Lo referido ha conducido a desarrollar intervenciones agresivas, traducidas en una disminución del valor histórico de la construcción, o intervenciones inadecuadas que no resuelven el problema requerido. Afortunadamente, esta actitud ha cambiado, siendo dedicada más atención a los trabajos de inspección y diagnosis. De hecho, los costes envueltos en la inspección y diagnosis son fácilmente recuperados en la intervención en si misma (Lourenço et al. 2008 y 2001).

En base a las justificaciones apuntadas, es tan deseable como necesario formular unas recomendaciones que garanticen la aplicación de unos métodos racionales de análisis y terapéutica.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Otro aspecto importante a remarcar, a modo de llamada de atención a los estructuristas, se relaciona con que el análisis estructural no constituye más que uno de los varios aspectos que habitualmente integran el estudio completo de una construcción antigua (junto con la inspección, exploración histórica y constructiva, experimentación en laboratorio o in situ, y otros). Por este motivo, y antes de abordarse de forma aislada, el análisis estructural debe plantearse desde una perspectiva de conjunto y en combinación con el resto de actividades. Es preciso tener presente que el análisis resistente de la estructura constituye tan sólo uno de los múltiples elementos o actividades que un estudio dirigido a la restauración o rehabilitación de una construcción puede despertar (Roca 2007).

Como consecuencia de lo comentado, el problema de la reparación y rehabilitación debería ser aproximado desde un punto de vista multidisciplinar, considerando aspectos complementarios que incluyen: la evolución histórica de los edificios, geometría, patrones de agrietamiento, características de los materiales, tecnología de la construcción, posibles mecanismos de fallo, etc. (Penazzi et al. 2000). A este respecto, la colaboración entre arquitectos, restauradores, historiadores e ingenieros estructurales, es fundamental. En este sentido se manifestaron Binda et al. (2000a), a colación con los estudios realizados para la rehabilitación del “Torrazzo” de Cremona (Italia): “La multidisciplinariedad en el método de trabajo se convierte en la clave fundamental para el desarrollo exitoso de la investigación”.

Como primera conclusión 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 multidisciplinar, 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.

Así pues, es importante contar con un equipo formado por investigadores que dispongan de una variedad de conocimientos adecuados en relación con las características de la construcción y asimismo dirigidos por alguien con la experiencia apropiada que sea capaz de articular todas las conclusiones obtenidas.

El Técnico Director (Arquitecto o Ingeniero) es aquel profesional capacitado para dirigir las diferentes etapas de una rehabilitación con la colaboración de un equipo multidisciplinar. Sin embargo, la complejidad de una rehabilitación cuidadosa implica que dispongan de una preparación y sensibilidad especial y que paralelamente estén abiertos a la colaboración de expertos de diversas disciplinas (historiadores, antropólogos, restauradores, topógrafos, etc.).

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.

En Binda et al. (2009) se describe un procedimiento, dirigido a generar un conocimiento bien articulado sobre los materiales, la morfología y los aspectos constructivos de las estructuras de fábrica, sobre su comportamiento mecánico y los posibles mecanismos de fallo, aplicado a un caso concreto: la evaluación del complejo edilicio existente en Sulmona (L’Aquila), un importante centro histórico en el centro de Italia. Para ello fue configurado y aplicado un procedimiento multi-nivel. Bosiljkov et al. (2008) también se posicionan en este punto de vista. El método de intervención adoptado por los Autores desde comienzos de los años 90 (Binda et al. 1999) se basa en el principio de que el conocimiento previo es fundamental para la elección de las técnicas y materiales más adecuados aplicables a la preservación y prevención de daño del Patrimonio Cultural.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Este procedimiento ha sido adecuadamente calibrado en diferentes investigaciones in situ sobre edificios históricos de fábrica en la región de Umbria, después del terremoto de 1997 (Anzani et al. 2004), en la región de Liguria (Anzani et al. 2004), golpeada por terremotos durante el siglo XIX, o en el área del Lago de Garda (Anzani et al. 2007, Cardani et al. 2008) envuelta en el sismo del 2004.

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 (conocimiento, diagnóstico, terapia y control), y que éstos se apliquen a la correspondiente búsqueda de datos reveladores e información (Corres y León).

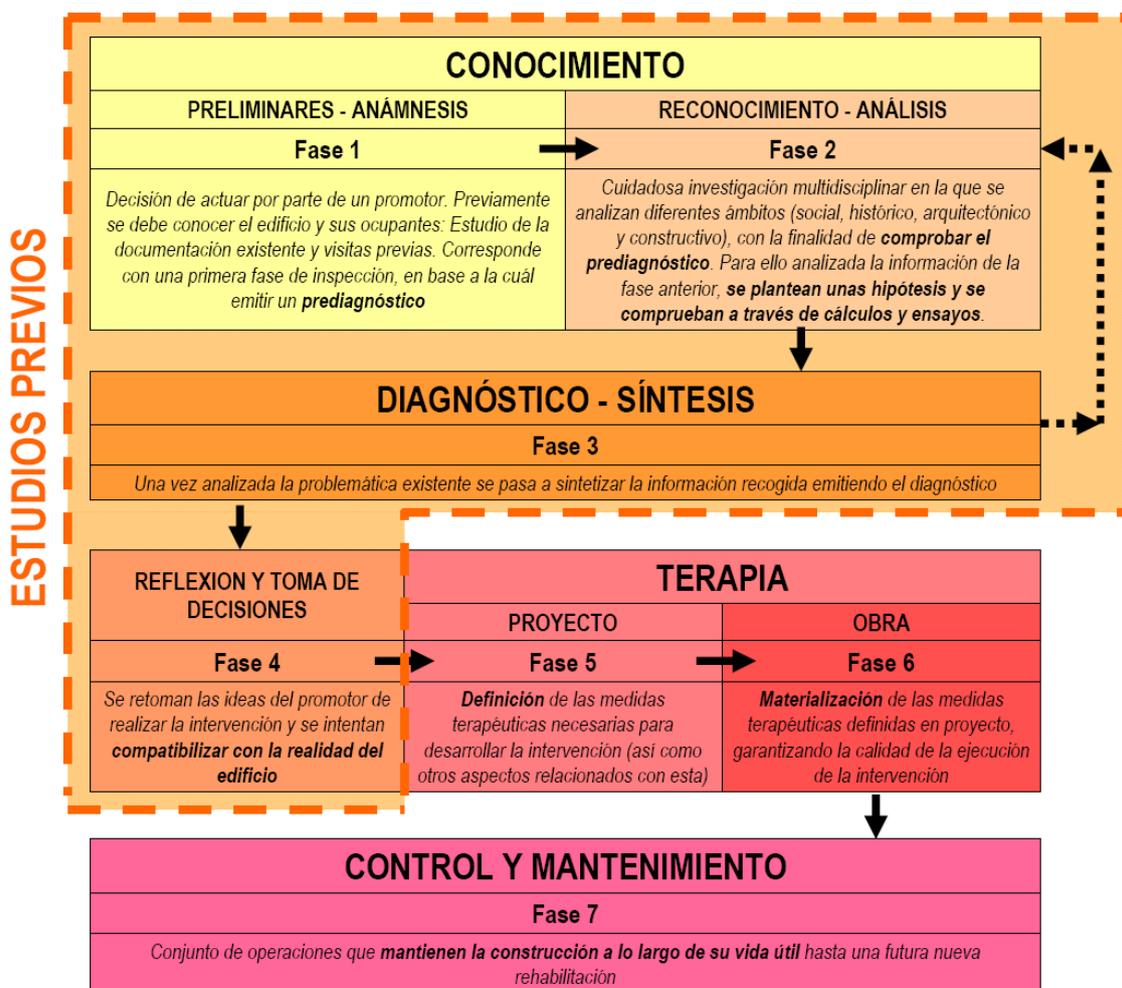


Fig. 1.1: Proceso metodológico propuesto para intervención en construcciones del Patrimonio Construido (Lombillo y Villegas 2008).

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. En la Fig. 1.1 el autor, fruto de la complementariedad de las ideas obtenidas en las extensas referencias que se citan a lo largo de esta tesis doctoral, propone y sintetiza una posible metodología. Es bien cierto que en cada construcción concreta se debe encontrar la escala y el nivel de profundidad de cada una de las etapas propuestas en esta metodología. Así, en lo que sigue se muestra un planteamiento genérico de máximos que debe adaptarse a cada caso concreto (RehabiMed 2007).

Cabe señalar que actuar con estos principios implica una ardua tarea de sensibilización. En primer lugar de los mismos técnicos, porque el grueso de su formación universitaria está basado en la construcción de obra nueva y técnicas industrializadas difícilmente compatibles con la construcción vernácula heredada; y en paralelo de la colectividad, porque es imprescindible que

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

ella misma reconozca el valor testimonial de su herencia arquitectónica. En este sentido, es importante proponer mecanismos de participación activa de la comunidad en la toma de decisiones.

Finalmente, referir que el proceso metodológico propuesto en la Fig. 1.1 está en línea con la metodología propuesta por ICOMOS (2001).

En lo que sigue, se propone un procedimiento secuencial (multi-nivel) compuesto de varias etapas consecutivas que arrancan con la decisión de actuar.

1.1.1 El conocimiento

Conocer la construcción y sus usuarios debe ser previo a toda intervención. La primera fase (**1. Anámnesis y preliminares**) recoge la decisión de actuar del promotor y se desarrolla a través de una prediagnóstico que realiza el técnico: una primera valoración objetiva de la propuesta y del objeto de intervención (la construcción y sus usuarios).

La complejidad de la construcción demanda habitualmente el inicio de una segunda fase de conocimiento (**2. Reconocimiento – Análisis**) basada en una cuidadosa investigación multidisciplinar en la que se analiza el objeto de estudio desde diferentes ámbitos (social, histórico-arqueológico, arquitectónico y constructivo), con la finalidad de comprobar de forma objetiva el prediagnóstico. Para ello, analizada la información de la fase anterior, se plantean unas hipótesis y se comprueban a través de cálculos y ensayos.

1.1.1.1 Anámnesis y preliminares

En la fase de anámnesis¹ o de información es fundamental recabar datos sobre la construcción. Esta etapa gira entorno a lo que se suele llamar la prediagnóstico, una fase de orientación objetiva al promotor.

Esta etapa implica una aproximación primaria global a la construcción, a sus valores (arquitectónicos, históricos, etc.) y a sus problemas (sean estructurales, de habitabilidad, etc.) mediante una primera inspección ocular, en la que la experiencia del técnico juega un papel fundamental. El tipo de análisis desarrollado es eminentemente un análisis cualitativo, basado en la comparación entre la condición actual de la construcción y la condición de otras construcciones de similares características cuyo comportamiento haya sido ya caracterizado, por ello que la experiencia es un factor muy importante, y en las visitas de aproximación desarrolladas. Su finalidad reside en proporcionar una comprensión inicial de la construcción que, a su vez, permita enfocar apropiadamente las investigaciones posteriores.

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. En este sentido conviene introducir la opinión manifestada por Indirli et al. (2006): “La observación de las reglas no escritas para la construcción de fábricas, elaboradas por los arquitectos y maestros de obra a lo largo de siglos de trabajos prácticos, deberían de guiar el proceso de rehabilitación”. Obviamente sin menoscabo para la aplicación de técnicas de diagnóstico.

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.

Toda la información coleccionada, así como los juicios referentes al estado de conservación preliminar del edificio y la propuesta de recomendaciones, se debe recoger en el informe de

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

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

prediagnosis. En este momento el cliente deberá decidir si sigue sus ideas iniciales o si se reformula el encargo.

Por otra parte, conviene referir que si el edificio está en buen estado y no se prevé ningún cambio importante se podría saltar directamente a la etapa 7 (Control y Mantenimiento), y proponer un plan de mantenimiento preventivo. Sin embargo, en la mayor parte de los casos se deberá acceder a una segunda etapa de estudios pluridisciplinarios antes de poder iniciar la intervención de rehabilitación propiamente dicha.

1.1.1.2 Reconocimiento – Análisis

Esta fase del proceso consiste en una recogida sistemática de información, con enfoque multidisciplinar, para llegar a un conocimiento profundo del objeto de estudio.

Tabla 1.1: Algunos de los estudios susceptibles de realizar en la fase de reconocimiento del proceso metodológico de intervención de una construcción.

Estudios de carácter social	Aspectos socioeconómicos Estudios antropológicos
Estudios de carácter histórico- arqueológicos²	Método histórico (historia oral, escrita, toponimia, etc.) Método arqueológico (arqueología muraria, estratigrafía, etc.)
Estudios en el ámbito arquitectónico	Levantamiento geométrico Levantamiento gráfico de materiales y técnicas constructivas Toma de documentación fotográfica y/o videográfica Reconocimiento de los valores arquitectónicos del edificio Estudio de las transformaciones sufridas por la construcción Consulta detallada del marco legal y urbanístico del edificio Etc.
Estudios en el ámbito constructivo	Reconocimiento físico-constructivo de todos los elementos de la construcción Levantamiento gráfico de los procesos patológicos ³ Identificación de causas Evaluación de la seguridad estructural del edificio Etc.

Es conveniente fijar los objetivos y unas primeras hipótesis a partir de los datos recogidos en el informe de prediagnosis y que se comprobarán a medida que avance el reconocimiento, mediante una campaña planificada de estudios, abordable y coherente, teniendo en cuenta los medios disponibles en cada caso (se debe ser plenamente consciente de la escala de la intervención). En este momento deberá quedar claro quién será el Director de todos los estudios.

Dentro de los estudios multidisciplinarios a realizar se encuentran los detallados en la Tabla 1.1.

² La historia es el laboratorio experimental más completo y opera, además, a escala real, si bien no hay que perder de vista que el conocimiento de un comportamiento satisfactorio en el pasado no siempre constituye una guía fiable para predecir la seguridad y la supervivencia de una construcción.

