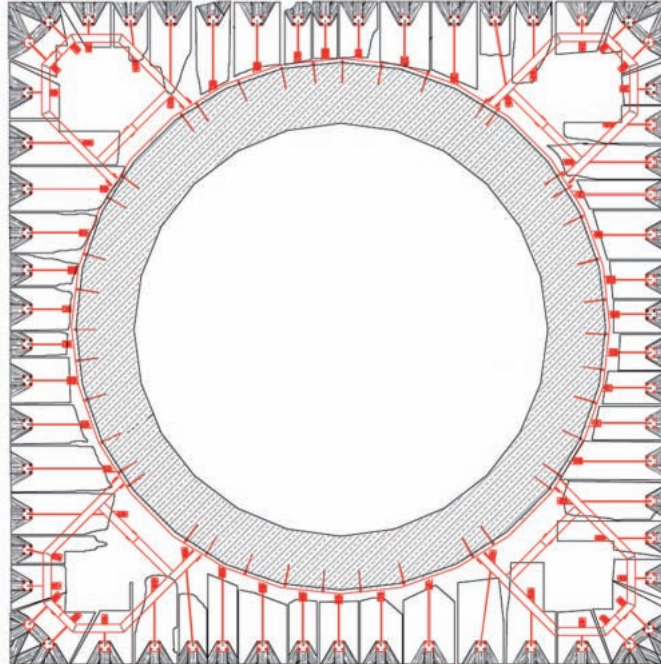


EL PROYECTO Y LA INTERVENCIÓN EN EL CAMPANARIO DE LA CATEDRAL DE MONZA, ITALIA

Claudio Modena y Maria Rosa Valluzzi*



1. Esquema de refuerzo de la cornisa de coronación

Palabras clave: campanario, viscosidad, rejuntado armado, atado, atirantado, técnicas de refuerzo

Keywords: belltower, creep, viscosity, reinforced repointing, clamping, tightening, strengthening techniques

Tras las investigaciones promovidas desde 1994, el campanario de la catedral de San Giovanni Battista en Monza (Italia) ha sido objeto reciente de intervenciones de conservación. Ante los serios fenómenos de deterioro de la estabilidad global y de las propiedades y comportamiento de los materiales de la fábrica descritos en el artículo anterior, la intervención se ha diseñado a partir de un complejo proceso de conocimiento llevado a cabo mediante experimentaciones in situ y en laboratorio, que han conducido a opciones de proyecto de mínimo impacto y técnicas de refuerzo dirigidas a resolver las deficiencias estructurales en el máximo respeto por la identidad histórica del edificio.

Project & intervention on the bell tower of Monza cathedral, Italy. After painstaking investigations carried out since 1994, the bell tower of the San Giovanni Battista Cathedral in Monza (Milan) has recently been subject to conservation interventions. Severe deterioration phenomena were detected involving the global stability of the tower but particularly related with the properties and behaviour of the materials. The intervention has therefore been designed on the basis of a complex process of knowledge, carried out by means of in situ and laboratory experiments and tests which led the restorers to decide on minimum repair and strengthening techniques aimed at solving the specific structural deficiencies while showing the maximum respect for the historic identity of the building.

