

# La investigación como objetivo (en la rehabilitación de estructuras históricas)

*RESUMEN. En las estructuras actuales la investigación es un procedimiento (medio) para alcanzar un objetivo (fin) que permite el desarrollo de nuevas tipologías y materiales. En las históricas existe una bifurcación: los problemas que admiten soluciones de ámbito general se resuelven como en las actuales, y la investigación sigue siendo un medio; pero cuando requieren soluciones específicas se elaboran propuestas a partir del conocimiento consolidado (medio), difíciles de cuantificar porque no son asimilables a modelos de cálculo convencionales, y el objetivo (fin) es la ideación y realización del proceso iterativo que no concluye hasta obtener una seguridad razonable, es decir, la investigación*

*PALABRAS CLAVE: investigación, estructuras históricas, tipología, refuerzo, patología, modelo de cálculo.*

*ABSTRACT. In the current structures, research is a process (means) to achieve a goal (end) that allows the development of new styles and materials. In historic structures there is a bifurcation: the problems that allow general-level solutions are solved as they are nowadays and research continues to be a means, but when they require specific solutions these are developed from consolidated knowledge (means), difficult to quantify because they are not comparable to conventional computational models, and the goal (end) is the ideation and realization of the iterative process that does not end until a reasonable security is achieved, ie research*

*KEYWORDS: research, historic structures, typology, reinforcement, pathology, model calculation.*

**José Monfort Leonart**

ETS de Arquitectura. Universidad Politécnica de Valencia  
Camino de Vera s/n. 46022 Valencia  
jmonfort@mes.upv.es  
96 3877679

## **Biografía**

**José Monfort Leonart** es doctor en Arquitectura y Catedrático en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia; imparte docencia de Estructuras Metálicas para el título de grado, y de Técnicas de Intervención en el máster Conservación del Patrimonio Arquitectónico. Desarrolla su actividad profesional en el campo de la rehabilitación de estructuras históricas.

# La investigación como objetivo (en la rehabilitación de estructuras históricas)

## Contexto inicial: las estructuras actuales

En un planteamiento general la investigación es un proceso sistemático de actividades intelectuales y experimentales para obtener conocimiento sobre un problema elegido por su interés (científico, económico, estratégico, etc.), tratando de llegar a resultados que tengan aplicación práctica (no necesariamente en investigación básica) para una serie de casos similares, o supongan un paso intermedio que permita avanzar en esa dirección; esto es aplicable a cualquier ámbito y, en particular, al de las estructuras de edificación que voy a considerar.

De esta forma se estudian tipologías y materiales proporcionando criterios para su proyecto, cálculo y ejecución, recogidos en la literatura técnica y/o por distintas normas y códigos en el caso de que la legislación les atribuya carácter de exigencia. Ejemplos representativos de ello son la Instrucción EHE-08 para estructuras de hormigón, los Documentos Básicos (del Código Técnico de la Edificación) SE-A y SE-M para las metálicas y de madera respectivamente, SE Seguridad Estructural y SI Seguridad en caso de incendio para las acciones a considerar sobre ellas, más NCSE-02 para sismo; fuera de lo que es el ámbito de la normativa nacional, pero en este mismo contexto, podemos incluir las estructuras mixtas de hormigón y acero, regladas por el Eurocódigo 4 (UNE ENV 1994 Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero, Norma Europea Experimental), con amplia aceptación tanto por el organismo que lo patrocina como por su larga trayectoria con revisiones sucesivas. Sobre estas materias, además de la normativa citada, existe bibliografía que recoge tanto la teoría y ensayos que justifican sus criterios, como tablas, gráficos y alternativas para su comprensión y aplicación.

Estas referencias cubren ampliamente casi todas las situaciones habituales que se plantean en edificios de nueva construcción, e incluyen ensayos y pruebas a realizar en algún caso relacionado con ellas pero no recogido en los textos por su carácter menos frecuente; aquí la investigación como fuente de conocimiento actual y en desarrollo, corresponde al proceso de

evolución y optimización de tipologías y materiales representado en la parte superior del esquema de la figura 1, considerándola como el trayecto entre un problema de ámbito general planteado inicialmente -no estudia un caso concreto sino criterios para abordar situaciones nuevas- y su solución -en ocasiones resultan varias alternativas- con un tiempo no limitado para el estudio -cuando se obtengan nuevas soluciones estarán disponibles para su aplicación, entre tanto se trabaja con las ya conocidas-.