³ Aparecido el síndrome del patólogo de la construcción, a la vista de las lesiones, o de los síntomas si le avisaron a tiempo, trata de diagnosticar las causas que desencadenaron el mal. A este análisis se le conoce como estudio patológico o patología (Lozano y Lozano 1995). El Diccionario de la Lengua lo define como el "estudio de la naturaleza de la enfermedad a través de los cambios estructurales y procesos morbosos que presenta el enfermo". Por consiguiente la patología, como equivocadamente entendemos (en los informes se suele leer "el edificio presenta las siguientes patologías..."), no es una lesión sino todo lo contrario: el estudio de la naturaleza de la enfermedad.

Generalmente el patólogo de la edificación realiza una serie de visitas de inspección a fin de identificar las lesiones, independizarlas de otras y determinar su amplitud. Recaba después la información necesaria (planos de proyecto, de estructura, pliego de condiciones, detalles constructivos, libro de órdenes, resultados del control de calidad, cambios de uso, reformas, etc.) al tiempo que obtiene datos físicos sobre los síntomas (aparición, situación, evolución, morfología, extensión, etc.). Y de acuerdo con la relación causa/efecto, en base a experiencias anteriores (propias o adquiridas) y de su "ojo clínico" llega al prediagnóstico (Villegas y Lombillo 2007).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En este sentido, esta etapa precisa de un técnico habituado a los modos de construcción tradicionales de la región, disponiendo de una sólida formación científico-técnica de la patología de los edificios involucrados.

La aproximación a los problemas debe ser lo más científica posible: detección de lesiones, una primera hipótesis de las causas que las originan y comprobación de estas hipótesis. Así mismo, el técnico se ayudará de un conjunto de expertos (químicos, geólogos, biólogos, etc.), de ensayos (in situ y en laboratorio) y de técnicas de monitorización, que le permitirán identificar materiales, sus alteraciones eventuales, el seguimiento de fisuras, el ataque de insectos xilófagos, etc.

La primera fase del reconocimiento consiste en identificar los síntomas de los procesos patológicos existentes (Fig. 1.2) y las causas de daño y de 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. Dicho análisis cuantitativo se fundamenta en la realización de pruebas sobre los materiales y los elementos estructurales (campaña experimental), en la supervisión continua de los datos (monitorización) y en el análisis estructural (empleando modelos estructurales).

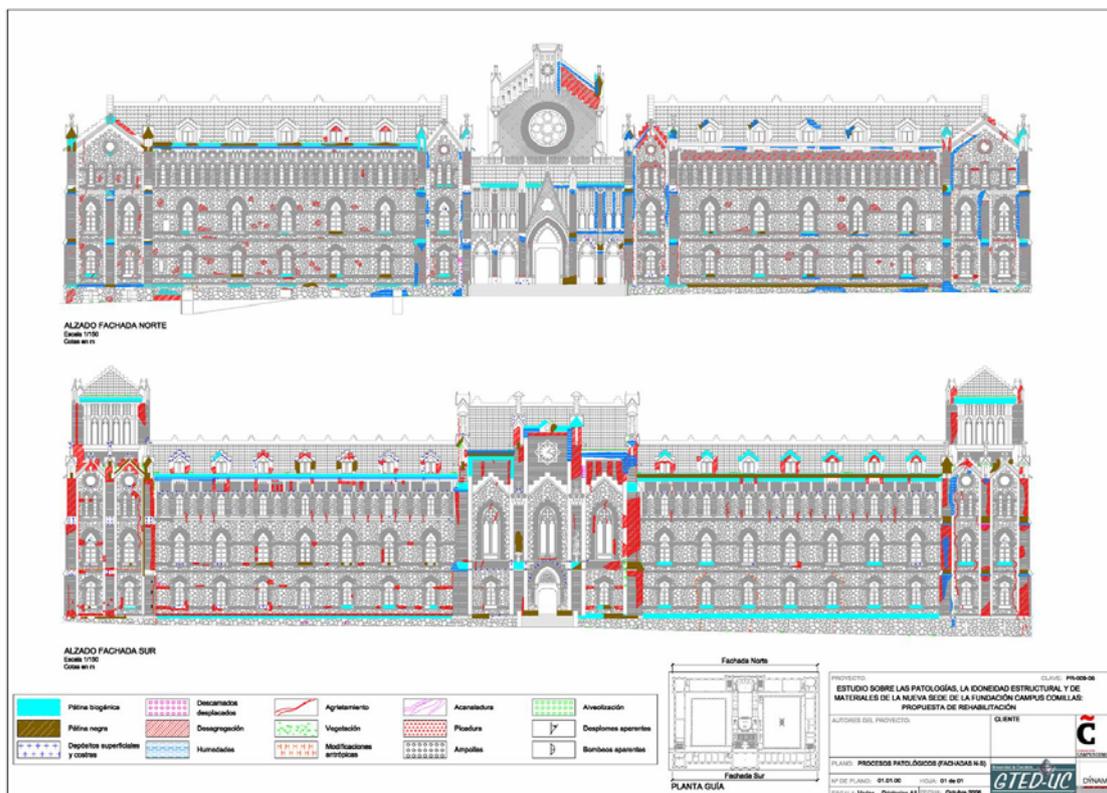


Fig. 1.2: Levantamiento de procesos patológicos de las fachadas Norte y Sur del Seminario Mayor de Comillas (Villegas y Lombillo 2007a, 2008).

El reconocimiento 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, las distintas causas concomitantes lo que hay que determinar.

1.1.1.2.1 Reconocimiento 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.

En este sentido Binda y Saisi (2001b) y Binda (1998) refieren que la caracterización experimental de las estructuras es importante, entre otras, en cuatro situaciones distintas: evaluación del coeficiente de seguridad, alteración del tipo de utilización de la estructura (nuevas cargas),

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

evaluación de la eficacia de las técnicas de reparación/refuerzo, y monitorización del comportamiento en servicio.

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.

Igualmente, 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 (Roca 2007).

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 cal, bastardo de cal y cemento, etc.). También es necesario saber cómo están unidos los elementos (a hueso, juntas de mortero, etc.) y la manera en la que se relacionan entre sí geométricamente, es decir, identificar el comportamiento a nivel de elemento estructural.

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

La evaluación del estado real de la estructura no debería interferir con la condición estructural ni con la funcionalidad del edificio, y además debe tener en cuenta el coste. En este contexto, la inspección y monitorización estructural constituye una parte esencial del ciclo de vida de los edificios monumentales (Concu y de Nicolo 2009).

Bajo este punto de vista, en años recientes la evaluación de edificios de carácter monumental mediante técnicas no destructivas ha crecido significativamente (Binda et al. 2008a y 2008b, Ortolani et al. 2008, Colla et al. 2008), en tanto que el uso de estas técnicas de inspección permiten adquirir varios datos relevantes no interfiriendo en el estado del bien, lo que permite planificar adecuadamente la intervención de rehabilitación, y preparar y gestionar los presupuestos de mantenimiento.

Ningún ensayo a nivel individual es normalmente capaz de suministrar toda la información requerida, por lo que el empleo de diferentes técnicas no destructivas complementarias (sónica, GPR, gatos planos, etc.) es necesario (Binda et al. 2008, 2001 y 2000). Si es posible deben utilizarse varios métodos y comparar los resultados.

Desde el punto de vista de la caracterización de 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), ensayos in situ destructivos, ligeramente destructivos y no destructivos, y técnicas de monitorización. En relación con la importancia de éstas últimas, Macchi (1993) alude que durante el estudio de las estructuras medievales de Pavia, tras el colapso de la Torre Cívica en 1989, la protección de la seguridad pública se basó en una constante observación y en una monitorización online.

En la Tabla 1.2 se presenta un resumen con alguna de las técnicas susceptibles de empleo.

Tabla 1.2: Algunas técnicas susceptibles de empleo en la fase del reconocimiento experimental.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de materiales homogéneos componentes de la fábrica (piedras, ladrillos y morteros)	Caracterización química	Composición química elemental por energía dispersiva de rayos X (EDAX); análisis microestructural por microscopía electrónica de barrido; composición mineralógica por difracción de rayos X, etc.
	Caracterización de propiedades físicas	Densidad, porosidad, absorción, caracterización de parámetros térmicos (coeficiente de dilatación térmica, conductividad térmica, etc.), etc.
	Caracterización de propiedades mecánicas	Resistencia a compresión, a tracción, a flexotracción. Obtención del módulo de elasticidad (E), obtención del coeficiente de Poisson (ν). Etc.
	Propiedades relacionadas con la durabilidad	Pérdida de masa y resistencia por hielo-deshielo, ensayos de humedad-sequedad, ensayos de abrasión, ensayos de corrosión acelerada en cámara de niebla salina, etc.
Ensayos de laboratorio sobre material heterogéneo o compuesto (fábrica de ladrillo, etc.)	Ensayos de compresión simple y de compresión excéntrica. Ensayos de corte. Ensayos de flexión paralela y perpendicular a tendeles. Ensayos frente a cargas cíclicas. Ensayos de fluencia lenta. Ensayos para evaluar el comportamiento de posibles refuerzos. Etc.	
Ensayos in situ de la fábrica	Destructivos	Ensayos de compresión, de corte, etc.
	Ligeramente destructivos ⁴	Gato plano simple (simple flat jack), gato plano doble (double flat jack), resistencia al corte de la junta de mortero (in situ shear test o push test), hole drilling, dilatometría, técnicas esclerométricas, in situ bond test, pull out resistance, drilling resistance, etc.
	No destructivos ⁵	Endoscopio y videoendoscopio, velocidad de pulso sónico o ultrasónico (ensayo directo o transparencia), impacto eco (sónico o ultrasónico), termografía infrarroja, técnicas rádar, técnicas geoelectricas, técnicas topográficas, etc.
Monitorización de la construcción	Monitorización manual Monitorización remota	Extensómetros (crackmeter), galgas extensométricas, células de asiento, células de carga, cintas de convergencia, clinómetros, inclinómetros, etc.

Por tanto, la fase de reconocimiento experimental es importante tanto para la interpretación del comportamiento de las estructuras, como para elegir las técnicas de intervención más adecuadas.

La caracterización geométrica, el levantamiento de patrones de agrietamiento, la ejecución de ensayos sónicos y de gato plano, y la toma de muestras de materiales para caracterizarlos química, física y mecánicamente en laboratorio, representa un programa de mínimos para obtener el conocimiento de la fábrica, particularmente en los casos con presupuestos reducidos (Binda 2003).

1.1.1.2 Reconocimiento 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 (Fig. 1.3 y 1.4) son las herramientas más frecuentemente utilizadas en el análisis estructural.

⁴ Tratan de obtener valores cuantitativos de ciertos parámetros.

⁵ Proporcionan órdenes de magnitud cualitativos.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

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.

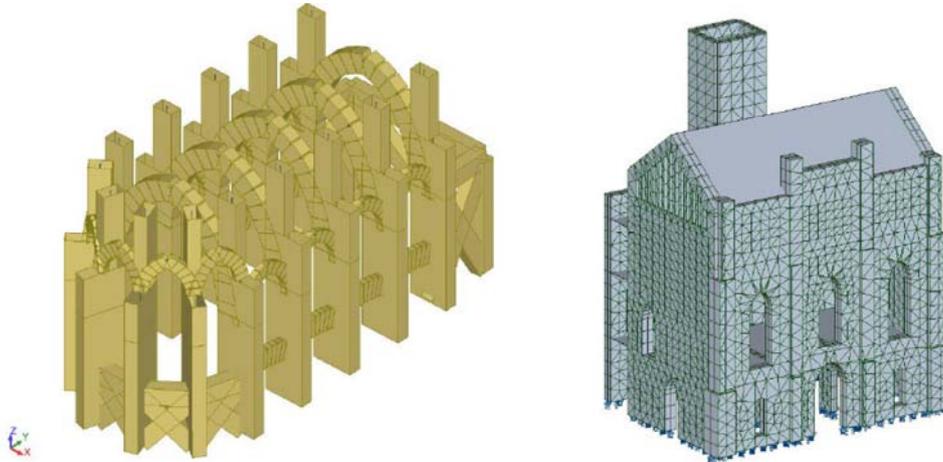


Fig. 1.3: Modelo de barras de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas (Villegas y Lombillo 2007a, 2008. Cortesía Dýnamis).

Fig. 1.4: Modelo del volumen central sur del Seminario Mayor de Comillas (Villegas y Lombillo 2007a, 2008. Cortesía Dýnamis).

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

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. La representación estructural muestra cómo el edificio transforma las acciones en esfuerzos y asegura la estabilidad. Para su definición es necesario disponer de:

- Una **caracterización geométrica** lo más fiel posible a la realidad. Para realizar el levantamiento geométrico existen técnicas como las de la topografía clásica, la fotogrametría y el láser escáner 3D (Fig. 1.5).

