

# ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UN REFUERZO ESTRUCTURAL

(FUNDAMENTAL ASPECTS FOR A STRUCTURAL STRENGTHENING DESIGN)

Climent Molins i Borrell. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Isabel Serrà i Martín. Dra. Arquitecta y Arquitecta Técnica

Universitat Politècnica de Catalunya

Fecha de recepción: 13-IV-04

408-2

ESPAÑA

## RESUMEN

*El presente artículo tiene por objeto resumir y analizar, de forma conceptual, algunos de los aspectos fundamentales que deben ser considerados al acometer un trabajo de refuerzo estructural. Se describe el proceso racional que llevará a decidir si el refuerzo es necesario o no. Se realiza un análisis conceptual de distintas alternativas de refuerzo, de los tipos de refuerzo y de su movilización. También se resumen las comprobaciones que deben llevarse a cabo, haciendo una atención especial a la unión entre el refuerzo y la estructura original así como a las posibilidades que brinda la utilización combinada de ensayos in situ con la simulación numérica y, finalmente, se analizan algunos aspectos relacionados con la utilización de materiales modernos para el refuerzo, como resinas sintéticas y otros productos. En conclusión, lo primero que el técnico debe plantearse es si el refuerzo es necesario o no y, en caso afirmativo, acotar muy bien las partes o elementos de la estructura que deben ser reforzados así como las propiedades resistentes o deformacionales que deben ser mejoradas, prestando especial atención a la elección del tipo de refuerzo y de los materiales a emplear. Ello implica una elevada exigencia técnica en conocimiento de materiales, en métodos de análisis y de comprobación al técnico responsable del refuerzo. Por otra parte, la economía de medios y la sostenibilidad, obligan a lograr la máxima colaboración de la estructura original, lo cual es un factor determinante en el diseño del refuerzo.*

## SUMMARY

*This article summarizes and analyses, conceptually, some of the fundamental aspects that should be considered when undertaking a work of structural strengthening. It is described the rational process that must be taken to decide if a strengthening is necessary or not. A conceptual analysis of different alternatives of strengthening, its types and its mobilization is illustrated. It is also summarized the required verifications doing a special attention to the union between the reinforcement and the original structure as well as to the possibilities that offer the combined use of in situ tests with the numerical simulation and, finally, analyses some aspects related to the use of modern equipments for the strengthening, as synthetic resins and other products. In conclusion, the first thing that the technician must consider it is if the reinforcement is necessary or not and, in affirmative case, to limit the parts or members of the structure to become strengthened as well as the resistant properties that must be improved, paying special attention to the election of the type of strengthening and the materials to use. It implies a high technical exigency in knowledge of materials, in methods of analysis and verification to the technician responsible of the strengthening. On the other hand, the economy of means and the sustainability, force to obtain the highest collaboration of the original structure, which is a determinant factor in the design of the strengthening.*

## 1. INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan algunas de las ideas fundamentales que el técnico en estructuras debe tener en cuenta al acometer un trabajo de refuerzo estructural. Es bien conocido que el refuerzo de estructuras es una de las la-

bores más complejas y exigentes para los técnicos. Esta complejidad, y por qué no decirlo, dificultad, surge de las especiales condiciones que reviste intervenir en la estructura de un edificio o construcción existente. Siguiendo en esta dirección, debe tenerse en cuenta que los procedimientos empleados, aunque basados en la resistencia de mate-

riales, no son habituales y generalmente no están específicamente recogidos en la normativa vigente de construcción.

A lo largo del artículo se presenta, en primer lugar, la distinción entre rehabilitación y refuerzo junto con el proceso racional que debe conducir a la toma de decisiones que, finalmente, llevará a plantear un refuerzo estructural o no; para ello es fundamental disponer de unos estudios previos que permitan delimitar suficientemente las incertidumbres que deberá gestionar el técnico durante el proceso. En segundo lugar, se incide en los principales aspectos que se deben tener en cuenta en el diseño, proyecto y ejecución de los refuerzos estructurales. Entre ellos se tratan las distintas alternativas de refuerzo, los tipos de refuerzo y su movilización, las comprobaciones a realizar y los materiales para el refuerzo.

### 1.1. Refuerzo y rehabilitación

Para empezar, es importante distinguir entre un refuerzo y una rehabilitación ya que, si bien en ambos casos se trata de actuaciones sobre edificios o construcciones ya existentes, la diferencia básica está en el objetivo que persiguen.

Así, cuando únicamente se pretende aumentar la resistencia, la rigidez o ambas propiedades simultáneamente de una estructura o de un elemento estructural, estamos hablando de una intervención de refuerzo. Ahora bien, si el objeto de la intervención es para que un edificio o construcción pueda emprender un nuevo ciclo de vida (reciclar), estamos hablando de una rehabilitación. Por tanto, se entiende que un proyecto de rehabilitación pueda consistir en una reparación o en un refuerzo o en ambos, mientras que un proyecto de refuerzo estructural puede o no formar parte de un proyecto de rehabilitación (1).

Habitualmente, la necesidad de rehabilitar surge por alguna de las siguientes razones:

- Como resultado de las inspecciones periódicas de los edificios, cuando se han observado lesiones, independientemente de las causas que las motiven.
- Cuando se detectan vibraciones en el edificio.
- Cuando se pretende cambiar el uso al que estaba destinado inicialmente el edificio.
- Cuando se pretenden mejorar las condiciones de uso del edificio.
- Cuando se pretende reformar el edificio.

Por otra parte, las causas que suelen motivar la necesidad de un refuerzo son:

- El incremento de los valores de las cargas a las que puede estar sometida la estructura, debido a un cambio de uso o bien al incremento de sobrecargas de uso con el paso del tiempo (figura 1).