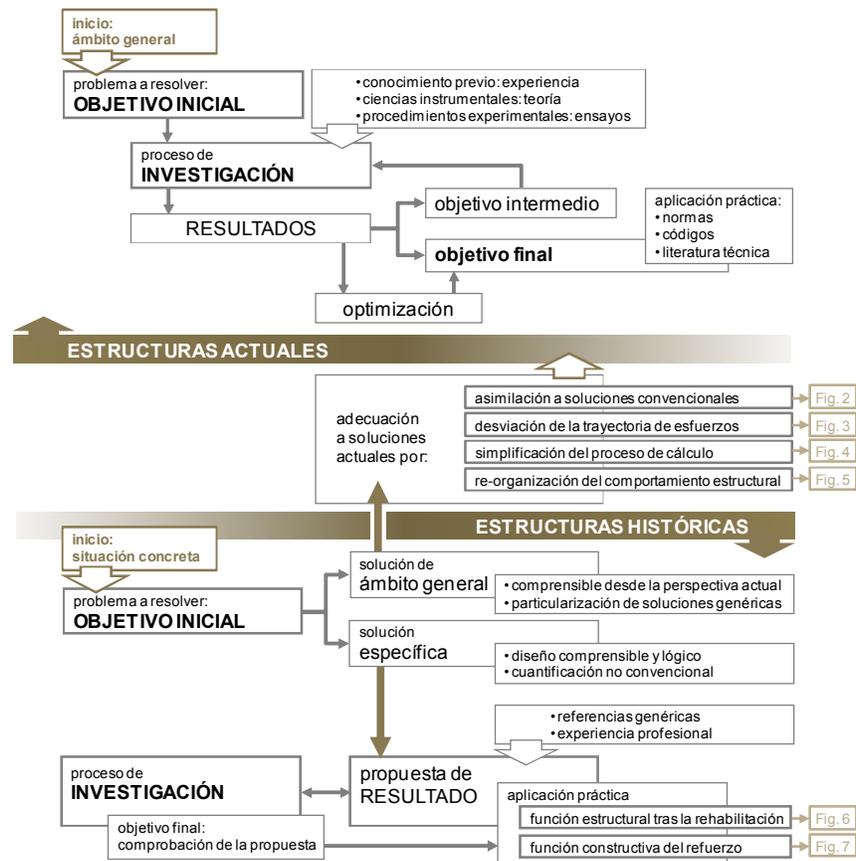


Fig. 1. Esquema del proceso investigación-diseño

### Contexto de las estructuras históricas

En el campo de la rehabilitación de edificios, en especial si tienen valor histórico y/o artístico, aparecen situaciones nuevas que requieren no sólo soluciones diferentes sino un enfoque distinto del problema: de entrada, los criterios de la normativa en estos casos -como exigencia cuando sea de

aplicación, o como referencia orientativa si no lo es- son más amplios que para la nueva construcción, porque disponemos de información sobre el estado de conservación y los daños apreciables en el edificio después del tiempo en uso; además, la decisión entre reforzar o sustituir un elemento estructural no se adopta sólo por criterios económicos o constructivos, sino que en ocasiones el valor cultural aconseja, o exige, su conservación desempeñando la función que le es propia, y si procede alguna intervención debe ser adecuada a su naturaleza; esto puede llevar a soluciones que requieren procedimientos de ejecución y evaluación específicos.

Estos problemas relacionados con la rehabilitación de estructuras históricas surgen tras un proceso de inspección, levantamiento de planos, evaluación histórico-artística (y arqueológica a veces) y peritación, previo a la puesta en valor del edificio en cuestión; su estudio no pretende obtener conocimiento para proyectar soluciones innovadoras, sino resolver situaciones originadas por su antigüedad -o cambio de uso, o para adaptarlo a exigencias actuales, o simplemente porque en su momento se construyó sin conocimiento suficiente del problema-; son situaciones concretas planteadas a medida que se realizan nuevas intervenciones de este tipo, cuyas soluciones frecuentes forman parte de lo que genéricamente se conoce como patología de la construcción, pero en este ámbito siempre aparecen problemas que requieren soluciones diferentes, o nuevos procedimientos constructivos para aplicar las convencionales.