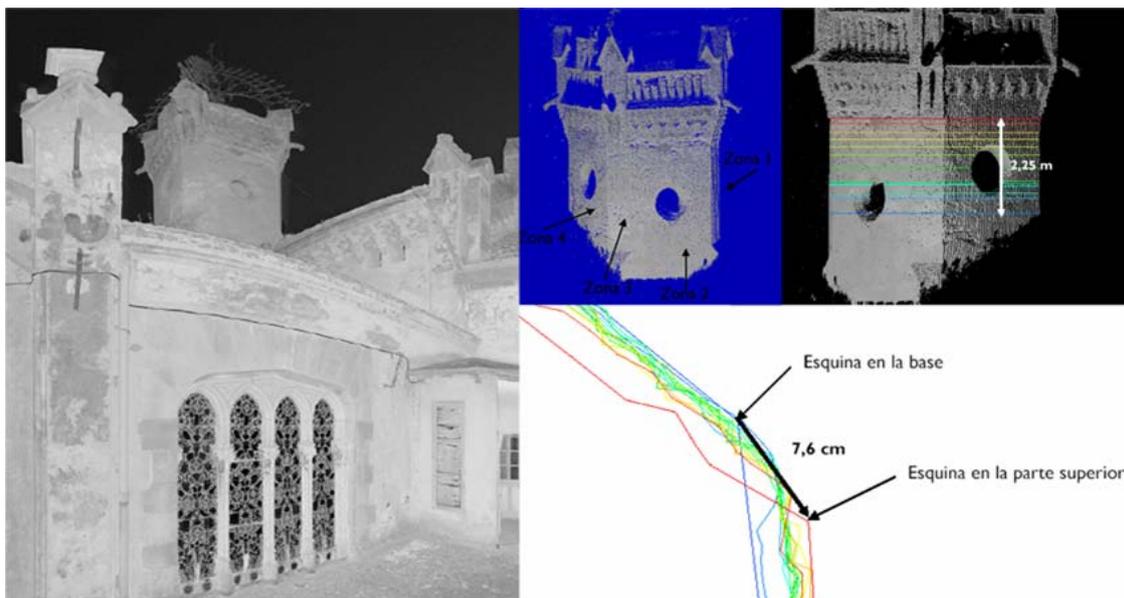


Fig. 1.5: Técnica de láser escáner 3D aplicada en el Seminario Mayor de Comillas (Villegas y Lombillo 2007a, 2008. Cortesía Gim Geomatics).

- Conocer la **tipología (composición) de los diferentes elementos estructurales** involucrados: hojas en las que se descompone un muro, etc. Dicho conocimiento hay que

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

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** (Fig. 1.6) 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.

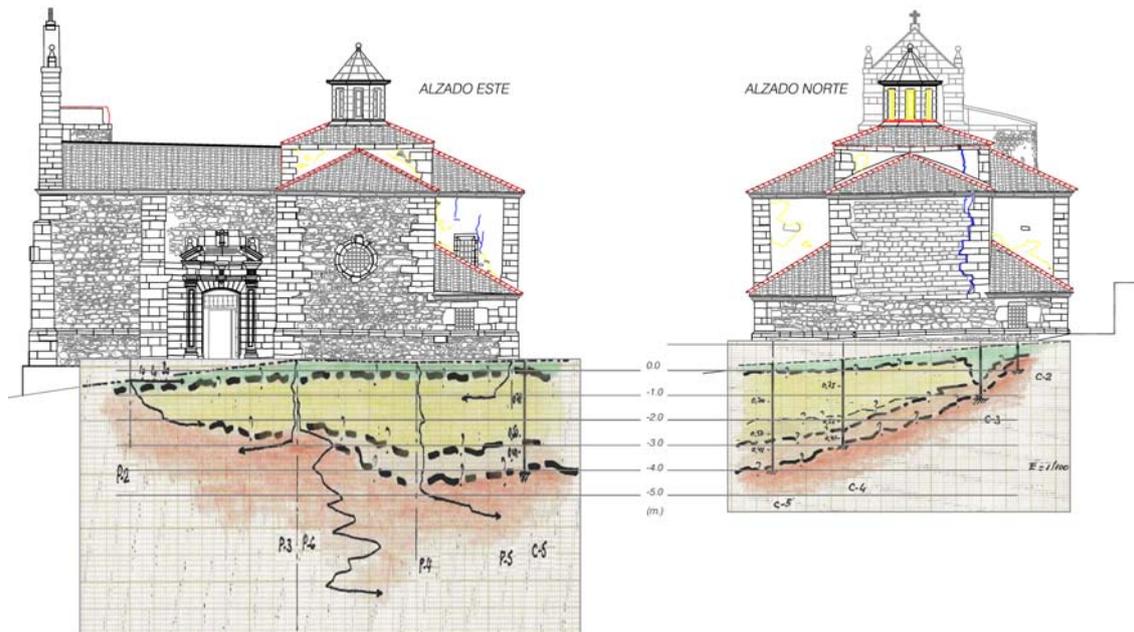


Fig. 1.6: Perfiles geotécnicos referentes a las alineaciones de los muros Norte y Este de la iglesia de San Mamés de Polaciones, Cantabria, España (Villegas y Lombillo 2009a; Lombillo et al. 2009a, cortesía de Triax).

- Además, 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.

2.- Resistencia de los elementos estructurales involucrados. La resistencia de los elementos estructurales está íntimamente relacionada con las características de los materiales implicados. Como ya se ha mencionado al referirnos al reconocimiento experimental, 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.- 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 estáticas directas, esto es, las cargas aplicadas (cargas muertas y sobrecargas de uso) y estáticas indirectas (asientos del terreno, movimientos térmicos, etc.); o dinámicas que se producen cuando se transmiten aceleraciones a una estructura (debido a vibraciones, terremotos, viento, etc.).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Las **acciones químicas, físicas y biológicas** actúan sobre los materiales cambiando sus propiedades y, por ende, pudiendo afectar a sus resistencias (condiciones de durabilidad) si el cambio referido induce un deterioro de los mismos.

1.1.1.2.3 Evaluación del nivel de seguridad.

El análisis de la situación en que se encuentra la estructura, tanto en su actualidad como en las condiciones futuras, debe determinar 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 muchas ocasiones, 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.

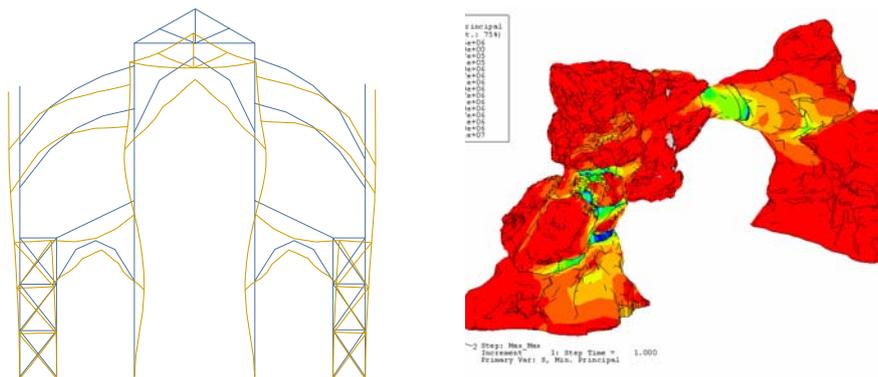


Fig. 1.7: Modelo de barras de la sección transversal de la Iglesia de Santa María de Castro Urdiales (Villegas y Lombillo 2008a; Lombillo y Villegas 2008)

Fig. 1.8: Modelo numérico del arco de la isla Horadada de Santander (Villegas y Lombillo 2007b, 2009. Cortesía GCAE-UC).

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 (Fig. 1.7). 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

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

detallada del cuadro fisurativo puede proporcionar una indicación de las trayectorias de las cargas en la estructura.

Cuando las tensiones en áreas significativas se aproximen a la resistencia máxima, es preciso realizar un análisis más exhaustivo de la estructura (Fig. 1.8) 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.

Concretando, en la evaluación de la seguridad estructural, que constituye la última fase de análisis, 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.

1.1.2 El diagnóstico y la reflexión

Una vez se conoce el edificio y sus usuarios es posible realizar un ejercicio de reflexión que se inicia mediante una tercera fase (3. Diagnóstico - Síntesis) de síntesis de la información recogida en la fase previa. En esta etapa se individualizan problemas y sus causas, y se da una visión global de las potencialidades y déficit del edificio.

Posteriormente, en la cuarta fase (4. Reflexión y toma de decisiones) se retoman las ideas del promotor de realizar la obra y se intentan compatibilizar con la realidad del edificio, con sus valores patrimoniales, con las posibilidades económicas de inversión, etc. En este punto se confirman los criterios de la intervención (cómo conservar, hasta dónde transformar...), un momento que debe estar marcado por una sólida ética profesional.

1.1.2.1 Diagnóstico

Una vez que el patólogo llega al proceso mental del prediagnóstico (fase 1), analiza la información anterior, se plantea unas hipótesis y las comprueba a través de cálculos y ensayos (fase 2), y de verificarse éstas o aquéllos, emite el diagnóstico (fase 3) en el que ha de confirmar la evolución del proceso; es decir el mal que afecta a la construcción (defectos de diseño, errores de cálculo, ejecuciones incorrectas, materiales defectuosos o falta de mantenimiento), las causas intrínsecas o extrínsecas que lo generaron, los síntomas bajo los que se manifestó y las lesiones que se produjeron.

Como etapa final de todo el proceso anterior el facultativo, de ser requerido, receta “los preceptos y remedios para el tratamiento de la enfermedad”; es decir, aplica la terapéutica curativa (fase 5). Sin embargo, además de la terapéutica curativa, el facultativo ha de tener en cuenta en el diseño, en el cálculo y en la ejecución, la terapéutica preventiva para evitar que se inicie algún proceso patológico.

El informe de diagnóstico es un escrito con opinión razonada que debe estar redactado de forma que otro técnico externo al proceso lo pueda comprender, sin embargo siempre incluirá una nota de síntesis que será accesible a un lector no profesional. Las conclusiones deberían ser concisas, claras y completas. Esta nota precisará los puntos fuertes y los débiles para mostrar el potencial de rehabilitación del edificio existente.

Es decir, la fase de diagnóstico implica una labor de síntesis y una reflexión crítica que se fundamenta en los estudios multidisciplinarios que se hayan realizado en la etapa anterior. Igualmente, siempre existe la posibilidad de que haya que plantear nuevas hipótesis en el caso que las iniciales no se hayan confirmado o que hayan aparecido nuevos condicionantes, debiendo de retornar a la fase 2 de reconocimiento-análisis para comprobarlas.

1.1.2.2 Reflexión y toma de decisiones

Es en este momento, una vez se tiene extenso conocimiento del edificio y sus usuarios, cuando se estudiará si las ideas del promotor son factibles. Por lo tanto, se trata de entablar de nuevo con el propietario un diálogo sobre sus necesidades futuras y sus posibilidades económicas frente al potencial del edificio existente.

En esta etapa el técnico deberá fijar los criterios que aplicará en el proyecto (adiciones, eliminaciones, prioridad a los aspectos de habitabilidad, reintegración de partes perdidas, reversibilidad de intervenciones arriesgadas, consolidación de partes arruinadas, etc.). De entrada, no se debería descartar ningún extremo: ni la pura conservación, ni la pura restauración. La Carta del Patrimonio Vernáculo Construido (ICOMOS 1999) establece un primer marco general a tener en cuenta.

Se buscará el equilibrio entre la mejora de las condiciones de uso de los usuarios, la seguridad de la estructura, la salvaguardia de los valores patrimoniales y los recursos económicos disponibles.

1.1.3 Terapia: el Proyecto y la ejecución de la Obra

Con unos criterios firmes, fruto de las fases anteriores, sí que es posible pasar a la quinta fase (**5. Proyecto**) en la que se redacta el documento de proyecto que permitirá contratar, construir y controlar la intervención.

Es recomendable introducir criterios de sostenibilidad y de protección del medio ambiente en la rehabilitación del edificio. Así se analizarán el ciclo del agua, el ciclo de los residuos, los consumos energéticos del edificio y se estudiará el confort de invierno y de verano. Existen en la tradición constructiva infinidad de soluciones bioclimáticas que por desconocimiento no deberían ser infravaloradas en el momento de una intervención.

Como resultado de lo referido, la sexta fase (**6. Obra de Rehabilitación**) podrá realizarse de una manera mucho más ajustada, preservando los valores del edificio, adaptándose mejor a las necesidades del promotor y lo que parecería un contrasentido, con **menor coste económico y menores plazos de ejecución** (Lourenço et al. 2008 y 2001), precisamente porque en las fases integrantes de los estudios previos (fases 1-4) **se ha acotado la incertidumbre de la obra**.

En línea con lo que se viene comentando, para garantizar una correcta rehabilitación es muy importante la elección del tipo de constructor. En ciertas regiones aún es posible encontrar un constructor que conoce y practica las técnicas tradicionales de construcción, pero lamentablemente éstas se están perdiendo rápidamente.

Por su parte, la Dirección de Obra de una intervención de rehabilitación demanda ante todo flexibilidad y dedicación. Flexibilidad por que los imprevistos suelen surgir sobre la marcha de la obra y es difícil aplicar únicamente lo indicado en el proyecto. Y dedicación pues se requiere una revisión continuada del proyecto y reinterpretar el edificio a la luz de nuevos descubrimientos.

Llegada la finalización de la obra, es importante disponer de un dossier de la obra realmente ejecutada. Es decir, un conjunto de planos que reflejen no tanto lo proyectado como lo finalmente realizado. Este documento es imprescindible para facilitar la organización de un programa de mantenimiento posterior.

1.1.4 Control y mantenimiento.

Parecería que una vez rehabilitado el edificio se habría terminado el proceso, pero se considera imprescindible plantearse una séptima y última etapa (**7. Control y mantenimiento**) que mantenga (pequeñas operaciones de limpieza, reparaciones, renovaciones que se realizan siguiendo un calendario) el edificio a lo largo de su vida útil hasta una futura nueva rehabilitación (gran operación que retorna el edificio a los estándares del momento). En esta etapa toman una destacada importancia las inspecciones periódicas que permitirán detectar nuevas necesidades antes que el edificio se vuelva a degradar.

Habitualmente se asocia el mantenimiento a la idea de reparar elementos dañados, es lo que llamamos mantenimiento correctivo, pero se considera más razonable pensar en términos de mantenimiento planificado y preventivo, es decir actuar previamente al desencadenamiento de la sintomatología vinculada al proceso patológico existente, incidiendo en las causas del mismo (“más vale prevenir que curar”).

Dicho mantenimiento preventivo implica una planificación y, por tanto, la preparación de un calendario de operaciones de mantenimiento.