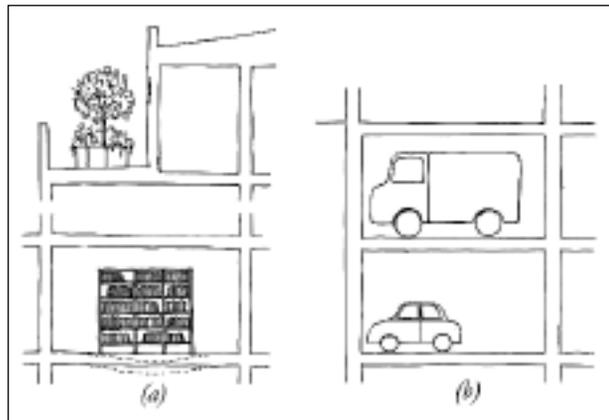


Figura 1.- Incremento de las cargas debido a (a) incremento de la sobrecarga de uso con el paso del tiempo (b) cambio de uso del edificio.



Figura 2.- Pérdida de sección por oxidación de la estructura metálica.

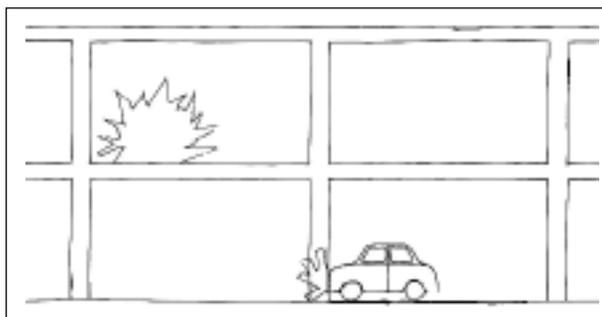


Figura 3.- Efecto de acciones accidentales como fuego o choque.

- La disminución de la resistencia de la estructura, por degradación del material estructural o bien por la pérdida de sección de alguno de sus elementos (figura 2).

- El efecto de acciones accidentales como sismo, fuego, explosión, choque (figura 3).

- Cambios en la geometría existente por reformas del edificio, como el apeo de un pilar (figura 4) o la apertura de huecos en el forjado para la instalación de ascensor o la construcción de una nueva escalera.

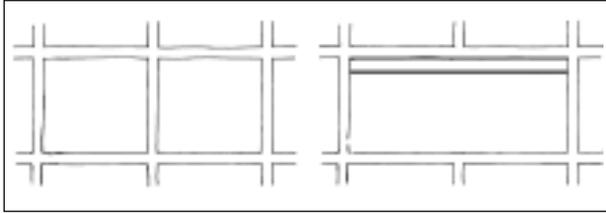


Figura 4.- Cambio en la geometría existente por apeo de un pilar.

## 1.2. Estudios de información

En cualquiera de los casos mencionados, para redactar el proyecto de rehabilitación es imprescindible conocer bien el edificio y su estado actual: geometría, soluciones constructivas y materiales, así como la localización y el estado de las lesiones, si es el caso.

Ello implica una primera fase de información, la cual debe contemplar los siguientes aspectos:

- Recopilación y estudio de la documentación existente.
- Contrastación de la documentación con la realidad del edificio, especialmente a nivel constructivo, comprobando mediante catas las soluciones constructivas reales, la geometría de los elementos que las componen, e identificando los materiales realmente empleados.
- Levantamiento de lesiones, incluyendo el tipo, su estado actual y su localización.
- Caracterización mecánica de los materiales, incluyendo el terreno y la cimentación además de los materiales estructurales.

Cuando no se dispone de documentación previa o bien ésta es incompleta, resulta totalmente imprescindible llevar a cabo una inspección minuciosa de la estructura para recopilar la información necesaria. Aunque la tecnología aplicada a la inspección sigue avanzando, en muchos casos la apertura de catas sigue siendo la única forma de comprobar las soluciones constructivas empleadas y la geometría de los elementos que las componen.

## 1.3. Estimación de la capacidad portante de la estructura existente

Una vez finalizada la fase de información, se debe realizar una primera estimación de la capacidad portante de la estructura del edificio, tanto a nivel global, como de cada uno de los elementos resistentes que la componen, incluida la cimentación. Es importante destacar que siempre existe un cierto grado de incertidumbre en los datos que han servido de partida para la estimación de la capacidad portante y que, en consecuencia, se transmitirá a los resultados obtenidos.

Llegados a este punto, y en el caso de que existan lesiones en el edificio, debería ser posible dar explicación a las



Figura 5.- Grieta producida por una deficiencia constructiva.

mismas. Puede ser que dichas lesiones sean debidas a deficiencias constructivas -como puede ser un retacado completo de una partición con el forjado superior-, en cuyo caso quizá no será necesario reforzar la estructura, o bien a deficiencias estructurales. Será en este último caso cuando el proyecto de rehabilitación deberá contemplar el refuerzo estructural. A partir de los resultados obtenidos con la estimación de la capacidad portante de la estructura existente, se establecerá qué es lo que se tiene que reforzar: la cimentación, el sistema portante vertical (pilares, muros), los forjados a esfuerzo cortante, los forjados a flexión, etc., y por qué motivo.

Otro ejemplo de lesión producida por deficiencias constructivas se presenta en la figura 5, en la que puede apreciarse una grieta abierta en la fachada de un edificio de viviendas de Barcelona. Después de comprobar la seguridad y el comportamiento de la estructura del edificio se determinó que la causa de esta lesión, así como de otras que presentaba el edificio, era la inexistencia de junta constructiva, a nivel de cerramientos, entre los dos edificios colindantes y agravado por el hecho de que el sistema estructural de ambos edificios es totalmente distinto: uno a base de pilares y forjados bidireccionales de hormigón armado y el otro a base de muros de carga y forjados de viguetas metálicas.

## 2. ALTERNATIVAS DE REFUERZO

Cabe señalar que en ocasiones es posible recuperar la seguridad estructural mediante soluciones alternativas. Así, si la estructura resiste bien las cargas permanentes, una simple limitación en el uso del edificio puede ser una alternativa mucho más económica que el refuerzo. También en el caso de edificios antiguos en los que, con los años, se han ido superponiendo varias capas de pavimento, resulta fácil disminuir las cargas muertas con sólo eliminar las capas de pavimento sobrantes.