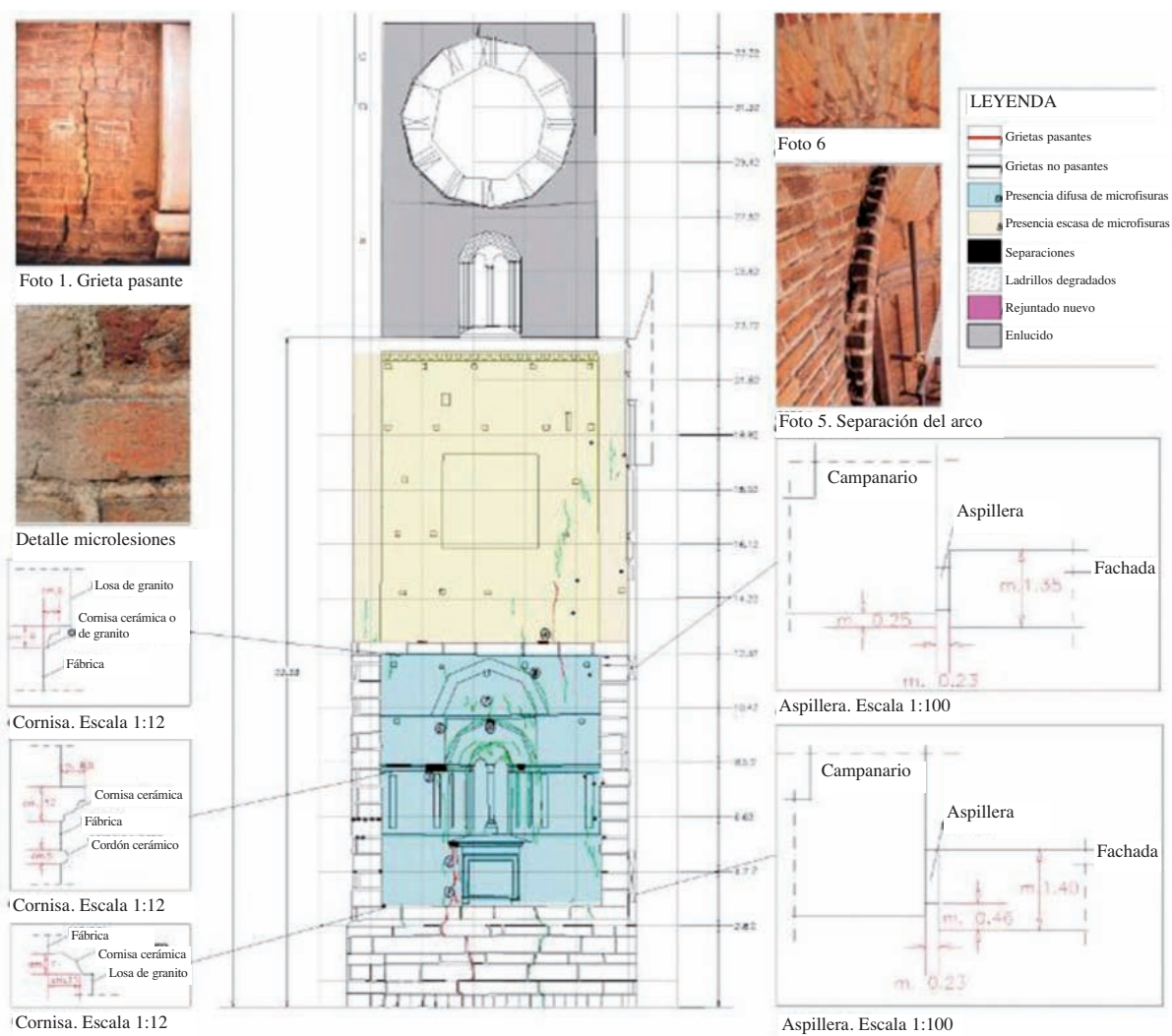
*Claudio Modena y Maria Rosa Valluzzi pertenecen al Departamento de Construcción y Transporte de la Universidad de Padua.

Como sucede con otras fábricas de mampostería masivas (murallas, torres, grandes pilastras), el campanario de Monza muestra señales evidentes del efecto de su peso propio, que se añaden a algunas patologías típicas de estas estructuras (lesiones importantes, desplomes, etc.), y a los recurrentes fenómenos de degradación físico-química de los materiales constitutivos de la fábrica y su aparejo (mortero, ladrillos y tirantes metálicos). En concreto, el fenómeno del *creep*, ya conocido como responsable de algunos derrumbes catastróficos tanto en el pasado como en tiempos más recientes (el campanario de San Marco en Venecia (Italia), el campanario de Santa Magdalena en Goch (Alemania), la Torre Cívica de Pavía (Italia), la catedral de Noto (Italia), etc.) (Binda et al. 1991; Binda, Gatti et al. 1992) requiere una especial atención, ya que comporta condiciones extremas debidas a elevados estados de compresión mantenidos casi constantes a lo largo del tiempo, incluso para estados de sollicitaciones suficientemente lejanos de la resistencia máxima a compresión de la fábrica (Binda e Anzani 1993, Anzani et al. 2000). El estado fisurativo dominante del fenómeno (pequeñas lesiones verticales o subverticales muy difusas en el paramento) es tan poco llamativo en comparación con otras patologías más aparentes, que complica el reconocimiento de las condiciones de inicio o el empeoramiento progresivo que puede conducir a la fábrica a un derrumbe imprevisto (Anzani et al. 1999).