1.2 Alcance de la investigación.

Como puede deducirse del proceso metodológico planteado, la realización de estudios previos para conocer las características y comportamiento de las obras de fábrica, y poder adoptar, con las debidas garantías, los criterios de intervención en cada caso, adquiere cada vez mayor importancia (Aymat).

Conviene referir que en países extranjeros la rehabilitación es una temática mucho más conocida, tratada y regulada. En Italia, la “Legge Merloni” (Ministerio de Obras Públicas 1994), de obligado cumplimiento, requiere explícitamente la ejecución de una fase de diagnóstico que de soporte a la fase de diseño o a la de mantenimiento de edificios, los cuáles son realizados, en la inmensa mayoría de los casos, por Centros Tecnológicos, por entes adscritos a Universidades italianas y por pequeñas empresas de base tecnológica en las que participan habitualmente profesores universitarios. En España no hemos llegado a esta situación, aunque cada vez más se tiende a una situación similar. No se trata de una transferencia de tecnología, en sí misma, al sector industrial, como se entiende de modo convencional en otros sectores y campos de la I+D+i, sino que son estos centros, el eslabón de la cadena que permite apoyar coherentemente una rehabilitación arquitectónica.

La “Legge Merloni” (1994) obliga a intervenir a nivel de estudios previos al proyecto de ejecución con la finalidad de diagnosticar los problemas principales de los que adolece la construcción para que éstos sean solucionados en el proyecto. Dicha política de intervención puede entenderse adecuadamente haciendo un símil (Fig. 1.9): lo mismo que un cirujano antes de operar a un paciente tiene que saber de que operar, para lo cuál un técnico especialista debe realizar análisis y, en muchos casos, pruebas exhaustivas para poder diagnosticar la problemática interviniente, en una construcción (“paciente”) antes de realizar el proyecto de ejecución y por tanto las obras (el proyectista y el equipo de obra son los “cirujanos”) es necesario que otros técnicos (“especialistas” en la fase de estudios previos) diagnostiquen que afecciones presenta el edificio (“paciente”), para que éstas puedan ser solucionadas de forma adecuada en la fase de proyecto y obra.

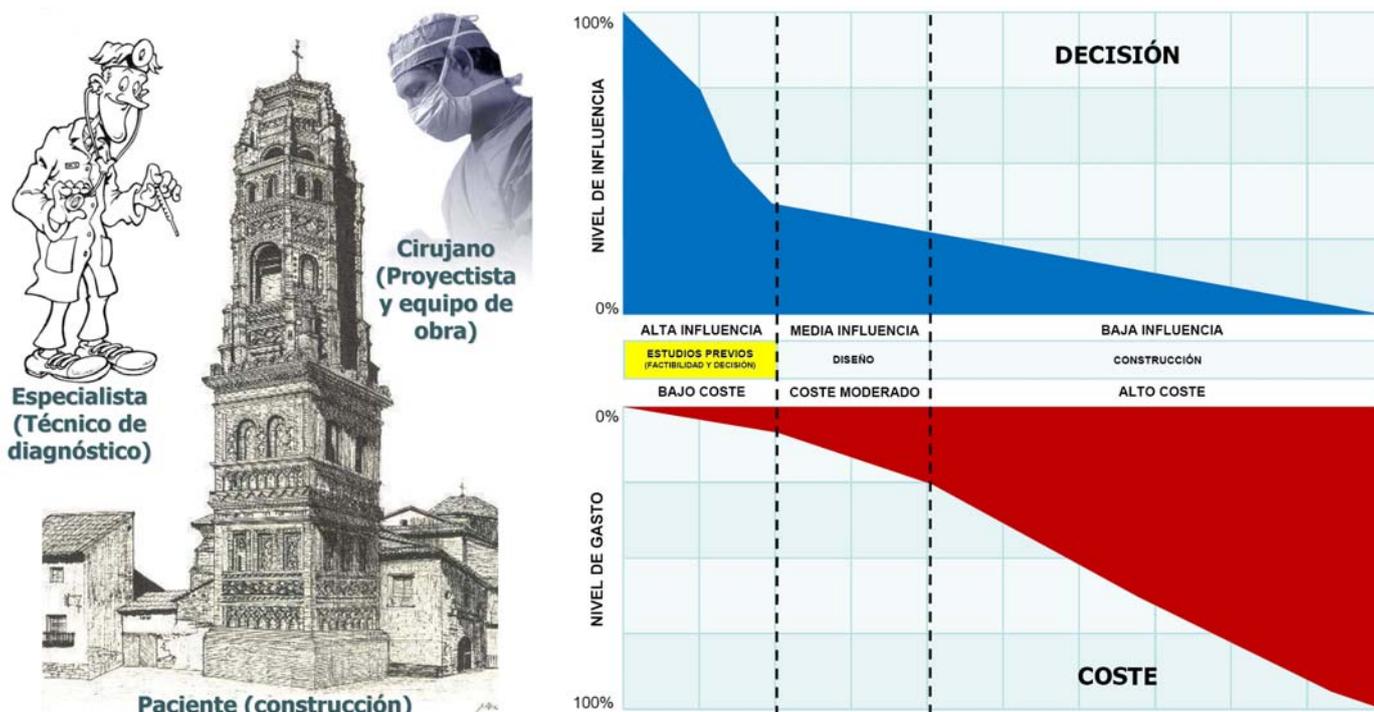


Fig. 1.9: Símil entre la medicina y la rehabilitación.

Fig. 1.10: Incidencia en el total de la intervención de la fase de los Estudios Previos. Puede comprobarse que la mayor parte de las decisiones importantes deberían de tomarse en esta fase, representando una inversión reducida respecto del total de la intervención.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

A la existencia de dicha normativa extranjera, hay que añadir algo más importante, en España se está comenzando a regular dicha necesidad. Así por ejemplo el Real Decreto 314/2006, relacionado con el Código Técnico de la Edificación, se alude a que el CTE se aplicará a las obras de reforma o rehabilitación (adecuación estructural, funcional o remodelación) que se realicen sobre edificios existentes, siempre y cuando dichas obras sean compatibles con la naturaleza de la intervención (Art. 2º). Igualmente, la Norma de Hormigón Estructural EHE 2008 dedica por primera vez un artículo entero al Mantenimiento de estructuras (Art. 103º), explicitando que la Propiedad deberá programar y efectuar las actividades de mantenimiento de forma coherente con unos criterios previamente definidos.

Finalmente, referir que a nivel de Estudios Previos se toman gran parte de las decisiones estratégicas, las cuáles tienen una importante repercusión tanto económica como temporal en el futuro de la intervención (Fig. 1.10). Dedicándoles suficientes partidas económicas, en general bastante reducidas respecto del monto total de la inversión, pueden optimizarse muchísimo las intervenciones, tanto en plazo como en costo.

Roque y Lourenço (2003) afirman que las intervenciones en las construcciones antiguas, dada su fragilidad, requieren precisión, detalle y formación especial en el desarrollo de un estudio previo riguroso de diagnóstico que de soporte a las decisiones sobre las técnicas que deben adoptarse.

Por su parte Binda et al. (2008) refieren que el proceso de rehabilitación debería basarse en una indagación previa precisa, la cuál debería documentar el estado actual de la construcción. Una campaña de investigación in situ preliminar es útil de cara a proporcionar detalles sobre la geometría de la estructura y para identificar los puntos donde deben concentrarse observaciones más precisas. Mientras tanto, la evolución histórica de la construcción debe ser conocida para contribuir a la explicación de los signos de daño detectados en el edificio. El patrón de agrietamiento debe ser clasificado y documentado, con gran precisión, sobre dibujos y fotografías en la fase de investigación in situ, y un sistema de monitorización contribuiría al conocimiento de la evolución de determinados procesos. Igualmente, un reconocimiento experimental basado, dentro lo posible, en técnicas no destructivas (NDTs) o ligeramente destructivas (MDTs), puede aplicarse en puntos estratégicos de la estructura para arrojar luz sobre los problemas más difíciles. Finalmente, la definición del modelo estructural debería realizarse sobre la base de la indagación geométrica, el patrón de agrietamiento y la campaña experimental desarrollada (Bosiljkov et al. 2004; Binda et al. 2006).

Por todo lo referido, dentro de las fases relacionadas (Fig. 1.1) que componen los estudios previos (fases de anámnesis, reconocimiento-análisis y diagnóstico), aún siendo todas ellas importantes, cobra especial relevancia la fase de reconocimiento – análisis, dado que es en esta fase en la que se plantean unas hipótesis y se comprueban, de forma objetiva, a través de cálculos y ensayos.

Igualmente, la realización de un análisis realista en este tipo de construcciones, depende sobremanera del reconocimiento experimental, dado que dicha inspección además de contribuir a la obtención de parámetros de entrada del modelo de análisis (por ejemplo características mecánicas de los elementos estructurales de fábrica), tiene como misión el ayudar a calibrar dichos modelos matemáticos mediante la comprobación experimental de los resultados obtenidos por éstos en determinados puntos de control.

Además, dicho reconocimiento experimental debe de tratar de obtener la información de entrada de los modelos numéricos y los datos para su calibración, de la forma menos intrusiva posible para con la construcción, sobremanera teniendo en cuenta el carácter monumental de las mismas, por lo que debe imperar el empleo de técnicas no destructivas o ligeramente destructivas, en tanto que permiten obtener datos relevantes no interfiriendo en el estado del bien.

Finalmente, las técnicas no destructivas, en general, ofrecen datos de carácter cualitativo, mientras que las ligeramente destructivas inciden en la obtención de valores cuantitativos de ciertas propiedades.

Por todo lo referido, la **INVESTIGACIÓN** que se presenta **incide**, dentro del proceso metodológico general, **en la fase del reconocimiento experimental, in situ⁶, ligeramente destructivo**, y a su vez, dentro de éste, en las técnicas orientadas a obtener información útil desde un punto de vista de **caracterización mecánica de elementos estructurales de fábrica** (integrable en la fase de análisis) y desde el punto de vista de la optimización de los modelos analíticos (datos para su calibración).

1.3 Necesidades de la investigación.

España el segundo país, después de Italia, con mayor número de bienes declarados Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, de los cuales 36 son bienes culturales.

A nivel nacional, en el año 2007 España contaba con 15598 bienes inmuebles declarados “Bien de Interés Cultural” (BIC) por el Ministerio de Cultura.

Por otra parte, en lo relativo al campo de aplicación de la presente Tesis Doctoral, por la trascendencia del estudio sobre el sistema estructural considerado (la fábrica), no solo debemos hablar de la trascendencia del tema en el ámbito del patrimonio construido (histórico o no), sino también del ámbito genérico de la construcción, ya que estamos ante una tipología constructiva de lo más común.

Hay que tener presente que las construcciones en fábrica de piedra y ladrillo siguen siendo el conjunto más numeroso en el patrimonio edificado en España y en la UE 27 (Crocí 1998).

Son construcciones en piedra la mayoría de los monumentos históricos, muchos edificios de viviendas, pero también un enorme patrimonio de obra civil: puentes, muros de refuerzo y contención en carreteras etc. Baste decir que, por ejemplo, más del 40% de los puentes de ferrocarril son de fábrica.

En este escenario, cabe señalar que existen 500,000 monumentos inventariados en Europa, con una estimación del 60% con problemas estructurales, de los cuales un 40% pueden encuadrarse en obras de fábrica, y que suponen unas posibilidades de intervención de 120,000 edificaciones con interés patrimonial.

A esta cantidad habrá que añadir otras tantas relativas al patrimonio construido civil.

Para justificar la necesidad que demanda el sector rehabilitación en lo que respecta al desarrollo de técnicas de diagnóstico aplicables se va a realizar una exposición en la que básicamente se refiere a varias fuentes importantes dentro del panorama científico-tecnológico español relacionado con el sector de la construcción.

En la Tabla 1.3 se detallan los documentos de base tomados para justificar la necesidad de la presente investigación.

⁶ El hecho de focalizar los esfuerzos en las técnicas in situ se debe a la práctica imposibilidad de reproducir en laboratorio el comportamiento de una fábrica real, tanto en lo que respecta a la reproducción material de la misma (problemas en la generación de la carbonatación real del mortero de cal, etc.), en lo relativo a las dimensiones del espécimen (para que sean representativas del comportamiento in situ), al daño existente en la obra de fábrica real, o incluso en lo relacionado con las acciones a las que está sometida. Igualmente, como todos los condicionantes referidos cambian de una construcción a otra, e incluso dentro de la misma construcción, los datos obtenidos en laboratorio difícilmente podrán extrapolarse a otros elementos constructivos. Por todo ello, lo más inteligente es tratar de poner a punto técnicas que permitan la consecución de los datos necesarios directamente sobre la fábrica real y con las acciones reales, es decir, metodologías de aplicación in situ.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 1.3: Fuentes para justificar la necesidad de desarrollo y aplicación de técnicas de diagnóstico aplicables al sector rehabilitación.

Fuente	Finalidad
Referencias estadísticas (Euroconstruct y SEOPAN)	Hacer idea de la importancia económica de la rehabilitación y de su más que factible crecimiento a medio plazo
Informe “Tendencias en la conservación del patrimonio cultural: demandas tecnológicas y científicas en Italia y España” (ANEP 1998)	Dicho estudio tuvo como objetivo recopilar de forma sucinta los datos más relevantes sobre las políticas públicas en el sector del Patrimonio Cultural y en particular las relacionadas con la Investigación y el Desarrollo Tecnológico con mayor detalle para España e Italia. Para ello se tomó como referencia la opinión de los expertos que participaron en el II Seminario de Prospectiva ANEP celebrado el 18 de Febrero de 1998. En dicho documento se propusieron unas líneas de investigación, relacionadas con este campo, a potenciar, así como las principales demandas tecnológicas asociadas existentes, siendo objeto de este apartado referirse a las que influyen a la temática del proyecto que nos ocupa.
Hitos tecnológicos especificados por la Plataforma Tecnológica Española de Construcción en la línea estratégica patrimonio cultural	El principal objetivo de este documento es la elaboración del Programa de Investigación de la Línea Estratégica de Patrimonio Cultural, definiendo los temas y proyectos de investigación a desarrollar en las diferentes disciplinas que deben considerarse para la adecuada gestión y conservación del Patrimonio Cultural español, definidas a partir de los desafíos establecidos para los principales hitos temporales marcados de 2010, 2020 y 2030. En dichas directrices se explicita que, desde hace algunos años, la conservación del Patrimonio Cultural se considera uno de los elementos claves para asegurar el desarrollo de una sociedad avanzada basada en el bienestar de las personas que viven en ella, lo que ha creado una creciente actividad institucional e industrial, en la que España se deberá de posicionar con fuerza.