Un ejemplo para ilustrar los excesos de cargas muertas puede ser el edificio de la actual residencia Montblanc en Manresa donde una construcción industrial de la segunda mitad del siglo XIX experimentó diversos cambios de uso y una sucesiva superposición de pavimentos (figura 6). La existencia de problemas en el edificio se reveló a través de una excesiva deformación a flexión de los forjados, visible a simple vista. Al llevarse a cabo una inspección del edificio se comprobó que su estructura resistente estaba constituida por forjados y jácenas de madera apoyados en los muros de fábrica del cerramiento exterior y en pilares de fundición muy esbeltos rematados por capiteles. Se comprobó que una de las posibilidades reales de intervención consistía en remover la carga muerta con lo que la estructura podía resistir las sobrecargas de uso de las actuales normativas con un nivel adecuado de seguridad, además de recuperarse parte de la flecha en los forjados. No obstante, la intervención que finalmente se llevó a cabo consistió en el refuerzo de los pilares de fundición me-

dante la inyección de mortero y el refuerzo mediante atirantado de las jácenas de madera.

En los casos en que las deficiencias estructurales se producen de forma generalizada, puede resultar más económico derribar el edificio o bien construir una nueva estructura si hubiera razones para conservar el edificio. Uno de los ejemplos más actuales y complejos, aunque hoy ya no aparecen en la primera línea informativa, son las intervenciones sobre edificios con forjados unidireccionales construidos con viguetas de cemento aluminoso. En Barcelona, en los alrededores del Turó de la Peira, a lo largo de los últimos 15 años se han desarrollado trabajos de refuerzo de forjados en viviendas y locales. Las necesidades de refuerzo no sólo afectaban a los forjados de viguetas de cemento aluminoso sino también a los muros de carga que, como ejemplo de mala praxis constructiva, frecuentemente eran de ladrillo hueco, hasta en niveles inferiores.

Ello conduce a que, en ocasiones, las operaciones de refuerzo conllevan dificultades técnicas que inciden tanto en el tiempo de ejecución de la obra como en el coste total de la misma. Todo ello puede hacer que el refuerzo no sea la solución más viable. En estos casos, y retomando el ejemplo de los edificios del Turó de la Peira, conduce a la construcción de nuevos edificios y al derribo de los antiguos.

Pero también es cierto que en muchos casos el refuerzo no solamente es inevitable, sino que también es la opción más recomendable. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que

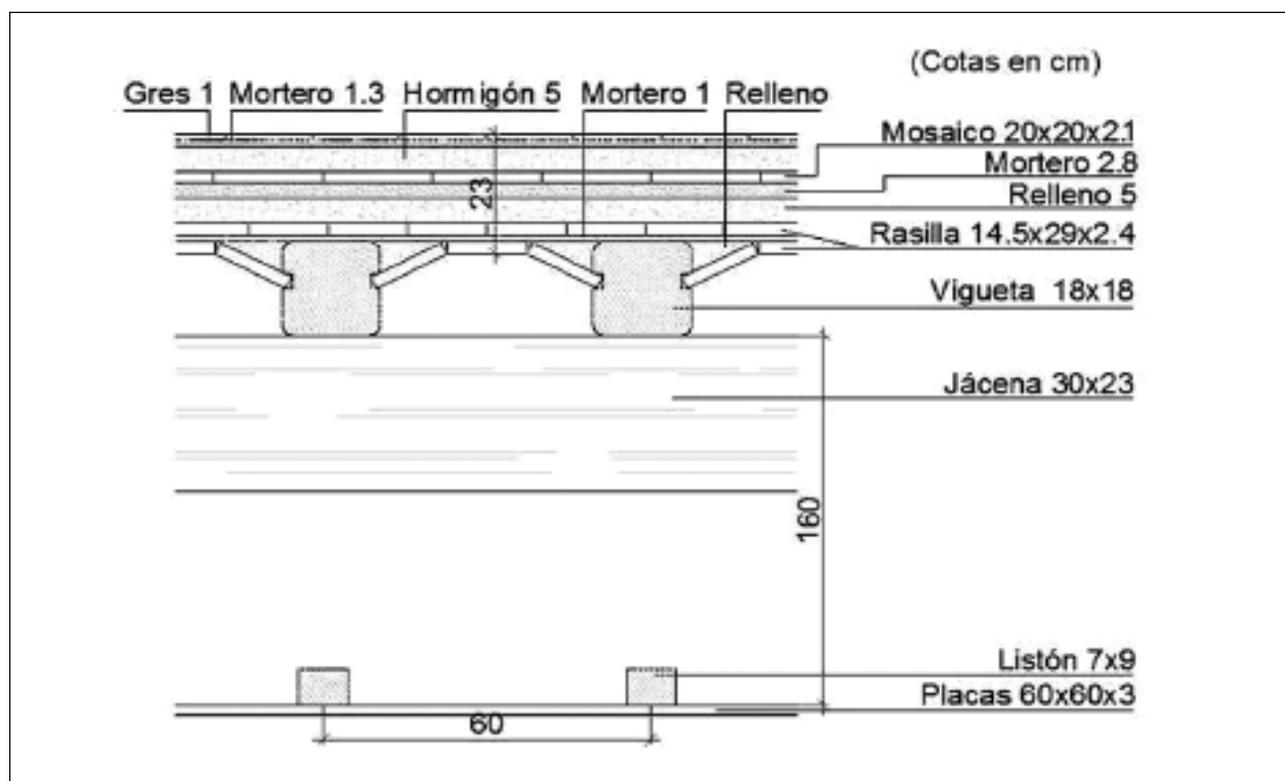


Figura 6.- Residencia Montblanc de Manresa. Sección del forjado de planta segunda.

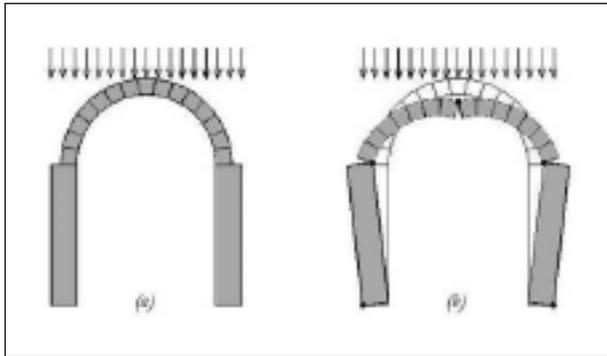


Figura 7.- Estructura a reforzar -(a) arco en su estado inicial -(b) arco deformado.