### **Normativa**

Aunque no suele condicionar la solución de los problemas que se plantean en estos casos, es un marco de referencia a tener en cuenta, al menos como orientación, por lo que vamos a comentar algunos aspectos sobre este tema.

El Código Técnico de la Edificación, en el artículo 2 *Ámbito de aplicación* establece:

*3 (...) el CTE se aplicará a las obras de ampliación, modificación, reforma o rehabilitación que se realicen en edificios existentes, siempre y cuando dichas obras sean compatibles con la naturaleza de la intervención y, en su caso, con el grado de protección que puedan tener los edificios afectados*

*4 A estos efectos, se entenderá por obras de rehabilitación aquéllas que tengan por objeto actuaciones tendentes a lograr alguno de los siguientes resultados:*

*a) La adecuación estructural, considerando como tal las obras que proporcionen al edificio condiciones de seguridad constructiva, de forma que quede garantizada su estabilidad y resistencia mecánica*

por lo que con la reserva indicada para edificios con algún grado de protección, frecuente en muchos de los que aquí consideramos, el CTE es aplicable a los trabajos de rehabilitación estructural, y como la mayor parte

de su extenso contenido está dedicada a prestaciones exigibles para obra nueva, diferentes a las intervenciones sobre edificios existentes cuyas particularidades afectan tanto a estas prestaciones como al tipo de trabajos a realizar, el Documento Básico DB SE Seguridad Estructural incluye el Anejo D *Evaluación estructural de edificios existentes* para puntualizar estos aspectos como indica su artículo D.1.1 *Ámbito de aplicación, (...) en la evaluación estructural de edificios existentes puede existir un mayor grado de diferenciación de la seguridad que para el dimensionado estructural de edificios de nueva construcción, debido a consideraciones de tipo económico, social o medioambiental.*

Entre los aspectos diferenciados por estas situaciones, resaltaremos dos:

– En D.5.2.2 *Evaluación detallada,*

*2 Los coeficientes parciales particularizados se calibrarán para que sean consistentes con el nivel requerido de seguridad estructural. Normalmente serán menos conservadores que los coeficientes correspondientes incluidos en los documentos básicos correspondientes para el dimensionado de edificios de nueva construcción*

es decir, admite explícitamente coeficientes de seguridad inferiores a los establecidos para obra nueva, pero no cuantifica su valor

– En D.2.1 *Procedimiento* admite la evaluación cualitativa para verificar la capacidad portante de un edificio, y en D.6.1 *Capacidad portante* específica, entre otras cosas, que será adecuada si,

*a) el edificio se ha utilizado durante un período de tiempo lo suficientemente largo sin que se hayan producido daños o anomalías (desplazamientos, deformaciones, fisuras, corrosión, etc.)*

y limita su campo de validez a que,

*f) durante el período de tiempo restante no se prevean cambios que pudieran incrementar las acciones sobre el edificio o afectar su durabilidad de manera significativa*

situación que no se produce en muchas ocasiones.

Independientemente de estas consideraciones para justificar la seguridad de una estructura existente, en D.8.3 *Medidas constructivas* indica,

*2 Los elementos de refuerzo de una estructura se dimensionarán según las especificaciones para el dimensionado estructural de edificios de nueva construcción. Alternativamente, las verificaciones relativas a los elementos de refuerzo se podrán basar en la aplicación directa de los métodos de análisis de seguridad*

es decir, si a consecuencia de la evaluación se debe reforzar la estructura, los elementos necesarios para ello deben proyectarse siguiendo las especificaciones del CTE para obra nueva, con lo cual diferencia claramente los criterios de evaluación para justificar la seguridad de una estructura existente, o parte de ella, y los que se deben aplicar al refuerzo que eventualmente pueda ser necesario.

## Casuística

Voy a considerar algunas soluciones particulares adoptadas en procesos de rehabilitación, para enmarcarlas después en un planteamiento general con un criterio de clasificación; en ellas, el punto de partida es la respuesta a situaciones concretas no elegidas deliberadamente como problema a resolver, sino sobrevenidas durante alguna intervención.