En lo que sigue se pasa a relacionar los aspectos más significativos de las referencias recogidas en la Tabla 1.3 anterior.

1.3.1 Referencias estadísticas (Euroconstruct y SEOPAN)

Durante los últimos años, la construcción en España viene representando, de forma directa, más del 15% del producto interior bruto de nuestro país. Concretamente en el año 2007 dicho porcentaje fue del 18%.

En lo que a términos de empleo se refiere, el relacionado directamente con la construcción representó del orden del 12,5% del total del empleo nacional en el año 2006. A eso hay que añadir el empleo indirecto vinculado con el sector industrial vinculado a la construcción y con el sector servicios en muchas zonas de nuestra geografía.

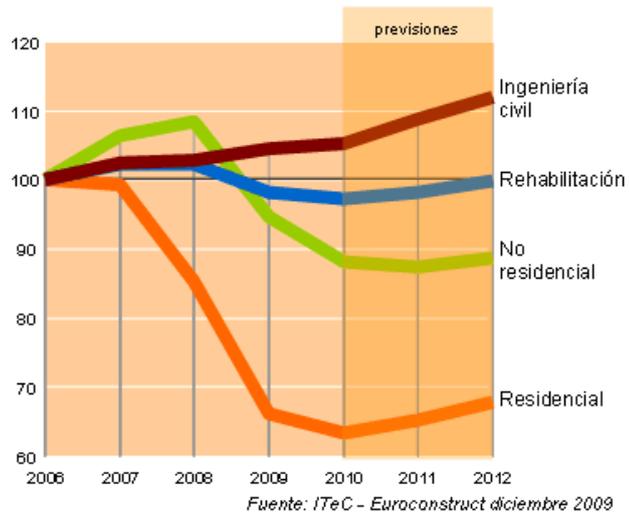
No obstante, en la actualidad esas cifras económicas han cambiado a la baja debido a la crisis económica general y a la particular inmobiliaria existente en España.

En el mercado de la construcción se diferencian dos grandes bloques, la obra civil y la edificación, esta última integrada a su vez por tres subsectores: la edificación residencial, la edificación no residencial, y la rehabilitación y el mantenimiento.

En general, desde el punto de vista de la vivienda, las actuaciones de rehabilitación suelen ser más estables que la obra nueva propiamente dicha. Dicha afirmación puede comprobarse de forma sistemática en los diferentes informes de Seopan y de Euroconstruct emitidos a lo largo de los años. En lo que sigue, en la Fig. 1.11, se presenta la evolución de los distintos subsectores en el mercado europeo de la construcción, así como las previsiones de crecimiento hasta el año 2012, formuladas por Euroconstruct en su informe de diciembre de 2009 (último publicado previo a la redacción de esta Tesis Doctoral).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Fig. 1.11: Evolución de los distintos subsectores en el mercado europeo de la construcción, así como las previsiones de crecimiento hasta el año 2012. Índice de producción a precios constantes, base 2006=100 (Fuente: Euroconstruct, informe diciembre 2009).



El sector construcción europeo encara el 2010 con unas previsiones menos negativas que las del 2009, pero aún así han sufrido un empeoramiento con respecto a las que Euroconstruct publicó el verano pasado, y ahora se sitúan en un -2,2%. Se sigue confiando en poder abandonar la zona negativa en el 2011, aunque de manera bastante discreta (+1,6%) con posibilidades de ir apuntalando progresivamente el crecimiento (+2,5%) en el 2012. En síntesis: se acerca un año más de descenso, seguido de dos años de moderada recuperación, lo que compone un panorama en el cual el sector construcción europeo va a moverse todavía por debajo de los registros de 2006-2007.

La principal conclusión de la Fig. 1.11 es que sigue predominando la hipótesis de que el grueso de la crisis del sector se va a concentrar en 2009 y 2010, la posterior recuperación será lenta, apreciando como la obra civil se va a convertir en el motor de desarrollo del sector, y como la rehabilitación sufre un menor descenso, recuperando antes su senda creciente.

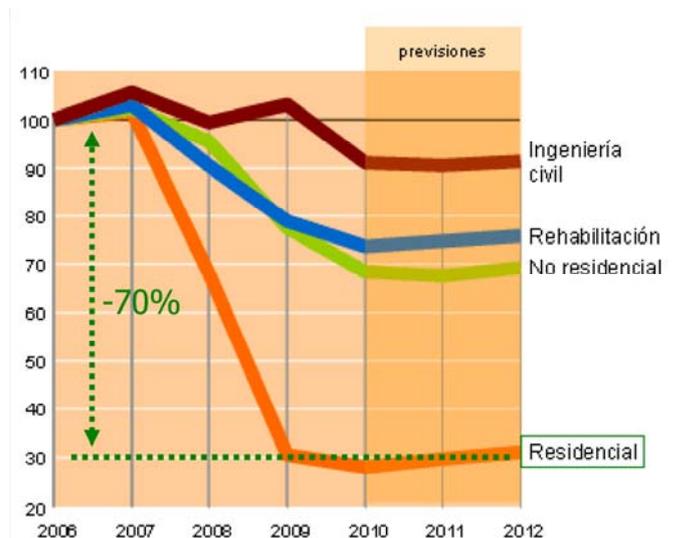
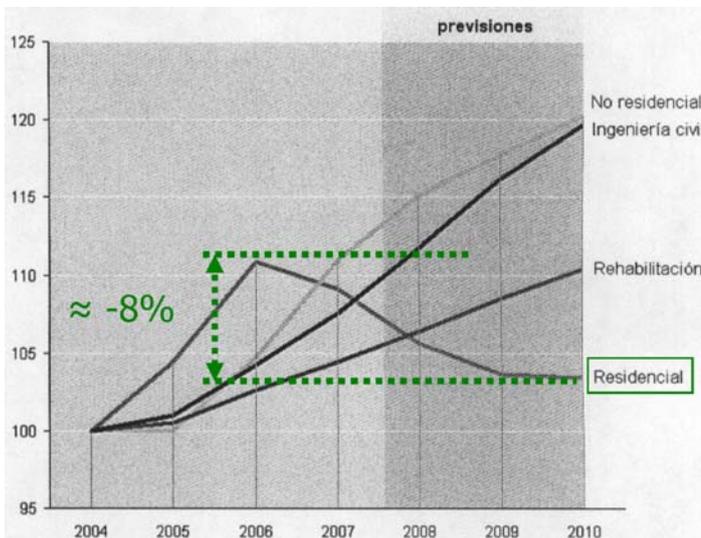


Fig. 1.12a: Evolución de los distintos subsectores en el mercado español de la construcción, así como las previsiones de crecimiento hasta el año 2010. Base 2004 = 100 (Fuente: ITeC-Euroconstruct Nov-2007).

Fig. 1.12b: Evolución de los distintos subsectores en el mercado español de la construcción, así como las previsiones de crecimiento hasta el año 2012. Base 2006 = 100 (Fuente: ITeC-Euroconstruct Dic-2009).

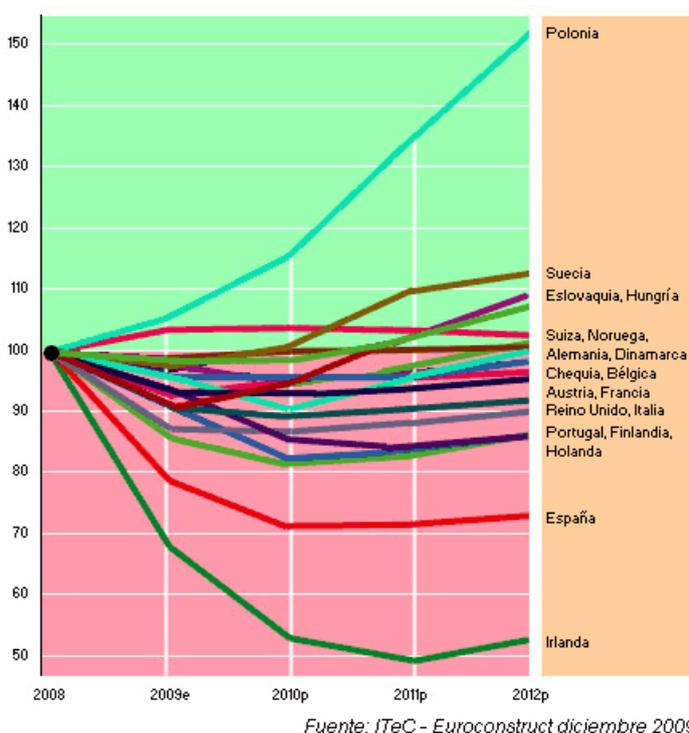
En lo que respecta al sector construcción español el escenario difícilmente puede ser más pesimista. En la Fig. 1.12 se presenta una comparativa de la evolución y previsiones del sector entre los informes Euroconstruct de noviembre de 2007 y diciembre de 2009.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

En dicha Fig. 1.12 puede apreciarse como las previsiones formuladas en el año 2007 se quedaron cortas, dado que contemplaban una caída del subsector residencial del orden de un 8% en 2010 (respecto de la producción en el año 2006), así como crecimientos relativamente importantes del resto de los subsectores. La realidad es que dicha caída va a ser mayor del 70% en el subsector residencial (habrá que esperar a informes posteriores), e igualmente caídas en el resto de subsectores.

En un análisis pormenorizado de los diferentes mercados del sector construcción Euroconstruct ya no habla de excepciones a la crisis, sino de diferentes intensidades de reacción: muy fuerte en residencial, fuerte en no residencial y menos fuerte en ingeniería civil.

La economía española deja atrás la fase de shock que ha representado el cambio de ciclo y entra en la nueva década con un lastre considerable en términos de desempleo y con la amenaza de quedarse rezagada con respecto a sus vecinos comunitarios. El sector construcción, de momento, va a contribuir bien poco a la recuperación: tal como pasó en el 2008, en el 2009 la producción del sector (-21,5%) va a quedar muy por debajo del PIB (-3,8%). El lector puede hacerse una idea del impacto de la crisis en el sector constructivo español en la Fig. 1.13.



En la Fig. 1.14 se presenta una comparativa entre los sectores constructivos español y europeo. En Europa, el principal mercado es el de rehabilitación y mantenimiento de edificación que supone el 36 % de la producción del sector, es decir uno de cada tres euros invertidos en construcción están relacionados con la rehabilitación de construcciones. Esta circunstancia se explica por la antigüedad del parque inmobiliario y porque esta actividad, que es la más intensiva en mano de obra de toda la construcción, tiende a ser en términos relativos cada vez más costosa y por lo tanto a suponer una parte creciente del total de facturación del sector.

En España, el reparto de la actividad por subsectores indica que, en términos corrientes, la edificación en España representaba en 2008 el 72% del total de producción frente al 28% que genera la producción de obra civil. A su vez, dentro de la edificación se encontraba la producción residencial de nuevo emplazamiento, que suponía el 32% del total de actividad, seguida de la componente de rehabilitación y mantenimiento, que aporta el 24% del producto, y finalmente la componente de menor peso la edificación no residencial de nuevo emplazamiento que supone el 16% de la actividad.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

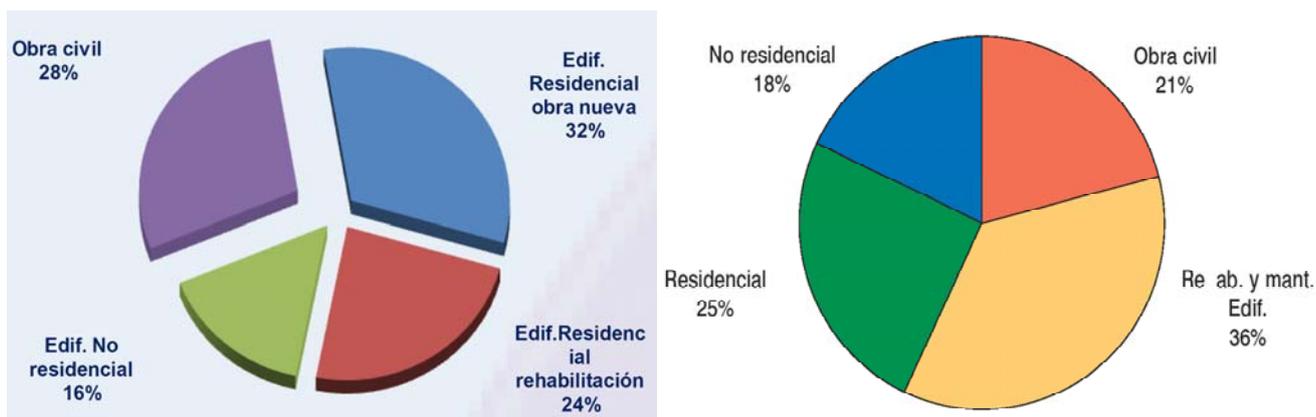


Fig. 1.14a: Composición de la producción de la Construcción en España 2008 (Fuente: SEOPAN)

Fig. 1.14b: Composición de la producción de la Construcción en Europa 2007 (Fuente: SEOPAN)

De la comparación de los gráficos presentados en la Fig. 1.14 puede concluirse que el desarrollo del mercado de la rehabilitación y reforma en España está en una posición cíclica retrasada respecto a los del resto de Europa. Sin embargo, esta tendencia previsiblemente se irá corrigiendo, ya que en muchos municipios consolidados se están implantando ordenanzas que obligan a pasar inspecciones técnicas periódicas y subsanar las deficiencias detectadas, lo que unido a los fuertes ritmos constructivos de los años recientes y al progresivo envejecimiento del parque inmobiliario, gran parte del mismo construido en los años 60 y 70, evidentemente con menores exigencias de calidad que las actuales, permite predecir que este submercado tiene un alto potencial de crecimiento (redundado por la actual deceleración del mercado residencial de nuevo emplazamiento), que amplificará los flujos económicos destinados al sector de la rehabilitación, lo que motivará una necesidad de formación de técnicos y agentes empresarios dedicados a este ámbito, y a la puesta a punto de metodologías aplicables.