Los estudios conducidos por el Politécnico de Milán desde principios de los años 90, apoyados en extensas campañas experimentales y de análisis de algunos de los derrumbes más significativos ocurridos en épocas recientes (Torre Cívica de Pavía, Catedral de Noto) (Binda et al. 1992, Binda e Anzani 1993), han permitido identificar métodos de diagnóstico

apropiados para la salvaguardia de los ejemplares existentes y, en colaboración con la Universidad de Padua, se ha puesto a punto una técnica específica, el rejuntado armado, que permite contrarrestar el daño progresivo que sufren estas fábricas durante este proceso (Binda et al. 1999, Valluzzi et al. 2004). Esta intervención, muy poco invasiva y de fácil aplicación, ya se ha propuesto y empleado para la consolidación de otros edificios existentes (la Torre Cívica de Vicenza, el campanario de Santa Giustina en Padua, los pilares de la iglesia de Santa Sofía en Padua), mediante la inserción de barras de acero inoxidable de pequeño diámetro (Binda et al. 2001, Modena et al. 2002, Valluzzi et al. 2003a, Valluzzi et al. 2005a). Se está considerando recientemente añadir a la eficacia de esta técnica el potencial de materiales innovadores como las fibras FRP (Fiber Reinforced Polymer, en especial, con el uso de láminas delgadas en el estrato superficial de los muros), por su inmunidad ante la corrosión, la reducción del fenómeno de exfoliación y su menor invasividad (Tinazzi et al. 2003, Valluzzi et al. 2003b, Valluzzi et al. 2005b). En cualquier caso, estos estudios requieren una ulterior profundización experimental, en especial, en lo que atañe a su comportamiento bajo acciones simuladas de *creep* o viscosidad y al problema de anclaje de los elementos resistentes junto a las esquinas de los muros (Saisi et al. 2004), antes de proponer su aplicación a casos reales.

Además de las fábricas estructurales del campanario de Monza, el proyecto de conservación del mismo ha contemplado igualmente la realización de intervenciones en otros componentes de la construcción, como las escaleras, la cubierta y la cornisa de coronación, configurándose como una intervención unitaria y completa para la salvaguardia del edificio.



2. Lesiones principales y cuadro fisurativo identificado en la base de la fachada Oeste del campanario

SÍNTESIS DE LAS CONDICIONES DE DEGRADACIÓN

A nivel macroscópico, el campanario de la catedral de Monza presenta una lesión principal sobre la fachada occidental recayente a la plaza, de amplitud creciente de abajo hacia arriba, hasta atravesar la gran ventana geminada (fig. 2). Esta lesión, monitorizada desde hace más de diez años, se caracteriza por su lenta y constante progresión (Binda, Poggi et al., 2001). Existen además otras lesiones en la proximidad de las esquinas de la torre, hasta los 30 m de altura. Éstas pueden atribuirse a las patologías típicas de las torres históricas, en las que se pueden observar de manera casi sistemática lesiones verticales predominantes, acompañadas de ramificaciones secundarias,

debidas a menudo a cedimientos diferenciales de los cimientos. En el caso de que no se actúe adecuadamente contrarrestándolas con tirantes y, eventualmente, interviniendo oportunamente en la cimentación (Bettio et al., 1995), las lesiones descritas tienden a ampliarse con el tiempo y pueden por tanto comportar tanto incrementos locales de las tensiones de compresión, con el consecuente posible fenómeno de aplastamiento, como derrumbes debidos a la pérdida de equilibrio (locales o globales). Además, los análisis tensionales realizados bajo el efecto del peso propio evidencian que tienden a formarse zonas sujetas a modestos esfuerzos de tracción, vinculadas a la geometría del espesor de los muros y en dirección

horizontal (Bettio et al., 1995; Modena, 1994). En estas condiciones, incluso un pequeño incremento de los esfuerzos, normalmente a la altura de vanos (puertas, ventanas), es suficiente para iniciar el proceso fisurativo.