– Los forjados con viguetas de madera y entrevigado de cualquier tipo (revoltones de fábrica, rastreles y entabacado de ladrillo o tablero, etc.) se pueden reforzar mediante una solera de hormigón con mallazo, conectada a las viguetas por distintos procedimientos para formar una pieza mixta de madera y hormigón que, trabajando solidariamente, incrementa su rigidez y capacidad para reparto de cargas, figura 2; conceptualmente este sistema es similar a las vigas mixtas de hormigón y acero, pero aquí los conectadores, elementos metálicos anclados con epoxi a la vigueta y embebidos en el hormigón, resultan flexibles por la escasa dureza de la madera que se aplasta localmente; partiendo de este criterio se han desarrollado estudios teóricos contrastados por ensayos que permiten estimar con suficiente fiabilidad la resistencia y rigidez de esta solución, no recogida por ninguna normativa pero con numerosas referencias -sobre todo italianas, donde primero se estudió el problema- como artículos, tesis doctorales<sup>(1)</sup> y programas de cálculo, que permiten su empleo con criterios adecuados a la práctica profesional.

En este caso la investigación ya ha producido resultados mediante la asimilación a una solución convencional para las estructuras actuales completada con pruebas adicionales.

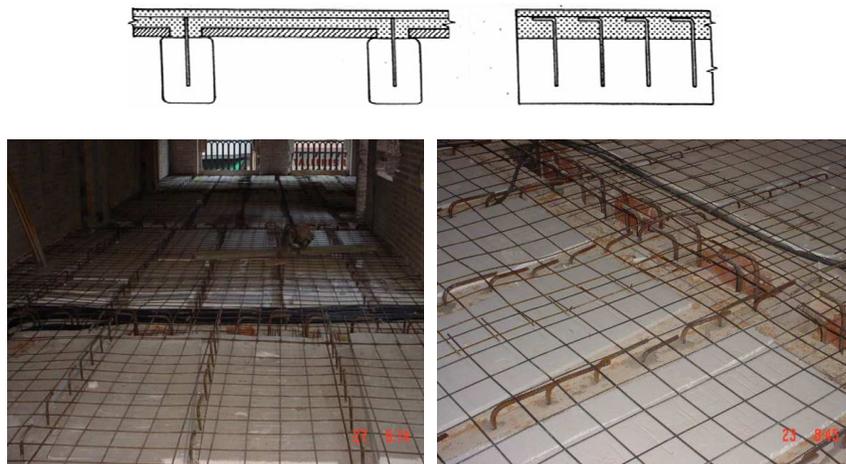


Fig. 2. Asimilación a una solución convencional

– Existen situaciones que no son conflictivas en las construcciones actuales pero plantean dificultades en intervenciones sobre edificios históricos, como transmitir cargas concentradas a un muro existente de poca resistencia, por ejemplo adobe, tapial o mampostería; la acción debe ser moderada puesto que esta situación no es aconsejable si su valor es importante. La solución es una disposición constructiva que reparta la carga sobre una superficie amplia para originar presiones reducidas en el muro, cuyo espesor es limitado por lo que la longitud de apoyo debe ser grande; además, cualquier intervención sobre un elemento histórico debe ser poco invasiva y ha de quedar integrada en el carácter conservacionista del proyecto.

En la figura 3<sup>(2)</sup> se aprovecha la elevación del muro preexistente, formada por fábrica de ladrillo y un zuncho de hormigón en la coronación superior, para “colgar” la viga en celosía de la cubierta que debe apoyar sobre él; de esta manera la carga puntual llega al muro mediante un zuncho con rigidez para repartirla longitudinalmente. Esta solución emplea elementos traccionados, los redondos que forman el dispositivo de apoyo, para transmitir el esfuerzo que origina compresión en el muro, provocando la circulación indirecta de acciones a través del zuncho que actúa como pieza de reparto desviando lo que sería la trayectoria natural de los esfuerzos.