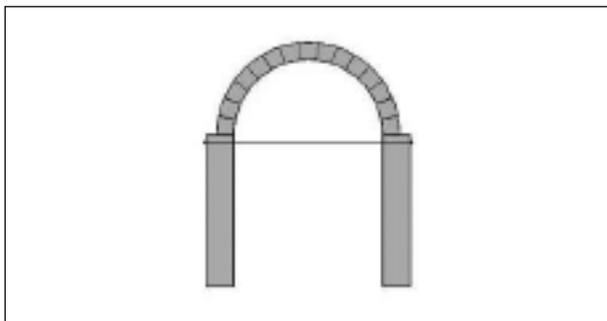


Figura 8.- Refuerzo mediante un tirante.

generalmente no existe una única solución de refuerzo y que, por lo tanto, el técnico responsable deberá estudiar cuál de las posibles soluciones es la que mejor puede dar respuesta a las necesidades establecidas atendiendo a criterios de viabilidad técnica y económica o de reversibilidad cuando se trate de edificios históricos.

Un ejemplo para ilustrar distintas soluciones de refuerzo puede ser el caso de un arco en el que los elementos verticales sobre los que se sustenta presentan un proceso progresivo de desplome, causado por el empuje generado en los arranques del arco (figura 7).

Una posible solución de refuerzo consiste en introducir un tirante capaz de contrarrestar el empuje del arco (figura 8).

A pesar de la ligereza de la solución, ésta puede considerarse muy satisfactoria puesto que la efectividad de los tirantes es grande y, además, puede ser dimensionada de forma muy aproximada ante la necesidad real de retener el movimiento de los apoyos. Además, los tirantes pueden ser instrumentados, lo cual permite llevar a cabo un seguimiento de su deformación y, en consecuencia, de su tensión de trabajo. Esta última labor adquiere aún mayor sentido si, de manera complementaria, se realiza una simulación numérica de comportamiento de la construcción. La comparación de las medidas experimentales con las pre-

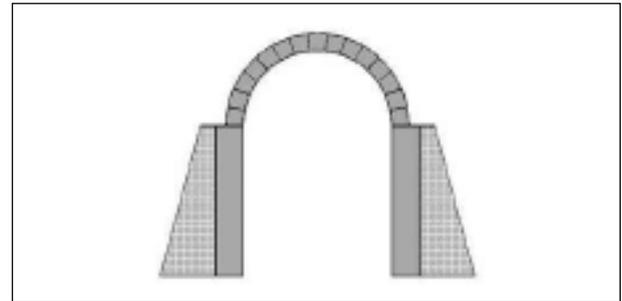


Figura 9.- Refuerzo mediante contrafuertes.

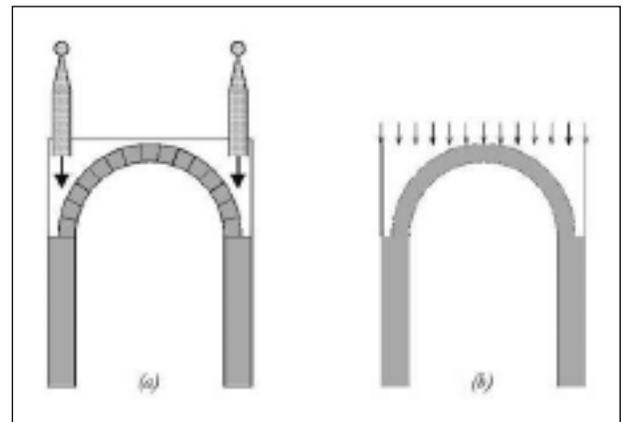


Figura 10.- Estabilización del arco mediante una alteración de las cargas -(a) adición de pináculos -(b) reducción de las cargas muertas.

diciones numéricas permitirá obtener una visión muy profunda del verdadero estado del edificio y de su evolución con el tiempo. Esta solución de refuerzo puede definirse como una intervención de mínimo impacto y es, además, reversible, lo cual significa que, en caso necesario y en un futuro, podrá ser substituida por otra mejor, si se demostrara insuficiente, o bien por otra tecnológicamente más avanzada y, por ello, más controlable (2).

Otra posible solución de refuerzo es la construcción de contrafuertes (figura 9).

Obviamente, esta actuación no es completamente respetuosa con la construcción, en la medida en que significa una importante transformación de su aspecto exterior. Además, tal intervención altera significativamente el mecanismo resistente genuino de la estructura, adosando a la misma un elemento extraño y distorsionador cuyos efectos, por otra parte, no dejan de ser inciertos.

También es posible conseguir la estabilización de los apoyos del arco mediante una alteración de las cargas. Así, con la adición de pináculos (figura 10a) se consigue incrementar la componente vertical del empuje del arco, o bien con una reducción de las cargas muertas que actúan sobre él (figura 10b) se consigue reducir la componente total del empuje del arco. La viabilidad de ambas soluciones depende del grado de desplome que presenten los apoyos.

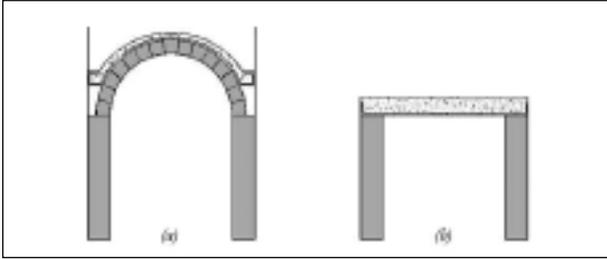


Figura 11.- Refuerzo mediante nuevos elementos -(a) arco adosado - (b) sustitución por un dintel.

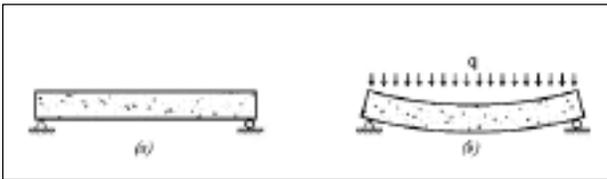


Figura 12.- Viga a reforzar -(a) estado inicial -(b) viga cargada y deformada.