Por todo lo referido puede concluirse que **en España existe una necesidad imperante de regir los procesos de inspección y de intervención en construcciones existentes.**

1.3.2 Informe ANEP (1998): “Tendencias en la conservación del patrimonio cultural: demandas tecnológicas y científicas en Italia y España”.

En palabras recogidas en el informe se refiere a que toda intervención de restauración se basa en un óptimo conocimiento de los materiales que componen la construcción y un diagnóstico científicamente riguroso de su estado de conservación: no en vano la experiencia ha demostrado la existencia de numerosas restauraciones mal ejecutadas y con consecuencias ruinosas, en algún caso con la destrucción total del Bien "restaurado", derivado de un conocimiento inadecuado y superficial de las propiedades del material con las que está construido el Bien.

La creciente sensibilidad social hacia las cuestiones relativas a la salvaguarda y disfrute de nuestro Patrimonio Histórico, se refleja en la cada vez mayor participación privada en dichas tareas, principalmente a través de fundaciones y asociaciones

El dinamismo y las importantes perspectivas de futuro que ofrece en la actualidad el sector cultural como motor de desarrollo, supone para países como España con el segundo patrimonio histórico artístico de Europa en importancia, después de Italia, una interesante oportunidad de crecimiento económico y de creación de empleo.

También se han alcanzado en los últimos años importantes logros en la resolución de problemas relativos a la conservación y restauración del patrimonio, con la aplicación y experimentación de numerosas técnicas, materiales, y métodos que es necesario sin embargo analizar, ordenar y conectar adecuadamente a las necesidades reales del sector para conseguir un avance óptimo y racional del mismo y contribuir de esta forma a forjar un sector de progreso económico y social en España.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Igualmente, en el informe se refiere a que entre las prioridades I+D europeas, en relación al patrimonio cultural, se encuentra la de potenciar las tecnologías de diagnóstico, protección, restauración y explotación sostenible de edificios históricos.

Los agentes involucrados en la conservación del patrimonio cultural, anteriormente descritos, necesitan de la constante aplicación de tecnologías que consigan perfeccionar su actuación en el proceso de conocimiento, conservación y difusión del Bien Cultural. Tecnologías que deben tener en cuenta siempre la especificidad de los Bienes que nos ocupan, y la responsabilidad de contribuir a transmitirlos a las generaciones futuras de la mejor forma posible.

En base a diversos documentos internacionales, entre ellos la opinión de los expertos que participaron en el II Seminario de Prospectiva ANEP celebrado el 18 de Febrero de 1998, en el informe se relacionan las líneas de investigación y necesidades tecnológicas y científicas asociadas al proceso anteriormente descrito. Entre éstas, en la Tabla 1.4 se refieren las que están directamente relacionadas con el objetivo que persigue esta investigación.

Finalmente, en el informe “Tendencias en la conservación del patrimonio cultural: demandas tecnológicas y científicas en Italia y España” los expertos elevaron unas recomendaciones de las que cabe aludir las que siguen:

- En primer lugar recomendaron diseñar y poner en marcha una política específica de I+D en el sector de la rehabilitación⁷.
- Del mismo modo recomendaron potenciar una serie de líneas de investigación, de las que en relación con la temática que nos ocupa cabe resumir las siguientes:
 - En la fase de catalogación ahondar en la **investigación en metodologías no destructivas** de prospección geofísica y mecánica.
 - En la fase de diagnóstico hacer hincapié en la **investigación en técnicas no destructivas** aplicables.
 - Y, finalmente, en la fase de intervención investigar los efectos causados por anteriores restauraciones o por las emprendidas mediante **metodologías no destructivas y técnicas de monitorización**.
- Fomentar la formación de personal investigador en nuevas técnicas, a ser posible no destructivas, aplicadas a la conservación y restauración del Patrimonio.

1.3.3 Plataforma Tecnológica Española de Construcción: Línea Estratégica Patrimonio Cultural (PTEC).

Como se recoge en dicho documento, la necesidad de conservar nuestro Patrimonio en buenas condiciones radica, en primer lugar, en evitar la pérdida de los vestigios que proporcionan una información muy valiosa para reconstruir el pasado de la humanidad. Por otra parte, el legado histórico-artístico es uno de los parámetros fundamentales del desarrollo turístico en el ámbito mundial, con los beneficios económicos que conlleva. Por último, una parte importante del bienestar social de la humanidad implica la conservación del entorno que le rodea. Todo esto hace que los fondos públicos y privados que se destinan anualmente a la conservación del Patrimonio Histórico-Artístico de nuestro país se incrementen año a año, y que la actividad en este campo sea cada vez mayor.

⁷ Según la UNESCO, la investigación en Patrimonio Cultural, es difícil de estimar debido a la dispersión de las fuentes de financiación y la falta de un programa específico de investigación en Patrimonio Cultural. Los datos disponibles en el Ministerio de Ciencia e Innovación cifran la financiación de proyectos relacionados con la conservación del patrimonio cultural entre 2004 y 2008, dentro del Plan Nacional de I+D+i, en una media de 1,2M € anuales.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 1.4: Identificación de las principales demandas tecnológicas y científicas del sector de la rehabilitación (ANEP 2008).

A.- Metodologías para la catalogación de los bienes culturales	A.1- Identificación del terreno y prospección geofísica y mecánica⁸	Desarrollo y normalización de técnicas de sondeo no destructivas, refiriendo concretamente las relacionadas con la aplicación de técnicas acústicas y electromagnéticas para conocer los diferentes elementos que componen la estructura y los factores de peligrosidad en relación a los agentes mecánicos. La aplicación de métodos indirectos en contextos arquitectónicos necesita una mayor precisión de las técnicas aplicadas a este fin, así como la normalización de los procesos de elaboración e interpretación de la señal
	A.2.- Técnicas analíticas para la identificación del origen y el uso del bien cultural	Puesta a punto de técnicas de análisis no destructivas y utilización de procedimientos de análisis capaces de garantizar la uniformidad de los resultados analíticos esperados en los distintos materiales, con objeto de proceder a la identificación de nuevos parámetros que estén en estrecha correlación con el estado de degradación de los distintos materiales
B.- Metodologías⁹ para el diagnóstico, intervención y mantenimiento de los bienes culturales	B.1.- Nuevas Tecnologías de diagnóstico del estado de conservación de bienes inmuebles	Desarrollo de técnicas no destructivas y generalizar el uso de técnicas de carácter no destructivo existentes. Puesta a punto de instrumentos portátiles para poderlos utilizar directamente in situ. Desarrollo de técnicas de extracción de muestras no destructivas, de fácil manejo, que permitan verificar en cada momento el estado real de conservación del Bien. Desarrollar la modelación de los Bienes a estudiar. Es importante que las técnicas de diagnóstico, intervención y mantenimiento sean preferentemente "no agresivas" para no introducir en el bien estados de tensión irreversibles o bien producir acciones difícilmente controlables. Éstas pueden ser realizadas con una simulación de carácter preventivo, en base a un modelo numérico o, si es posible, con una comprobación directa en base a un modelo físico. Para ello será necesario calibrar los parámetros de los materiales y elementos estructurales involucrados mediante técnicas no destructivas y chequear los resultados obtenidos mediante los modelos numéricos a través de técnicas no destructivas y mediante sistemas de monitorización.
	B.2.- Nuevas Tecnologías de intervención estructural sobre bienes inmuebles	Emplear modelos matemáticos, calibrados y comprobados mediante técnicas no destructivas y mediante monitorización estructural, que proporcionen un soporte válido para la elección de las intervenciones más idóneas.
	B.3.- Nuevas Tecnologías de mantenimiento preventivo¹⁰ sobre bienes inmuebles	Ampliar el campo de conocimiento existente en la actualidad sobre las metodologías existentes. Desarrollar nuevas metodologías que faciliten las intervenciones a realizar en Patrimonio construido.
	B.4.- Normativa técnica sobre la restauración de los bienes inmuebles	Estandarizar el empleo de métodos no destructivos mediante procedimientos técnicos que los gobiernen para objetivar, en lo posible, la toma de datos

⁸ El análisis de un terreno puede ser realizado utilizando metodologías geofísicas y de extracción de muestras del subsuelo. Las prospecciones geofísicas tienen la ventaja de proporcionar rápidamente y con un relativo bajo coste, informaciones sobre el subsuelo mediante la identificación de anomalías en las propiedades físicas de los materiales. Pueden además orientar a los estudiosos a una elección más precisa de los puntos de excavación. Además presentan la ventaja de poder actuar in situ sin alterar el estado del medio en examen.

⁹ La valoración del estado de conservación de un bien es el momento central para cualquier decisión en relación a la oportunidad de intervenir o no, de reparar, reforzar o adecuar la obra. La consecución de este objetivo exige una clara metodología de aproximación que proporcione paulatinamente todas las informaciones necesarias para la correcta formulación de un diagnóstico responsable.

¹⁰ Son varias las figuras europeas que defienden la teoría de rehabilitación consistente en establecer una estrategia de mantenimiento preventivo basada en el análisis de registros de movimientos (monitorización), experimentación en laboratorio e in situ mediante NDT y MDT de determinadas partes de la estructura, y mediante modelos matemáticos de la estructura (convenientemente calibrados mediante técnicas no destructivas) que permitan evaluar el comportamiento de la construcción frente a hipotéticas situaciones que pueden producirse en servicio y evaluar posibles reestructuraciones de la misma para prevenir posibles mecanismos de colapso. Entre éstas, por citar alguna, puede mencionarse a Jean-Louis Taupin, Arquitecto Jefe de los Monumentos Históricos de Francia, que textualmente apunta "La opción razonable es la de anticipar y preparar que la siguiente situación sea menos mala" (Taupin 2001). Giorgio Croci, Profesor en la Universidad "La Sapienza" de Roma y Presidente del Comité Científico del I Congreso Europeo de Restauración de Catedrales Góticas, dentro de las conclusiones extraídas de dicho Congreso (Croci 2001) apunta que "Se necesita, por lo tanto, para evitar los riesgos y asegurar la durabilidad, un mantenimiento e inspección constantes, con el fin de poder detectar a tiempo un aumento de los fenómenos desfavorables. Las investigaciones históricas, los estudios y el control de los parámetros principales que influyen en el comportamiento estructural deberían ser parte de la política global de inspección; es necesario, no obstante, que sean calibrados y ampliados en relación a las necesidades actuales".

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Por otro lado, se alude a que el impacto económico del turismo es cada vez más significativo. En su informe de prospectiva “Turismo: 2020 Visión”, la Organización Mundial del Turismo indica que, hoy en día, el Turismo es la mayor industria mundial, suponiendo el 12 % del PIB, y ha predicho que el turismo cultural será, en el futuro, uno de los cinco segmentos del mercado turístico claves. España ha estado siempre entre los países de mayor demanda turística, demanda que, poco a poco, va cambiando del “turismo de sol y playa” a otras ofertas turísticas más sostenibles, como el “turismo cultural”.

Es por ello que la adecuada Gestión del Patrimonio Cultural, tiene implicaciones muy positivas en la sociedad española, como son:

- Conservación de la herencia cultural y medioambiental.
- Promoción económica.
- Creación de empleo: El auge cultural puede contribuir a aportar innovación en la creación de empleo en campos de elevada satisfacción personal, y en la formación de los jóvenes. Además, el turismo cultural crea estabilidad de empleo, minimizando el efecto “pico” de otros tipos de turismo mucho más estacionales.
- Aumento de la calidad de vida.
- Dinamización de los centros históricos.
- Aumento de la tolerancia: Otra consecuencia de la correcta conservación del Patrimonio, que se encuentra demostrada, es que el reconocimiento de los valores de nuestra herencia cultural e histórica aumenta la tolerancia.

Con el fin de llegar a una conservación sostenible del Patrimonio Cultural, el término de Gestión del Patrimonio está cobrando un protagonismo creciente, unido, generalmente, a los conceptos de protección, conservación y puesta en valor de un Patrimonio cada vez conceptualmente más amplio. En nuestra sociedad actual, ya no es suficiente con efectuar iniciativas aisladas de conservación de los monumentos por el hecho de estar obligados a evitar su pérdida, sino que hay que pensar en una estrategia integral de conservación de la totalidad del Patrimonio Cultural, de modo que se garantice su futuro mantenimiento.

Todos estos cambios en la conceptualización del Patrimonio, y en el modo de gestionar su conservación, para que se produzca un mayor acercamiento del mismo a la Sociedad, requiere de la integración de nuevas disciplinas y la generación y aplicación de nuevos conocimientos, con el fin de que la Conservación del Patrimonio deje de ser un gasto, para transformarse en una inversión.