Fig. 3. Desviación de la trayectoria de esfuerzos

– En ocasiones una intervención de este tipo encaja en lo que podemos considerar soluciones convencionales, pero la evaluación de la capacidad resistente del elemento reforzado no es posible con los criterios habituales. La figura 4 representa una disposición constructiva para reforzar estructuras de hormigón con elementos metálicos, cuya ejecución no plantea más dificultad que el cuidado necesario para acoplar la obra existente con la nueva; sin embargo, el cálculo de estas soluciones combinadas no se puede tratar como una pieza mixta de hormigón y acero porque la conexión entre ambos materiales no garantiza que trabajen solidariamente: la estructura preexistente ha estado, y está, cargada, por lo que es previsible que cuando actúen nuevas acciones su tendencia natural será “circular” a través de ella, que a su vez, si se producen deformaciones importantes cerca del agotamiento, transferirá parte de la carga adicional al refuerzo sin que se pueda cuantificar con precisión ese valor; por tanto, los dos materiales no trabajan conjuntamente en proporción a su rigidez, sino que uno transmite al otro a través de la conexión la carga que no puede asumir. Una simplificación razonable para la aplicación práctica, desde el punto de vista de la seguridad que proporciona, consiste en despreciar la capacidad portante del hormigón preexistente calculando el refuerzo metálico y el sistema de conexión para absorber todas las acciones, asegurando durante el proceso de ejecución su posibilidad de entrada en carga.



Fig. 4. Simplificación del proceso de cálculo

– El arco es un elemento estructural de la arquitectura desde época muy remota, cuyo mecanismo resistente no se pudo explicar satisfactoriamente hasta la aparición de la estática gráfica en el siglo XIX; la existencia de empujes era conocida y tenida en cuenta desde bastante antes por procedimientos empíricos o puramente geométricos muy alejados del

comportamiento real, que han permitido llegar hasta hoy a muchos edificios por las tensiones reducidas que se alcanzan en las dovelas -una situación crítica se producía en el momento del descimbrado, como se deduce del comentario recogido por Heyman<sup>(3)</sup> “si al retirar las cimbras de un arbotante se sostiene durante 5 minutos, entonces lo hará durante 500 años”-.

Una tipología que incluye este elemento y perdura a través de siglos, es el claustro abovedado abierto al patio central que circunda por medio de arcos, de una o dos alturas, figura 5<sup>(4)</sup>; para la estabilidad transversal al corredor de este conjunto la resultante de las acciones gravitatorias, que son las más importantes, incluyendo los empujes debe pasar por la base de sustentación (cimentación de los soportes), y en muchas construcciones actualmente en uso esta exigencia es difícilmente justificable, incluso con los desplomes y grietas (equivalentes a rótulas) que alteran el mecanismo resistente inicial del sistema, por lo que sorprende el equilibrio alcanzado cuya comprensión requiere admitir la influencia favorable, y quizás no prevista, de algunos elementos: función de arriostamiento en soleras, mecanismo de viga en elementos que no aparentan función estructural y, sobre todo, el carácter estabilizador de los rellenos que no corresponden a una ejecución deficiente como en principio se podría pensar.

Cualquier intervención actual sobre una construcción de este tipo debe garantizar su estabilidad mediante elementos estructurales reconocibles por su función, sin necesidad de contar con otros cuyo trabajo sólo se comprende por la evidencia de los hechos; aquí hay un problema con la componente horizontal del empuje originado por la bóveda en la cabeza de los machones, que se puede equilibrar uniendo sus arranques con un tirante trabajando a tracción. Esta propuesta plantea un conflicto de carácter historicista porque el tirante no es un elemento característico de estas construcciones, pero aunque esto es cierto sigue siendo necesario; una solución de compromiso entre la necesidad estructural y los requisitos formales consiste en situar el tirante embebido en la solera sobre el arco, donde realiza esta función de manera no tan eficaz pero sin manifestarse aparentemente.