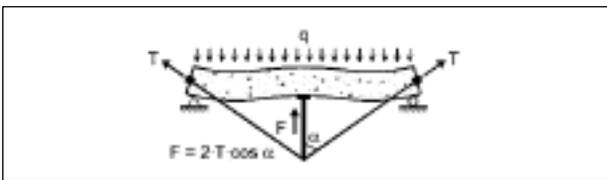


Figura 13.- Refuerzo activo mediante pretensado.

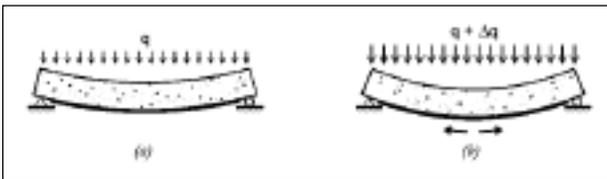


Figura 14.- Refuerzo pasivo mediante bandas de acero encoladas -(a) aplicación de las bandas -(b) movilización de las bandas con el incremento de carga.

Otras soluciones de refuerzo pueden ser la construcción de un nuevo arco en el trasdós del existente (figura 11a) o la sustitución del arco por un dintel (figura 11b). Ambas actuaciones pueden definirse como intervenciones de gran impacto puesto que no respetan la construcción original, sobre todo la última.

Hasta hace relativamente pocos años, la mayoría de las intervenciones en edificios existentes han incluido ostensibles elementos de refuerzo o bien profundas transformaciones que, a menudo, han significado prácticamente la total sustitución o renovación de los elementos resistentes originales, utilizando para ello materiales tecnológicamente actuales tales como el hormigón y el acero. El principal motivo de estas soluciones ha sido las dificultades que entraña el análisis de las construcciones existentes, en especial las antiguas.

Actualmente, el avance de la tecnología, así como de las técnicas numéricas y experimentales hace posible un mejor acercamiento al estudio de las construcciones antiguas o existentes en general y, a su vez, permite el diseño de

intervenciones respetuosas, mínimas y seguras. Ante estas posibilidades, y teniendo en cuenta que la tecnología sigue avanzando, parece lógico dar preferencia a las intervenciones que permitan, en un futuro, la revisión de los criterios y aplicar nuevas técnicas y nuevos materiales (3).

Si bien el criterio de reversibilidad adquiere una especial importancia cuando se interviene en construcciones antiguas con valor histórico, a nuestro juicio es un criterio de diseño a tener en cuenta sea cual sea el tipo de construcción objeto de la intervención. Sin embargo, cabe señalar que el criterio de reversibilidad debe entenderse como una orientación más que como un camino obligado. Frecuentemente se producen situaciones en que un refuerzo reversible no es posible como, por ejemplo, el refuerzo de forjados o la consolidación de muros de fábrica degradados, en los que la inyección de mezclas apropiadas pueden proporcionar soluciones más válidas y menos traumáticas que otras soluciones tecnológicamente más avanzadas (3).

### 3. TIPOS DE REFUERZO

Cualquiera que sea la solución de refuerzo adoptada, para que sea efectiva es necesario su movilización, es decir, que el refuerzo entre en carga. Esta movilización puede realizarse en el mismo momento de la puesta en obra del refuerzo o bien posteriormente, al incrementar la carga que solicita al elemento reforzado.

Para que la movilización del refuerzo se produzca en el momento de su puesta en obra es necesario introducir un sistema artificial de cargas, en forma de pretensado o de descarga previa, por ejemplo, con apeos. Atendiendo al instante de movilización, este tipo de refuerzos se denominan activos. Por el contrario, aquellos refuerzos que se movilizan con el incremento de la sollicitación se denominan pasivos.

A fin de ilustrar de forma intuitiva los distintos sistemas de movilización de los refuerzos, supóngase una viga sometida a la acción de una carga repartida  $q$  (figura 12).

Una forma de refuerzo activo de esta viga podría ser la introducción de un cable pretensado que introduciría una fuerza puntual ascendente en el centro del vano y un esfuerzo axial de compresión en la viga (figura 13). Con este tipo de intervención se consigue una reducción de flecha y una mejora de la capacidad portante, bajo la acción de la carga  $q$ , desde el mismo momento en que se tesa el tirante.

Una forma de refuerzo pasivo podría ser la fijación de bandas de acero (figura 14). En este caso las bandas de acero se colocan estando la viga sollicitada por la carga  $q$ , por lo que la movilización de las bandas únicamente se producirá cuando, por efecto de un incremento de la carga que solicita a la viga, ésta incremente su deformación.

### 3.1. Refuerzos activos

Los refuerzos activos están especialmente indicados cuando la estructura original no verifica los estados límites de servicio, es decir, cuando el refuerzo obedece a la necesidad de recuperar las deformaciones existentes, o bien cuando el refuerzo debe aportar un incremento importante de la capacidad resistente de la estructura ante estados límites últimos.

En el caso del arco expuesto en el apartado 2, la solución de refuerzo mediante un tirante (figura 8) permite introducir, a través de éste, una fuerza capaz de recuperar parte o la totalidad del desplome de los soportes, en cuyo caso se trataría de un refuerzo activo. Sin embargo, el tirante también puede diseñarse únicamente para detener el proceso de desplome de los soportes, es decir, sin introducir fuerza inicial alguna, en cuyo caso estaríamos ante una solución de refuerzo pasivo.

Cabe señalar que la introducción de un sistema artificial de cargas en una estructura existente es una operación que requiere la utilización de gatos y otros medios auxiliares y de control costosos, lo cual puede ser un factor determinante de la viabilidad del refuerzo.

El proyecto de un refuerzo activo debe incluir el estudio detallado de la evolución de las cargas, con simulación de diversos estados de carga, a fin de garantizar tanto la correcta aplicación de las mismas como la seguridad durante la ejecución. Asimismo, deberán tomarse medidas de control geométrico y de fuerzas durante su aplicación.