A este fenómeno se añade el reconocimiento del daño típico del fenómeno del *creep*, con fisuración difusa en los ladrillos y extendida en profundidad en los muros (incluso para muros de pie y medio o dos pies) y concentradas, en especial, en una zona ubicada entre los 11 y los 25 m de altura de la torre (Binda, Poggi et al., 2001). Estas lesiones son sustancialmente independientes de las descritas en el párrafo anterior, puesto que son atribuibles al comportamiento local del material bajo esfuerzos de com-



3



4

presión constantes y elevados y, como ya es conocido, pueden iniciarse incluso en un estadio equivalente al 40-50% del valor de rotura (Binda et al., 1993). La situación puede haber empeorado en cualquier caso en combinación con las primeras patologías descritas que, generando lesiones, reducen la continuidad de las estructuras y provocan concentraciones de esfuerzos.

Otros elementos interesantes que refuerzan la estructura y garantizan condiciones oportunas de funcionamiento y seguridad del edificio serían:

- **Las escaleras internas.** A lo largo del perímetro de la torre se desarrollan quince tramos abovedados de ladrillo macizo, cuya estructura portante en cada una de ellas está constituida por dos bóvedas rampantes de ladrillo macizo que apoyan en el medio sobre un ménsula de piedra. Este apoyo posee dos variantes: con un elemento bajo la ménsula también construido en piedra, o bien sostenido por un jabalcón de madera anclado en el muro mediante dos tirantes de acero. Los arcos no presentan traba entre los ladrillos de la rosca y los escalones revelan un trazado más bien irregular debido a esta colocación de los ladrillos y a la erosión del uso. En especial un tramo de bóvedas muestra una situación de desarticulación y fisuración de los ladrillos en la zona central y

una pérdida de geometría por rotación de las bóvedas (fig. 3).

- **La cubierta.** La estructura de la cúpula comprende una serie de cerchas curvas de madera de roble que confluyen en el centro en un pendolón mediante un conjunto de tornapuntas y dos anillos circulares de vigas dispuestas en la base y en la cima, donde se apoya la linterna. El manto de cubierta está formado por un entablado apoyado sobre las cerchas y un lámina de cobre sobre el mismo. La viga curvilínea inferior (durmiente) presenta una deformación y patología debidas a una lesión concentrada, mientras que los tirantes lígneos próximos al pendolón están especialmente degradados por el ataque de parásitos (fig. 4).

- **La cornisa de la cima.** La cornisa de la torre está ubicada aproximadamente a 70 m de la plaza y está constituida por tres hiladas de sillares de piedra de Serizzo, moldurados y superpuestos, con un vuelo máximo de 90 cm. Se pueden detectar lagunas y fenómenos pronunciados de fisuración de los sillares, concentrados en particular en las esquinas de la cornisa (donde existen elementos ornamentales que gravitan directamente sobre las mismas), además de alteraciones cromáticas debidas a los efectos del óxido junto a las grapas y fijaciones preexistentes de hierro (fig. 5).

3. Detalle de la bóveda lesionada de la escalera en el interior de la torre

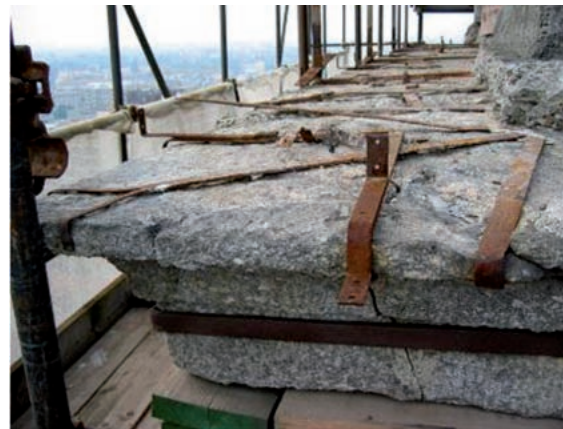
4. Rotura del durmiente en el apoyo de una de las cerchas de la cubierta