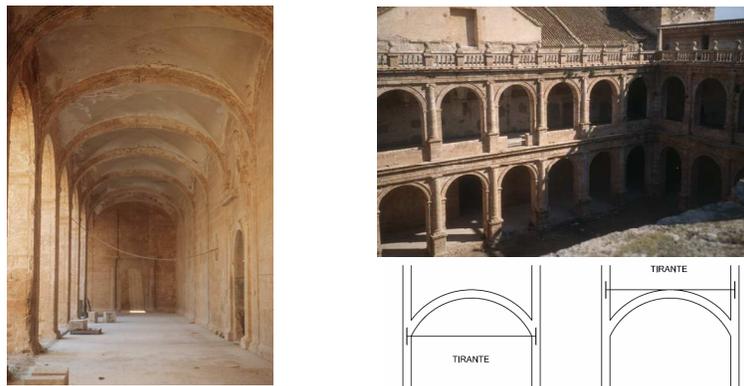


Fig. 5. Re-organización del comportamiento estructural

– Por las modificaciones efectuadas durante el proceso de intervención un elemento constructivo puede pasar a tener una función estructural que antes no desempeñaba.

En el ejemplo de la figura 6<sup>(5)</sup>, un panel vertical de hormigón con grandes huecos que no recibe acción de viento significativa, muy deteriorado, se utiliza después de la rehabilitación como soporte del acristalamiento necesario para alcanzar las condiciones ambientales adecuadas en el interior del recinto; la reparación constructiva es convencional, con materiales actuales como morteros de resinas, pero al convertirse en una pieza de cerramiento con dimensiones relativamente grandes (7x3,50 m) debe soportar una presión apreciable de viento, que resulta difícil de peritar por su geometría y la combinación de materiales antiguos y nuevos. En este caso se recurrió a una prueba de carga haciendo que sobre él actúen fuerzas de componente horizontal transmitidas por un cable inclinado con una carga puntual en su tramo central.



Fig. 6. Función estructural tras la rehabilitación

– El refuerzo de un elemento en ocasiones debe satisfacer además de los requisitos estructurales otros de tipo constructivo, puesto que el objetivo no es la adecuación de la estructura sino la del edificio.

En la figura 7<sup>(6)</sup> se observa un forjado existente con viguetas de madera, de sección aproximadamente cuadrada dispuestas en diagonal con revoltones de ladrillo; por el cambio de uso tras la rehabilitación necesita refuerzo y se deben solucionar otros problemas como deformaciones apreciables por flexión, desniveles por su geometría (las viguetas provienen de rollizos troncocónicos con diámetro diferente en sus extremos), y variaciones de sección entre las distintas piezas que oscila de 22x22 a 32x32 cm.

El refuerzo debe proporcionar el nivel de suelo acabado, que estará formado por tablero microlaminado de 24 mm más tarima de 20 mm con cámara para instalaciones, que requiere un canto importante de la vigueta reforzada cuya apariencia se pretende que no resulte desproporcionada aunque queda oculta.

Se plantea reforzar la vigueta existente con otra pieza continua de 10x12 cm unida a ella, utilizando como elementos de conexión tacos de 10x10 cm y altura variable hasta alcanzar el nivel de suelo en proyecto, todo ello de madera; los conectadores van encolados a los dos cordones que forman la vigueta reforzada y con una varilla metálica alojada en taladros previamente realizados unida con resina epoxi.

Resulta así una pieza compuesta con enlaces discontinuos, que se puede asimilar a una viga mixta de madera-madera con conectadores flexibles (por la altura del taco, que oscila entre 0 y 15 cm), o a una viga Vierendeel formada por dos cordones, el preexistente y el de refuerzo, con los conectadores como montantes. Por las dudas que plantea el modelo de cálculo se realiza una prueba de carga, considerando dos soluciones posibles: una con conectadores cada 30 cm y otra a 60 cm; en ambas se aplica una carga similar a la que debe soportar la vigueta en servicio y resultan flechas máximas de 3,10 y 3,61 mm respectivamente (aceptables teniendo en cuenta que la luz es 5,10 m), con recuperaciones tras la descarga prácticamente completas en los dos casos; por ello se adopta la segunda solución, más ligera y sencilla de ejecutar, que resuelve a la vez el refuerzo de las viguetas y la nivelación del pavimento acabado.