### 3.2. Refuerzos pasivos

En numerosas ocasiones, el refuerzo obedece a la necesidad de aumentar el nivel de seguridad de la estructura hasta alcanzar los valores exigibles hoy en día, lo cual se consigue con un incremento de su resistencia última. En estos casos, si bien la estructura reforzada deberá ser capaz de desarrollar la resistencia última deseada, aportada a través del refuerzo, la movilización de éste no será necesaria salvo que se produzcan incrementos de carga. Para ello, tanto en estructuras metálicas como de hormigón, es necesario que los materiales, originales y de refuerzo, tengan suficiente capacidad plástica para admitir las deformaciones necesarias que permitan la movilización del refuerzo y así alcanzar la resistencia última deseada.

Los refuerzos pasivos son adecuados cuando se trata de incrementar el margen de seguridad de la estructura frente a los estados límites últimos, y también para aumentar la resistencia de la estructura ante acciones que no actúan durante la ejecución del refuerzo.

En el caso de elementos sometidos a flexión, las soluciones de refuerzo consistentes en la adición de láminas o

pletinas metálicas, el encolado de bandas de fibras de carbono o la adición de vigas inferiores, autoportantes o con efecto mixto, son soluciones de refuerzo pasivo.

En el caso de pilares, las soluciones de refuerzo pasivo más frecuentes son el zunchado o los recrecidos.

## 4. COMPROBACIONES A REALIZAR

Durante los procesos previos necesarios para acometer un proyecto de refuerzo, descritos en los apartados anteriores, destacan por su importancia la inspección del estado actual con el reconocimiento geométrico, constructivo y mecánico de la construcción y el análisis resistente de la estructura, los cuales conducirán a la toma de decisión sobre el refuerzo. Más específicamente, permitirán determinar qué elementos necesitan aumentar su capacidad resistente. En este punto debe destacarse que, dependiendo del tipo de refuerzo adoptado, puede ser necesario revisar algunas hipótesis sobre la estructura, en especial, si los refuerzos son pesados pueden condicionar posteriores necesidades resistentes en elementos que inicialmente no los requerían.

Durante las comprobaciones del refuerzo, no solamente se deben analizar los elementos directamente reforzados sino también todos aquellos que pueden verse afectados por la mayor rigidez, resistencia o peso aportados por su materialización. En general, deben comprobarse las uniones y tener en cuenta, además de las cargas, los posibles efectos que el refuerzo ejerce sobre la estructura primitiva tales como excentricidades, transformación de articulaciones en empotramientos, etc. Ello pone de manifiesto el elevado grado de exigencia técnica que el diseño de un refuerzo requiere al especialista en estructuras ya que, cuando menos, tienen que analizarse pormenorizadamente la estructura original y la reforzada.

### 4.1. Unión del refuerzo a la estructura original

Tanto o más importante que el diseño del propio elemento de refuerzo es, sin duda, el diseño de la unión entre dicho elemento y la estructura original puesto que es a través de la unión que debe garantizarse la transmisión de esfuerzos, necesaria para que el refuerzo sea efectivo.

Desde el punto de vista de la unión, cabe diferenciar dos tipos de refuerzo. El refuerzo basado en la adición de un elemento a otro ya existente, como es el caso de la adición de pletinas, chapas o perfiles a una viga metálica, la adición de bandas de acero encoladas o un recrecido de hormigón a una viga de hormigón o, en el caso de pilares, cualquier solución que opte por un confinamiento del hormigón. En todos estos casos la efectividad del refuerzo se consigue mediante la transferencia del esfuerzo rasante (figura 15).

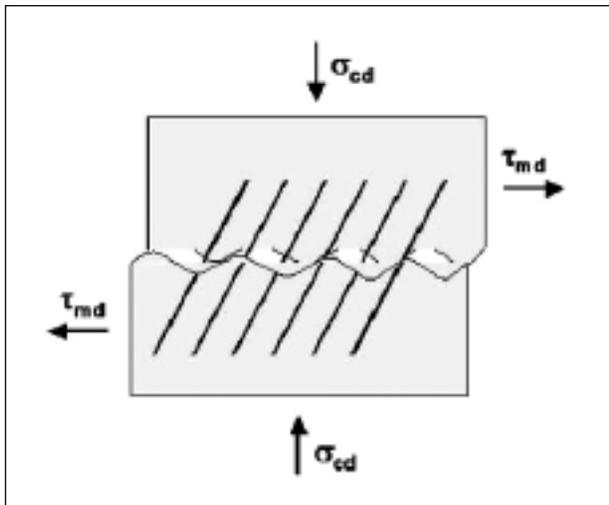


Figura 15.- Transferencia del esfuerzo rasante.

La materialización de este tipo de uniones se consigue con:

- Adhesivos epoxídicos en uniones hormigón – acero o CFRP (láminas de fibra de carbono).
- Pernos químicos y mecánicos.
- Soldadura y tornillería.
- Transferencia de esfuerzo rasante entre hormigones.

Otro tipo de refuerzo es el basado en la adición de un nuevo elemento resistente a la estructura original, orientado generalmente a la estabilización global o parcial de la misma. Ejemplos ilustrativos de este tipo de refuerzo son la adición de vigas corta-luces en forjados, o la adición de elementos de rigidización a una estructura existente. En estos casos, el diseño de la unión debe tener en cuenta las propiedades resistentes de la estructura original y evitar transmitir esfuerzos que podrían comprometer su resistencia y seguridad; habitualmente resulta desaconsejable la transmisión de momentos flectores por lo que estas uniones deben diseñarse para transmitir esfuerzos cortantes y, en algunos casos, esfuerzos axiales (figuras 16 y 17).

La materialización de este tipo de uniones se consigue con tornillos de alta resistencia y barras pretensadas en uniones hormigón-hormigón y hormigón-acero.