Los desafíos que tiene nuestra sociedad en la temática de conservación del patrimonio son explicitados en el documento al que estamos haciendo referencia, es decir al relacionado con la Línea Estratégica Patrimonio Cultural de la Plataforma Tecnológica Española de Construcción (PTEC). De entre dichos desafíos, en relación con la necesidad de la investigación desarrollada, podemos aludir a los siguientes:

- En relación con la rehabilitación del patrimonio cultural los desafíos son:
 - Formular una metodología de estudios previos que formule los procesos de intervención desde una visión de conjunto.
 - Desarrollo de nuevas tecnologías y procedimientos que incrementen la calidad de la intervención y se incorporen de manera compatible y durable.
- En relación con la conservación del patrimonio cultural es necesario salvaguardar el Patrimonio Cultural utilizando el potencial tecnológico e innovador del país. A este respecto hay una necesidad imperante en:
 - Detectar impactos de causas naturales o humanas que deterioran el Patrimonio Cultural, así como desarrollar técnicas lo menos destructivas posible tanto para anticiparlos como para mitigarlos.

Debido a los desafíos y necesidades aludidas dentro de la PTEC se han creado unos grupos de trabajo dentro de la línea estratégica de patrimonio cultural, de los que, en la Tabla 1.5, se refieren los que están directamente ligados con la temática de la investigación planteada. Del mismo modo en dicha Tabla 1.5 se relacionan los hitos a conseguir dentro de la Agenda Estratégica de Investigación de los grupos de trabajo referidos, así como el umbral temporal (periodos principales marcados: 2010, 2020 y 2030) estimados para su consecución.

Finalmente, como resumen, en el documento referido de la Línea Estratégica Patrimonio Cultural de la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción se recogen unos hitos generales a conseguir. En la Tabla 1.6 se incluyen los más relacionados con la temática de la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral.

1.4 Objetivos de la investigación.

A modo de resumen, las razones principales que han motivado el desarrollo de la tesis doctoral han sido las siguientes:

- Creciente relevancia que ha alcanzado en la sociedad actual la conservación del parque de edificios y de las infraestructuras, en particular las que constituyen el patrimonio histórico artístico.
- Alcance progresivo del límite superior del parque de vivienda en el país, lo que va a redundar en un mayor interés por el mantenimiento y rehabilitación de edificaciones, que amplificará los flujos económicos destinados al sector de la rehabilitación, y la necesidad de puesta a punto de las metodologías mencionadas.
- No haberse alcanzado el “techo productivo” del sector de la rehabilitación en España. Según informe Seopan 2008, la producción de la rehabilitación y mantenimiento tiene que crecer en torno a un 12% en nuestro país, para alcanzar los niveles europeos (en la actualidad el 36%).
- La rehabilitación de edificios es una propuesta sostenible de habitar, sin ocupar el terreno de la periferia de nuestras ciudades. Además, la recuperación de entornos construidos produce una mejora de las condiciones urbanísticas de una zona, lo que conlleva mayor bienestar social.
- Las estructuras de fábrica son grandes desconocidas, siendo muy limitado el conocimiento del comportamiento mecánico de los muros de hojas múltiples, así como la disponibilidad de estándares y códigos de buenas prácticas, para el diseño y control de las intervenciones (Valluzzi et al. 2004).
- Importancia de los Estudios Previos en el proceso de intervención, y dentro de éstos la fase de reconocimiento – análisis.

1.4.1 Objetivo general.

El objetivo principal contemplado en la Tesis Doctoral es **contribuir a la puesta a punto, en España, de métodos para la evaluación in situ de la fiabilidad de los elementos estructurales existentes en construcciones históricas de obra de fábrica.** En este sentido se pretende calibrar en laboratorio **las técnicas de gatos planos, hole drilling y mini-presurometría de fábricas** y aplicarlas en casos reales. En relación con lo anterior se ensayarán varios modelos de fábricas pétreas, cerámicas y de tierra, de diferente tipología, con el objetivo de caracterizarlas mecánicamente. Con dicha campaña de ensayos se va a contribuir a optimizar el empleo de alguno de los métodos existentes para la evaluación ligeramente destructiva de las propiedades de índole mecánico de las fábricas que componen los edificios del patrimonio construido y de su estado tensional de compresión.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 1.5: Grupos de trabajo de la PTEC-LE Patrimonio Cultural, relacionados con la investigación planteada. Hitos a conseguir dentro de la Agenda Estratégica de Investigación en los umbrales temporales de 2010, 2020 y 2030.

Grupo de trabajo	Hitos 2010	Hitos 2020	Hitos 2030
GT1 – ESTUDIOS PREVIOS	<p>Se dispondrá de un protocolo de estudio, ensayo y especificaciones, basado en la revisión de los procedimientos de trabajo existentes, que permitirán la correcta caracterización de los materiales, estructuras y sistemas constructivos antiguos.</p> <p>Los estudios previos se realizarán de forma necesaria y obligatoria previamente a cualquier intervención, y deberán ser capaces de proporcionar información sobre: Caracterización y estado de los materiales (tipología y estado actual de los mismos), caracterización del terreno, y caracterización y estado estructural.</p> <p>Desarrollo de muestreo y técnicas de estudio in situ no destructivas: Se seguirán protocolos de toma minimalista no destructiva de muestras de análisis, y se dispondrá de equipos tecnológicamente avanzados.</p>	<p>El desarrollo y aplicación de técnicas no destructivas para la realización de estudios previos permitirá la determinación de materiales y sus estados sin necesidad de toma de muestras.</p> <p>Se aplicarán metodologías de toma de muestras minimalista y no destructiva.</p> <p>Se empleará una instrumentación capaz de permitir hacer el seguimiento de la evolución del estado de la estructura durante la etapa de estudio, la cual puede ampliarse hasta el momento de la posible intervención, e incluso posteriormente a la misma.</p>	<p>Se evitará completamente la toma de muestras en los edificios, ya que el conocimiento de materiales, estructuras y sistemas constructivos de los mismos se llevará a cabo mediante técnicas de estudio no destructivas.</p> <p>Diseñar técnicas no destructivas de bajo coste.</p>
GT2 – DIAGNOSIS Y PROYECTOS DE INTERVENCIÓN	<p>Se dispondrá de los modelos de cálculo adecuados a cada edificio y la categorización de los resultados que permitan el conocimiento del comportamiento resistente de las estructuras históricas. Para ello dichos modelos será necesario calibrarlos y chequearlos mediante técnicas no destructivas y monitorización.</p>	<p>El diagnóstico de las edificaciones se efectuará de forma continua, mediante la monitorización permanente de las mismas.</p>	
GT 3 –PROYECTOS Y TÉCNICAS DE INTERVENCIÓN			<p>Se instalarán métodos de monitorización durante la obra, que permitirán un seguimiento a tiempo real de la actuación realizada, permitiendo conocer en cada momento el estado en que se encuentra, así como la evolución que sufre con el paso del tiempo.</p> <p>Se desarrollarán métodos de alerta que avisen al operador de posibles deterioros que esté sufriendo un elemento monitorizado, indicándole que problemas son los que está sufriendo y aconsejándole respecto a la técnica de intervención más adecuada.</p>

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Tabla 1.6: Hitos generales de la Línea Estratégica Patrimonio Cultural de la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción relacionados con la investigación desarrollada.

Periodo	Protocolos	Tecnologías	Materiales, estructuras y sistemas constructivos	Procesos	Automatización y robótica
2005		Aplicación de técnicas no destructivas	Toma de muestras minimalista de materiales mediante Técnicas no destructivas		
2010	Normalización de técnicas no destructivas	Desarrollo de nuevos métodos de auscultación			
	Unificación de normativa de ensayo	Globalización de conceptos de nuevas tecnologías de intervención			
2015		Ampliación de la sensibilidad y fiabilidad de las técnicas instrumentales			Sensores basados en nuevas técnicas y materiales
		Correlación de resultados entre distintas técnicas no destructivas			
		Optimización de sistemas de monitorización			
2020	Normas técnicas para ensayos de estudios previos	Desarrollo de técnicas no destructivas fiables			Desarrollo de software específico de cálculo de estructuras
	Protocolos de actuación basados en monitorización	Integración de materiales y tecnología en componentes inteligentes			
2025		Desarrollo total de las técnicas no destructivas existentes			
		Aplicación de técnicas no destructivas antes y después de aplicar los tratamientos			
		Tecnologías inteligentes compatibles y reversibles			
2030		Desarrollo de nuevas técnicas no destructivas		Metodologías de control de variación de parámetros estructurales Predicción de vida útil	Actuaciones automatizadas de monitorización

1.4.2 Objetivos específicos.

- Proponer una **metodología de intervención** en construcciones del patrimonio construido.
- **Clasificar el panorama general de técnicas no destructivas (NDT) y ligeramente destructivas (MDT)** aplicables a la rehabilitación del patrimonio construido en obra de fábrica, aportando referencias para una consulta más detallada de las mismas.
- **Analizar con detalle el estado del arte sobre las principales técnicas ligeramente destructivas aplicables a la caracterización mecánica de las estructuras de fábrica del patrimonio construido, así como para la estimación de los niveles tensionales movilizados en las mismas.**
- **Incrementar el desarrollo de tecnología para la evaluación y predicción del estado de nuestras construcciones.**
- Contribuir a la generación de “documentos técnicos” (normativos o no) que guíen a los entes involucrados en la aplicación de dichas metodologías.
- Crear un foro nacional de debate y de exposición de los avances y resultados que vayan surgiendo en España en relación a las técnicas de diagnóstico aplicadas a la rehabilitación estructural de construcciones, así como hacer coparticipes del mismo a una buena parte de los expertos en la materia a nivel internacional para favorecer el intercambio de experiencias. En este sentido, durante los cuatro años de duración de la investigación (2006-2010) se han promovido otras tantas reuniones técnicas bajo el acrónimo de REHABEND (Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido). Derivado de esta acción se han editado 4 libros que recogen parte de las experiencias nacionales y extranjeras en el ámbito de la Rehabilitación del Patrimonio.
- Creación del Laboratorio de Ensayos No Destructivos aplicados al sector de la Rehabilitación del Patrimonio Construido de la Universidad de Cantabria (LABEND-UC), así como la implementación progresiva de un Sistema de Gestión de la Calidad ISO 9001 en el mismo, acción que ha supuesto la redacción de instrucciones técnicas y la creación de registros de ensayos para una buena parte de las técnicas empleadas, teniendo en cuenta que para algunas de ellas no existe normativa de referencia.
- **Obtener conclusiones generales sobre las técnicas ligeramente destructivas aplicables a la caracterización mecánica de las estructuras de fábrica del patrimonio construido.**
- **Obtener conclusiones generales sobre la campaña de ensayos de calibración de las mismas realizados en laboratorio.**
- **Obtener conclusiones relativas a la aplicación de las técnicas tratadas en varias construcciones existentes, con la finalidad de evaluar su implementación en el proceso de rehabilitación.**

1.5 Metodología y plan de ensayos.

El carácter experimental de la tesis ha determinado claramente los rasgos de la metodología establecida. Se ha seguido el proceso descrito a continuación:

- En primer lugar se ha realizado una extensa revisión del estado actual del conocimiento, consultando artículos, actas de congresos, además de libros y otras fuentes científico-técnicas especializadas, tratando de identificar los aspectos más importantes concernientes a la temática de estudio y los resultados de los trabajos teóricos y experimentales realizados por diversos investigadores. Para ello, se ha arrancado desde los orígenes de cada una de las técnicas tratadas, relacionando de forma progresiva los avances obtenidos a lo largo del tiempo, hasta finalizar con la exposición de las

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

aportaciones más recientes. La consulta de dichas referencias bibliográficas, como no podía ser de otra manera, acompañó la investigación durante la totalidad de su trayectoria.

- Dado que se era un completo neófito en las técnicas susceptibles de estudio, desde inicio se contempló la necesidad de promover un foro de intercambio científico-técnico en la materia tratada, con la finalidad inicial de establecer contactos con los algunos de los principales agentes técnicos nacionales y extranjeros. Dada la buena acogida de la idea, se consideró pertinente mantenerla en años sucesivos con periodicidad anual. Actualmente, las Jornadas Técnicas Internacionales sobre Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido (REHABEND) están consolidadas gracias al apoyo de los Patrocinadores, Ponentes y asistentes, dado que con su esfuerzo y dedicación contribuyeron de forma decisiva al éxito del evento. Se aprovecha la oportunidad para agradecer, de manera especial, la participación de los Ponentes, dado que aportando sus diversos puntos de vista han hecho posible estimular al foro para seguir trabajando en esta apasionante línea que es el estudio y la rehabilitación del patrimonio construido.
- A partir del estado actual del conocimiento, se establecieron las directrices principales que sirvieron para diseñar el programa experimental de trabajos. Se insiste en que se partía de un conocimiento absolutamente nulo de las técnicas tratadas en la tesis doctoral, por lo que previamente a la ejecución de la campaña experimental fue necesario conseguir la financiación relacionada para la adquisición de los equipamientos involucrados. Una vez obtenida la financiación fue necesario dedicar un importante periodo de aprendizaje de la infraestructura científico-tecnológica adquirida, así como al desarrollo de otra infraestructura auxiliar, en base a los recursos humanos y económicos existentes. Ambas circunstancias supusieron una labor ardua a la que hubo que dedicar un tiempo importante.
- Una vez se había familiarizado con las técnicas de ensayo, fue necesario el diseño y construcción de los muros y muretes de calibración a emplear en laboratorio, así como de los sistemas auxiliares necesarios para su adecuado transporte.
- La siguiente fase contempló la ejecución de ensayos de caracterización de los materiales formes de las fábricas y, con posterioridad, la ejecución de los ensayos de calibración en Laboratorio sobre un total de cinco muros y varios muretes de diferentes morfologías y geometrías, sobre los cuáles fueron aplicadas las técnicas objeto de estudio.
- Una vez que ya se habían ejecutado una parte importante de los ensayos de laboratorio referidos, se inició la puesta en práctica de las técnicas in situ en varias construcciones (palacios, iglesias y otras construcciones singulares), de cara a evaluar la eficacia y la maniobrabilidad de las mismas en la realidad del mundo profesional.
- Se finalizó la tesis doctoral con una breve justificación teórico-experimental de los ensayos realizados.