Fig. 7. Función constructiva del refuerzo

### **Y después de esto,**

como resumen que pretende sistematizar los casos del punto anterior, los problemas que se plantean en la rehabilitación de estructuras históricas, esquematizados en la parte inferior de la figura 1, provienen de situaciones concretas apreciadas durante el estudio inicial, proyecto o intervención sobre algún edificio, y sus soluciones se pueden clasificar en dos grupos:

- De ámbito general; tras el análisis se plantea una propuesta generalizable a casos similares o se aplica una solución-tipo actual adaptada al problema concreto, del que tanto su origen como la respuesta son comprensibles, lógicos y cuantificables desde el punto de vista actual del conocimiento; se incluyen aquí los cuatro primeros casos del epígrafe anterior.
- Específicas; para problemas que requieren una solución aplicable sólo a esa situación concreta por su singularidad; el diseño es comprensible y lógico para la función de refuerzo requerida, pero su cuantificación para verificar los requisitos de seguridad exigibles es difícil porque no se pueden asimilar a un modelo de cálculo fiable; son de este tipo los dos últimos ejemplos anteriores

En las del primer grupo, tanto la solución propuesta como el criterio de comprobación son semejantes a los empleados en estructuras actuales; el carácter histórico de la estructura sólo es un aspecto adicional a tener en cuenta al particularizar para cada caso una respuesta genérica; no requieren investigación especial, aplican lo ya investigado que constituye lo que podemos denominar cuerpo de conocimiento consolidado.

Las soluciones del segundo grupo siempre necesitan al final del proceso alguna comprobación adicional para garantizar la fiabilidad de la propuesta inicial, cuyo origen también está en la experiencia profesional y otras referencias genéricas como cauce natural de razonamiento: los criterios y requisitos de esta última etapa para transformar una propuesta en solución, son el objetivo de la investigación necesaria que, en este caso, no genera conocimiento aplicable a otras situaciones puesto que sólo resuelve un problema concreto, pero el término investigación no se asocia a la amplitud del resultado obtenido sino al carácter sistemático del procedimiento que lo genera.

En el esquema de la figura 8, que simplifica el de la 1, se aprecia que en el contexto de las estructuras actuales la investigación es un procedimiento (medio) para alcanzar un objetivo (fin). En las estructuras históricas existe una bifurcación en el trayecto: los problemas que admiten soluciones de ámbito general se analizan y resuelven como los anteriores, a partir de criterios habituales de la práctica profesional, y en ellos la investigación sigue siendo un medio; pero cuando requieren soluciones específicas, durante el proceso se elaboran propuestas a partir del conocimiento consolidado (medio), en ocasiones difíciles de cuantificar porque no son asimilables a modelos de cálculo convencionales, que requieren actividad intelectual para elaborar los criterios de comprobación y constatar la validez

de sus resultados; en ellos, el objetivo (fin) es la ideación y realización del proceso iterativo que no concluye hasta alcanzar una seguridad razonable o rechazar la propuesta, es decir, la investigación.

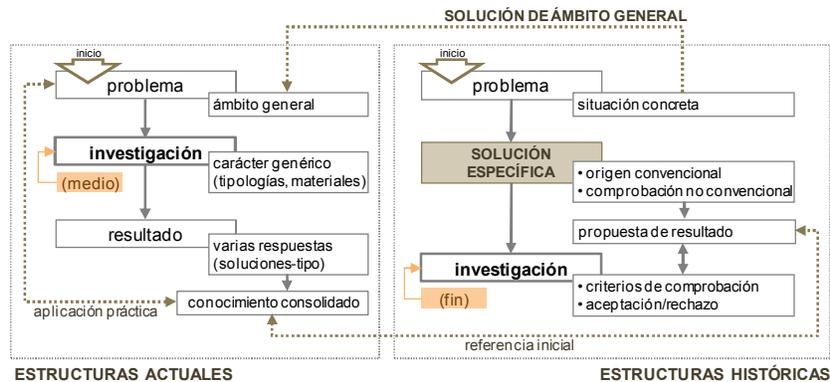


Fig. 8. Esquema simplificado del proceso

### Notas

- (1) PARDO, J.L. *Estructuras mixtas de hormigón-madera aplicadas a la rehabilitación de forjados*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 1997
- (2) Casa del Mestre Peña. Sagunto
- (3) HEYMAN, J. *Teoría, historia y restauración de las estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 1995
- (4) Biblioteca Valenciana. Antiguo Monasterio de San Miguel de los Reyes. Valencia
- (5) La Nau. Antigua nave Talleres Generales del Puerto de Sagunto
- (6) Museo del Siglo XIX. Antiguo Convento del Carmen. Valencia