#### 4.2. Simulación y evaluación de las posibles intervenciones

A fin de limitar la incertidumbre que debe gestionar el técnico en el proceso de evaluación y diseño de refuerzos en estructuras existentes, y teniendo en cuenta que habitualmente la información de partida no es exhaustiva ni completa, puede ser conveniente llevar a cabo una serie

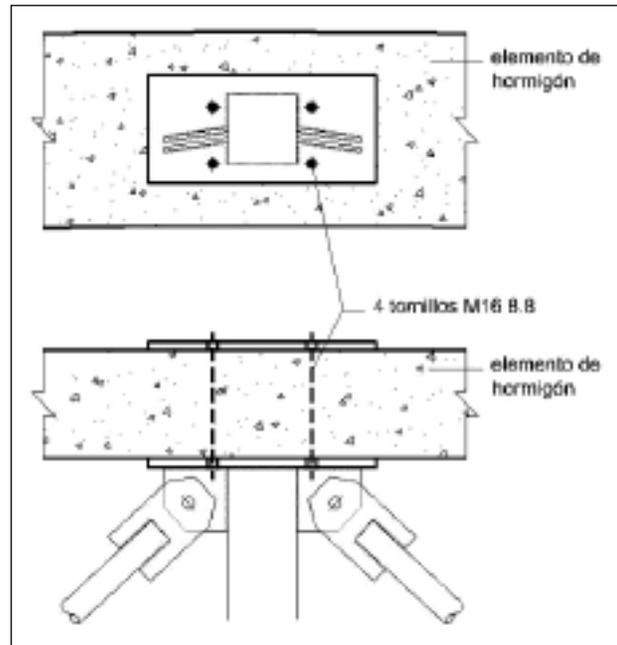


Figura 16.- Unión hormigón-acero mediante tornillos de alta resistencia. Planta y alzado.



Figura 17.- Unión hormigón-acero mediante tornillos de alta resistencia. Detalle obra.

de experimentos sobre la estructura que permitirán, a través de la simulación numérica, identificar distintos parámetros de su comportamiento resistente. Aspectos como la contribución de los pavimentos, no estructurales, a la rigidez de los forjados se detecta frecuentemente durante la realización de pruebas de carga estáticas y/o dinámicas. Ello permite, cuando es preciso, analizar con mayor grado de realismo el comportamiento en servicio de tales estructuras. De hecho, este acoplamiento de la experimentación con el análisis numérico es muy interesante y da lugar a una de las principales facetas del moderno acercamiento al estudio de las construcciones existentes.

La simulación numérica puede utilizarse para reproducir experimentos realizados sobre la obra real, tales como pruebas estáticas o dinámicas, medidas de tensiones y movimientos, etc. De hecho, el uso combinado de la experimentación y de la simulación numérica mantiene un do-

ble sentido. En primer lugar, la simulación numérica constituye una herramienta auxiliar de gran interés para la preparación de la campaña experimental: puede utilizarse para diseñar los medios de carga y elegir los puntos en que se van a tomar medidas, aparte de permitir un seguimiento en tiempo real del ensayo.

En segundo lugar, la disposición de unos resultados experimentales, y la consiguiente comparación de las medidas experimentales con las predicciones analíticas, permite llevar a cabo una calibración del modelo numérico. A través de este proceso, tanto el modelo de la construcción como el método de cálculo son reconsiderados en función de la precisión de los resultados que hayan proporcionado y, en caso necesario, revisados y mejorados hasta conseguir un mayor acercamiento a la realidad.

## 5. MATERIALES PARA EL REFUERZO

En la selección de los materiales para la ejecución de un refuerzo intervienen en mayor o menor medida una serie de factores entre los que cabe citar: el material de base a reforzar, las prestaciones mecánicas, la rapidez de ejecución, la eficacia del refuerzo, la disponibilidad técnica y comercial, el peso y el precio. Para materializar el refuerzo se emplean, además de todos los materiales convencionales de construcción de estructuras como son el hormigón armado y pretensado, el acero, la obra de fábrica y la madera, algunos materiales compuestos a base de polímeros como son las resinas y algunas fibras. El empleo de estos materiales en estructuras de nueva planta reviste, hoy por hoy, un carácter experimental mientras que su empleo en el refuerzo de estructuras se ha extendido ampliamente durante la última década. Esta mayor aplicación de estos materiales en el refuerzo se debe a que sus elevadas prestaciones mecánicas, su ligereza y la facilidad de aplicación los convierte en competitivos a pesar de su alto precio.

### 5.1. Resinas y otros productos sintéticos

A menudo, en los trabajos de reparación y refuerzo de estructuras suelen utilizarse resinas u otros productos sintéticos, bien en forma de mortero o lechada para el relleno de huecos, o bien como adhesivo entre el elemento a reforzar y el material de refuerzo.

De las distintas familias de resinas sintéticas (epoxi, poliéster, acrílicas, etc.), las más utilizadas en reparación y refuerzo estructural son las resinas epoxi debido a que poseen tanto una excelente capacidad adherente como elevadas prestaciones mecánicas, además de ser muy estables frente a acciones de tipo físico y químico (4).

La aplicación más frecuente de las resinas epoxi al refuerzo estructural consiste en su utilización como adhesivo entre un elemento de hormigón armado y una banda de

acero o lámina de fibra de carbono, aumentado así la capacidad resistente del elemento de hormigón, ya sea una viga, una placa o un soporte, frente a momentos flectores y/o esfuerzos cortantes. La eficacia de este tipo de refuerzo requiere una excelente adherencia entre la resina epoxi y el hormigón, por un lado, y el acero o la lámina de fibra de carbono por el otro, además de unas propiedades físico-mecánicas adecuadas de la formulación epoxi empleada (5).

A fin de conseguir una buena adhesión de la resina al soporte resulta imprescindible una preparación superficial adecuada, tanto del hormigón, eliminando todas las partes débiles, la suciedad y cerrando las fisuras en el caso de que las hubiera, como del acero, eliminando el óxido, las escamas de laminado, etc. Asimismo, las condiciones climáticas en el momento de la puesta en obra no deben ser muy severas ya que las temperaturas muy bajas dificultan el endurecimiento del adhesivo epoxi y, por el contrario, las temperaturas muy elevadas pueden producir un endurecimiento demasiado rápido, lo cual reduciría la adhesión de la resina al soporte.

El aspecto más comprometido de las resinas y otros materiales sintéticos es su resistencia al fuego. Mientras las fibras de carbono tienen una razonable resistencia al fuego, la capacidad de carga de los sistemas compuestos viene determinado por el adhesivo epoxi, el cual tiene un punto de transición vítrea de unos 50 °C. Esta temperatura se alcanzaría a los pocos minutos del inicio de un incendio tipo (6).