5a y 5b. Degradación de la cornisa de piedra en la coronación de la torre

5a

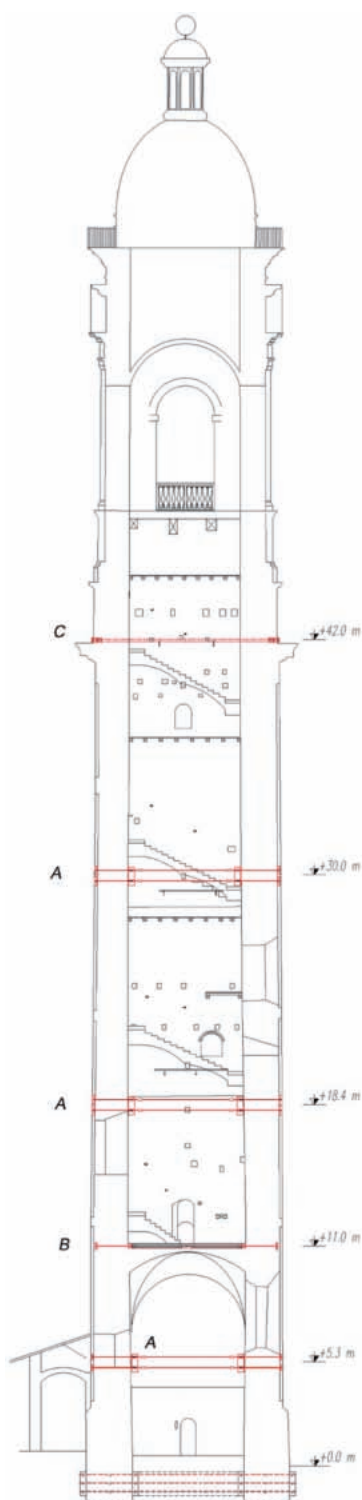


5b



6. Sección vertical de la torre (frente Sur) con indicación de la posición de los diversos tipos de zunchos y detalles mediante secciones horizontales a la altura de los mismos

7. Detalle de las zonas sujetas a confinamiento con zunchos metálicos: elementos de anclaje en las esquinas internas para los zunchos tipo A (a) y C (b) y refuerzo de las esquinas externas (c) (fase preliminar de picado de las juntas previa a la colocación de redondos de pequeño diámetro)



6a

FASES DEL PROYECTO DE INTERVENCIÓN

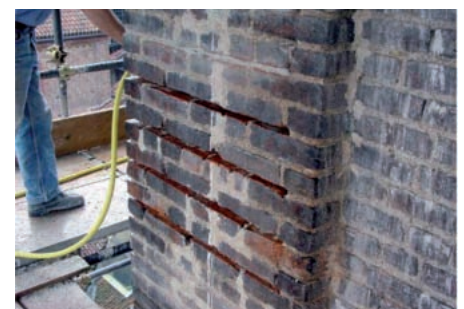
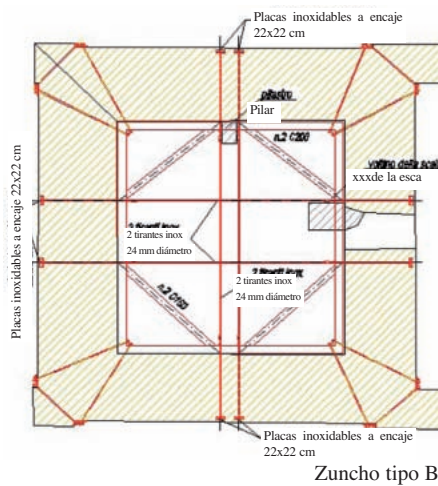
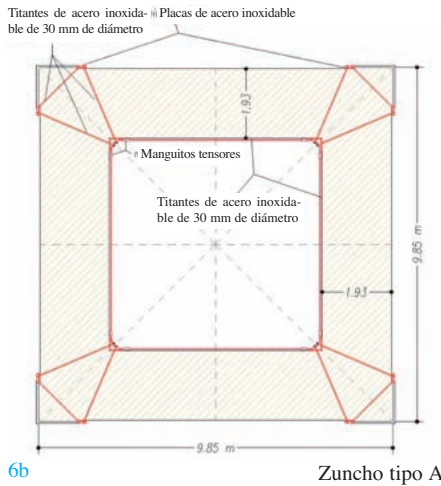
El proyecto de la intervención a efectuar en el campanario de Monza ha pasado de una fase preliminar, destinada a la definición de las decisiones oportunas para reпристinar inmediatamente las condiciones de seguridad estructural (inyecciones y cosido aparejado de las grietas en las zonas de la fábrica más fisuradas y/o deterioradas, confinamiento y zunchados metálicos a diversas alturas del fuste de la torre, y rejuntado armado de los tendeles de mortero para amortiguar o frenar el deterioro bajo cargas excesivas de compresión), a la fase definitiva de identificación de los materiales, métodos y técnicas de intervención con criterios conservativos (compatibilidad, mínima intervención, reversibilidad e invasividad mínima), estas últimas, gracias a la disponibilidad de estudios previos suficientemente detallados (Binda et al. 2003; Modena 1997). Se ha intentado limitar al máximo las reconstrucciones masivas de la fábrica dañada con la ayuda del refuerzo local proporcionado por la inserción de modestas cantidades de armaduras de pequeño diámetro en el interior de las juntas de mortero y se han puesto a punto las mezclas más adecuadas para las inyecciones y para el retacado (para emplear en el cosido de las grietas y en el rejuntado de lagunas del mortero, respectivamente).