En la Fig. 1.15 se presenta un diagrama de flujo que trata de sintetizar las etapas principales de la investigación desarrollada en la presente tesis doctoral.

Por su parte en la Fig. 1.16 se ilustra un cronograma esquemático de los trabajos realizados durante la tesis doctoral. Diferenciando entre los bloques temáticos de análisis del estado del arte existente e intercambio de experiencias con profesionales del ámbito de la rehabilitación del Patrimonio Construido (foro REHABEND); la obtención de recursos (€) vía proyectos I+D+i, compra de equipamiento y aprendizaje en lo relativo a su empleo; y la ejecución de la campaña experimental en Laboratorio (los ensayos correspondientes se han denotado en color verde) e in situ (los ensayos correspondientes se han denotado en color azul).

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

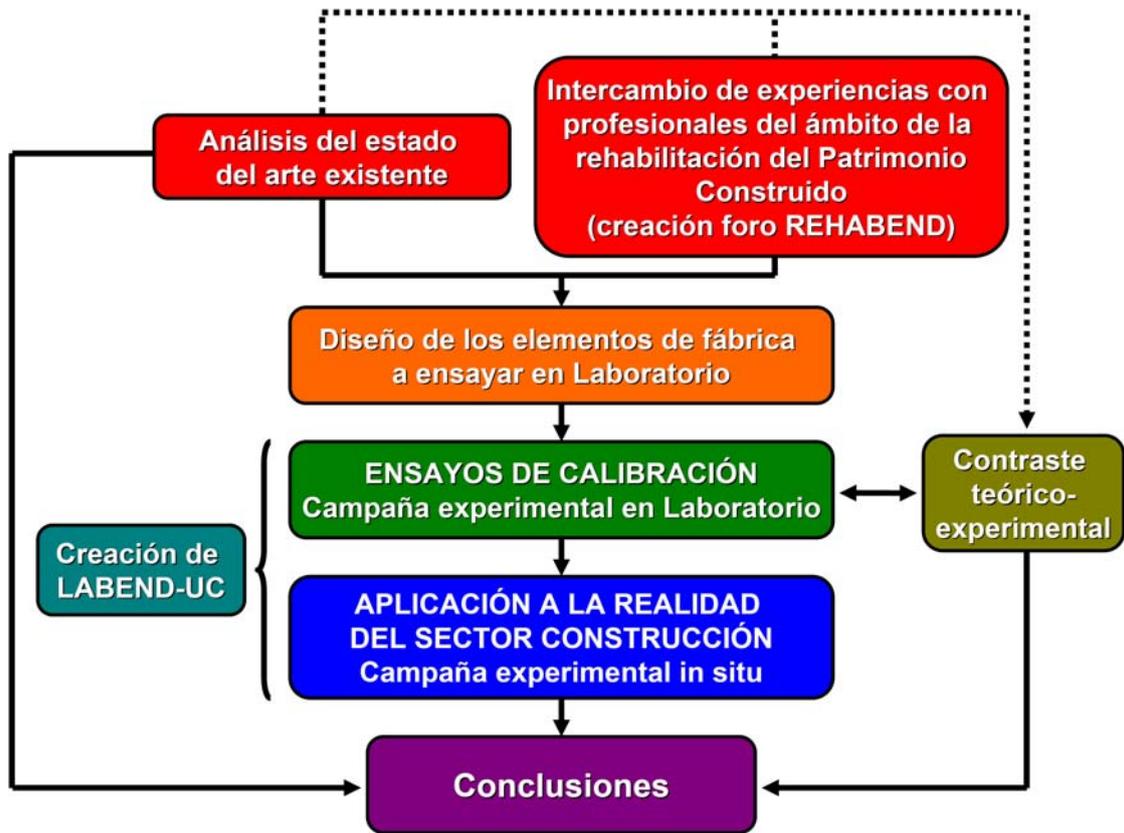


Fig. 1.15: Diagrama de flujo que “esquematiza” la investigación desarrollada en la tesis doctoral.

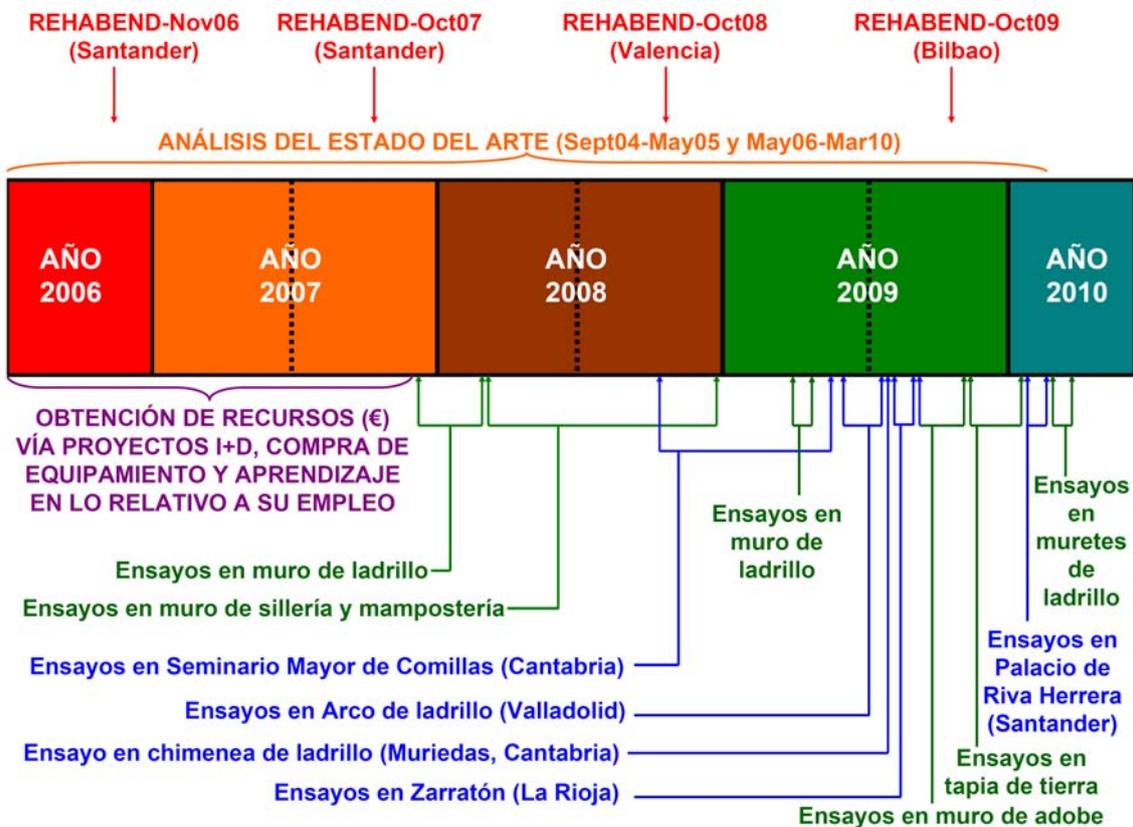


Fig. 1.16: Cronograma esquemático de los trabajos realizados en la tesis doctoral. Los ensayos denotados en verde corresponden a experimentación en laboratorio, y los marcados en azul a ensayos in situ.

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

Finalmente, en la Tabla 1.7 se resume el programa general de ensayos realizados tanto en laboratorio como in situ, discriminando entre los diferentes elementos portantes estudiados e indicando el número de ensayos de cada tipo realizados en los mismos.

Como puede comprobarse en dicha tabla el total de ensayos realizados ha sido de 79, más varias campañas de auscultación mediante técnicas acústicas (sónicas y ultrasónicas).

Tabla 1.7: Programa general de los 79 ensayos realizados en laboratorio e in situ.

	Elemento portante ensayado	Nº de ensayos realizados					Empleo de técnicas acústicas
		Gato plano simple	Gato plano doble	Hole drilling	Corte in situ	Dilatometría	
ENSAYOS EN LABORATORIO (52)	Muro y murete de sillería arenisca	2	2	9		1	Si
	Muro de mampostería caliza	2	1	4		3	Si
	Muro de ladrillo	2	2	6	1	1	Si
	Muretes de ladrillo	-	2	-	-	-	-
	Tapia de tierra compactada	2	1	3	-	2	-
	Muro de adobe	1	2	-	-	3	-
ENSAYOS IN SITU (27)	Muro de sillería arenisca de la Iglesia parroquial de Nª Sª de la Asunción, s. XIII (Zarratón, La Rioja)	1	-	2	-	-	-
	Muros de mampostería de arenisca del Palacio de Casa Fuerte, s. XVI (Zarratón, La Rioja)	-	2	-	-	1	-
	Muro de mampostería caliza del Palacio de Riva Herrera, s. XVII (Santander)	1	1	1	-	-	Si
	Chimenea de fábrica de ladrillo de Tejerías “La Covadonga”, finales s. XIX – principios s. XX (Muriedas, Cantabria).	-	-	1	-	-	-
	Arco de fábrica de ladrillo de la estación de Campo Grande, s. XIX (Valladolid)	2	2	-	-	-	-
	Muros de mampostería caliza y de ladrillo del Seminario Mayor de Comillas (Comillas, Cantabria)	4	4	4	-	1	Si
		17	19	30	1	12	

1.6 Organización del documento.

Capítulo 1

Este capítulo presenta una introducción a la Tesis desde un enfoque de lo general a lo concreto. Para ello tras proponer una metodología general de intervención en el Patrimonio Construido, que tiene como finalidad redundar en la importancia de la fase de Estudios Previos dentro del total de la intervención, se presenta el alcance de la investigación, apartado que centra la temática a desarrollar en la tesis dentro de los planteados en la introducción general referida. Finalmente, tras justificar las necesidades científico técnicas existentes en España para el desarrollo de esta investigación, se formulan los objetivos de la misma, la metodología empleada y el plan de ensayos.

Capítulo 2

En este capítulo se presenta, en primer lugar, una breve referencia a una posible clasificación, propuesta por el autor, de las técnicas no destructivas (NDT) y ligeramente destructivas (MDT) aplicables en el reconocimiento experimental in situ del patrimonio construido, aportando referencias de cada una para favorecer al lector la ampliación en el conocimiento de las mismas. Hasta prácticamente el final de la tesis se contempló la posibilidad de desarrollar el estado del arte de cada una de ellas, dada la información disponible fruto de la lectura de las referencias

Investigación teórico – experimental sobre ensayos ligeramente destructivos (MDT) utilizados para la caracterización mecánica in situ de estructuras de fábrica del patrimonio construido

propuestas (y otras) a lo largo de los más de cuatro años de duración de la investigación, si bien se ha obviado su inclusión para no desvirtuar el objeto concreto de la Tesis y no generar un documento excesivamente voluminoso. Una vez realizada dicha introducción general se pasa a describir detalladamente, con un enfoque retrospectivo (desde los orígenes de las técnicas hasta prácticamente nuestros días), cada una de las metodologías basadas en aspectos tensionales (o mecánicos), poniendo el énfasis en las dos técnicas tratadas con mayor profundidad, las de gato plano y el hole drilling.

Capítulo 3

En este capítulo se pasa revisión a los materiales y procedimientos empleados para la ejecución de la campaña experimental en laboratorio sobre muros de calibración. Se describe el procedimiento de uso de las técnicas empleadas con mayor generalidad en el desarrollo de la investigación, así como la infraestructura empleada.

Capítulo 4

Dicho apartado es el corazón de la tesis. En el mismo se explicita la campaña experimental realizada en laboratorio sobre 5 muros: una sillería arenisca, una mampostería ordinaria de piedra caliza, un muro de fábrica de ladrillo, un tapial y un muro de adobe; así como otros ensayos realizados sobre elementos de menor dimensión. En este sentido se detalla cada uno de los ensayos realizados, los resultados obtenidos y el contraste de los mismos, para estimar su bondad. Dentro de los datos empleados en el contraste teórico-experimental, se presentan los alcanzados mediante el modelado por elementos finitos de un ensayo de gato plano simple ejecutado sobre el muro de sillería arenisca, así como para la estimación de los niveles tensionales existentes en los puntos de ejecución de los ensayos hole drilling en el muro referido, previamente a la materialización de las perforaciones.

Fundamentalmente, fueron desarrolladas las técnicas de gato plano y hole drilling, si bien también se emplearon técnicas mini-presurométricas, técnicas acústicas y técnicas de caracterización de morteros, así como novedosas técnicas de adquisición de deformaciones como la extensometría con fibra óptica o la videocorrelación.

Capítulo 5

En este apartado se presenta el programa experimental in situ desarrollado en la investigación. En este sentido se exponen los resultados obtenidos en los siguientes elementos portantes:

- Muro de sillería arenisca de un edificio comenzado en el s. XIII (Iglesia de N^a S^a de la Asunción, Zarratón, La Rioja).
- Muros de mampostería arenisca de un edificio del siglo XVI (Palacio de Casafuerte – Zarratón, La Rioja).
- Muro de mampostería caliza de un edificio del siglo XVII (Palacio de Riva Herrera - Santander).
- Chimenea de fábrica de ladrillo de finales del siglo XIX – principios del siglo XX (Tejerías La Covadonga – Muriedas, Cantabria).
- Arco de fábrica de ladrillo del siglo XIX (Arco de ladrillo de Campo Grande – Valladolid).
- Muros de mampostería caliza y de ladrillo de un edificio del siglo XIX (Seminario Mayor de Comillas).

Capítulo 6

En este capítulo se presentan las conclusiones de la Tesis Doctoral y se plantean posibles líneas de investigación futura determinadas durante la realización de esta investigación.

Anexos

Finalmente se presentan una serie de Anexos con material complementario (registros de los ensayos realizados, etc.).