Ello conlleva que si el coeficiente de seguridad ante estados límites últimos de la estructura sin reforzar es superior a 1, el tiempo de resistencia al fuego viene determinado, simplemente, por la resistencia a fuego del elemento de hormigón, la cual puede ser aumentada con una protección adecuada.

En cambio, si el coeficiente de seguridad ante estados límites últimos de la estructura sin reforzar es inferior a 1, debería proyectarse una protección contra el fuego suficiente como para asegurar que durante el tiempo deseado el adhesivo epoxi no alcanzará la temperatura de transición vítrea. Esto debe estudiarse particularmente en cada caso (6), aunque cabe señalar que en la mayoría de ellos resultará prácticamente imposible conseguir una protección adecuada.

Todo ello hace recomendable limitar los refuerzos a base de resinas epoxi u otros materiales sintéticos a aquellos casos en que la estructura sin reforzar sea capaz de resistir, con suficiente seguridad, las acciones correspondientes a una situación accidental, así como, a modo de precaución, disponer siempre una buena protección contra el fuego en las zonas reforzadas con resinas epoxi u otros materiales sintéticos en general.

## 5.2. Estructura de acero

El acero al carbono es un material ampliamente utilizado tanto en la construcción de nuevos proyectos como en el refuerzo de estructuras existentes. En general, cuando la estructura original es metálica el refuerzo también lo será ya que las técnicas de unión entre elementos metálicos se encuentran completamente desarrolladas, tanto las uniones atornilladas como las soldadas.

Actualmente, la tecnología del soldeo de los aceros al carbono normalmente empleados en las estructuras de edificación y obra civil se encuentra suficientemente avanzada como para que su utilización no plantee un obstáculo infranqueable. Las diversas formulaciones para la obtención del carbono equivalente y la propia geometría de la soldadura a realizar permiten valorar, en función de los medios disponibles, la idoneidad de la unión de elementos de acero mediante soldadura. Los trabajos realizados para recuperar un puente metálico en Tui (7) así como el refuerzo que se presenta en la figura 18 son ejemplos ilustrativos de ello.

Alternativamente, la perforación in situ de chapas metálicas de espesor centimétrico es hoy posible por lo que, en caso necesario, cualquier proyecto de refuerzo de una estructura de acero puede desarrollarse íntegramente con uniones atornilladas. Aspectos como la facilidad de montaje o la necesidad de unir chapas de espesores muy distintos pueden ser decisivos para elegir este tipo de unión.

## 6. CONCLUSIONES

El avance en el conocimiento de las propiedades de los materiales, de las técnicas de inspección y de caracterización así como de las herramientas de cálculo permite mejorar la precisión en la valoración de la capacidad resistente de las estructuras existentes y, en consecuencia, en la detección de las necesidades reales de refuerzo. Ello permite un diseño del refuerzo ajustado a dichas necesidades.

El diseño del refuerzo depende del nivel de colaboración del mismo en la capacidad portante de la estructura final o, lo que es lo mismo, del nivel de colaboración que puede asumir la estructura existente una vez reforzada. Teniendo en cuenta la economía de medios y la sostenibilidad, el refuerzo debería diseñarse asumiendo la máxima colaboración posible de la estructura original.

La elección entre un refuerzo activo o un refuerzo pasivo debe tener en cuenta las necesidades reales de movilización del mismo.

El diseño de la unión entre el elemento de refuerzo y la estructura original es tanto o más importante que el diseño del propio elemento de refuerzo ya que, para que éste sea efectivo, debe garantizarse la transmisión de esfuerzos pero



Figura 18.- Refuerzo de estructura metálica robлонada construida alrededor de 1920 mediante soldadura de pletinas en las alas inferiores de vigas y jácenas.

evitando aquellos esfuerzos que podrían comprometer la resistencia o la seguridad de la estructura original.

En la selección de los materiales para la ejecución de un refuerzo es importante tener en cuenta la compatibilidad entre materiales, original y de refuerzo, así como su durabilidad. También deberá tenerse en cuenta el comportamiento del refuerzo bajo acciones accidentales como el fuego ya que en el caso de emplearse resinas el refuerzo no podrá considerarse en dicha hipótesis de cálculo.

El diseño de un refuerzo estructural requiere una elevada exigencia técnica, tanto en conocimiento de materiales como en métodos de análisis y de comprobación, más aún cuando se trata de refuerzos activos. Ello es debido a que, además de determinar la necesidad y la cantidad de refuerzo, es necesario comprobar los efectos que el refuerzo pueda inducir en el resto de la estructura.

## REFERENCIAS

- (1) Martínez Lasheras, R., Martínez Lasheras C., *Estructuras metálicas y mixtas: refuerzo y rehabilitación*, Tratado de rehabilitación, Tomo 3, Ed. Munilla-Lería, Departamento de construcción y tecnología arquitectónica UPM, 1998. 411-437.
- (2) Molins Borrell, C., Roca Fabregat P., *Elementos para el análisis resistente de construcciones antiguas*, O.P. Obra Pública, nº 38, 1996. 42-49.
- (3) Croci, G., *Una metodología para el análisis estructural y para la elección del sistema de intervención*, Manual de diagnóstico y intervención en sistemas estructurales de paredes de carga, Col.legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 1995. 99-117.
- (4) Fernández Cánovas, M., *Las resinas en la rehabilitación de estructuras*, Curso de rehabilitación, Vol. 5, La Estructura, C.O.A.M., 1984. 181-190.
- (5) Fernández Cánovas, M., *Refuerzo de estructuras de hormigón con bandas de acero encoladas*, Comunicaciones presentadas a las jornadas sobre: El estado del arte en reparación y refuerzo de estructuras de hormigón, ponencia III-5. Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid, 1995.
- (6) Bettor MBT, S. A., *Guía de diseño MBrace*.
- (7) González Serrano, A., Besiga Díaz-Blanco, J., Saldaña Martín, F., *Recuperación de un puente metálico en Tui*. Informes de la construcción. Vol. 54, nº 483, 2003. 55-61.