El impacto de la intervención con el rejuntado armado previsto en el proyecto ha resultado a la postre bastante reducido, habiendo limitado su aplicación a algunas franjas del paramento interno, mucho más débil y más degradado en comparación con el externo (Binda, Poggi et al., 2001), y a algunos tramos de las pilastras externas, gravemente lesionadas, sin intervenir sobre los paramentos externos muy bien conservados (excepción hecha de manifestaciones de degradación local debidas a fenómenos de naturaleza físico-química), para los cuales se han adoptado las medidas

usuales de sustitución de algunos ladrillos y reпристinación localizada de las juntas de mortero degradadas. Finalmente, se ha previsto la intervención en las estructuras internas y accesorias (escaleras, cornisa), además de en la cubierta.

Un aspecto muy peculiar de la intervención conservativa, no ligado directamente a problemas de seguridad estructural es el tratamiento de las superficies. En ausencia de indicaciones específicas, se ha abordado esta cuestión en la campaña de estudios previos realizada. El proyecto preveía inicialmente una limpieza generalizada (con técnicas ligeras a concretar en la obra, a partir de pruebas específicas –microproyección, cepillado con cepillos de cerdas vegetales, emplasos, agua nebulizada) y, acto seguido, tratamientos de consolidación (con silicato de etilo) y protectivos. A partir de la adquisición de los datos y de los estudios específicos sobre la costra superficial de los morteros de las juntas, esta elección se revisó por completo. De hecho, se ha demostrado que las costras no representan peligro alguno para la conservación de los materiales y, al contrario, pueden ejercer una acción protectora. Además, los análisis han detectado que la superficie de las juntas de mortero poseen un alto contenido en yeso, que ha formado una película muy estable y protectora. En este contexto, la limpieza conllevaría el empeoramiento de las condiciones de protección tanto de los ladrillos como de los morteros, por la eliminación de la película protectora existente válida a todos los efectos y la sustitución con tratamientos de eficacia incierta y de breve duración. Se ha decidido por tanto no proceder a ninguna de las intervenciones en superficie (limpieza y protección) previstas inicialmente en el proyecto.

A continuación, se describen los aspectos fundamentales para las principales técnicas de intervención proyectadas para la torre, cuya realización, en el momento de la redacción de este artículo, estaba todavía en fase de ejecución.

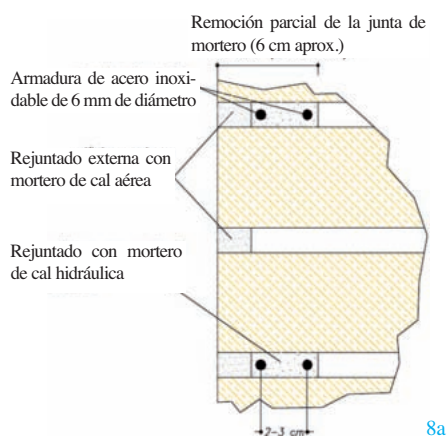


a) Zunchados metálicos

Se han propuesto diversas soluciones de zunchado metálico en función de las diferentes condiciones constructivas y de accesibilidad identificadas a varias alturas del edificio. Estos zunchos están constituidos generalmente por perfiles y tirantes internos, los primeros realizados en acero protegido de la corrosión y los segundos en acero inoxidable. Las varas metálicas roscadas de los tirantes poseen un tensor para su templado desde el interior de la estructura. Estos dispositivos confieren a la fábrica construida un efecto de confinamiento, además de potenciar la traba recíproca entre los muros de manera general. En la figura 6 se refleja el esquema general de las diversas propuestas, mientras que en la figura 7 se muestran algunos detalles de las soluciones adoptadas. Se han previsto seis zunchos, uno en cimentación y el resto a lo largo del fuste de la torre hasta 42 m de altura aproximadamente. Estos últimos pueden clasificarse en tres tipologías, indicadas a continuación con

las siglas A, B y C. De éstos, los dos primeros se aplican en el interior de la estructura, mientras que el último es completamente externo. Los zunchos tipo A están constituidos por un par de barras de 30 mm de diámetro, insertadas en perforaciones practicadas en el espesor de la fábrica y ancladas a placas externas de acero inoxidable. Se han dispuesto dos soluciones diferentes de anclaje para los tirantes, según la accesibilidad de las diversas zonas: la primera prevé la unión transversal a través de la esquina mediante un triángulo de cables tensos (para los zunchos dispuestos a 5 y 11 m de altura), y la segunda considera una serie de barras insertadas en las juntas y extendidas a lo largo de las zonas ocupadas por las placas externas. La presencia de una bóveda a 11 m de altura aproximadamente nos sugirió la construcción en su extradós de un verdadero diafragma confinante (zunchado tipo B), constituido por un marco reticular de perfiles U pareados, rigidizado por cuadrales en las esquinas y

tirantes puestos a punto con tensores. El sistema se ensambló in situ mediante tuercas y barras roscadas, adyacente a las paredes internas, solidarizado a las mismas retacando con mortero expansivo y englobado bajo el pavimento sobre la bóveda presente en el mismo nivel. El único zunchado completamente externo se ha colocado a la altura de la cornisa ubicada a 42 m de altura sobre el nivel de la plaza, constituido por parejas de tirantes de 36 mm de diámetro unidas a placas en las esquinas. Esta estructura se realizó por entero en acero inoxidable, vistas las difíciles condiciones de acceso en caso de necesitar mantenimiento. Los resultados de la monitorización in situ y la inspección de las estructuras podrían confirmar a la postre la necesidad de realizar un anillo de contención a nivel de los cimientos, constituido en este caso por un zunchado de hormigón armado adherido a la estructura y vinculado por tríos de barras tipo Dywidag postensionadas, insertadas en agujeros practicados mediante perforación.



8. Esquema de la intervención de rejuntado armado (a), su aplicación (b) y acción complementaria con inyecciones (c)

9. Intervención de refuerzo de las ménsulas de apoyo que sostienen las bóvedas de la escalera interna: tipo con subménsula en piedra

10. Intervención de refuerzo de las ménsulas de apoyo que sostienen las bóvedas de la escalera interna para el tipo con jabalcón de madera y tirantes metálicos (a) y esquema de proyecto para las nuevas ménsulas (b)

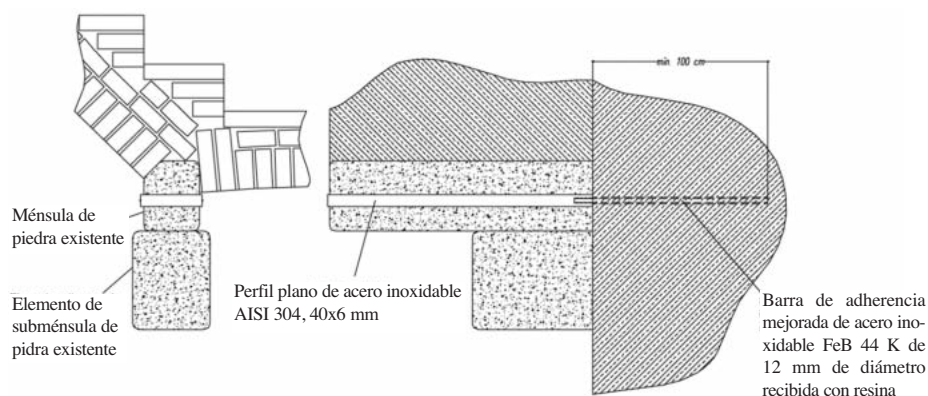
b) Intervención en los paramentos

Se han adoptado diversas técnicas de intervención para la repriminación y el refuerzo de las fábricas. Para contrarrestar la evolución del daño debido al fenómeno de *creep* se ha contemplado la técnica del rejuntado armado que, a través de la inserción de barras de pequeño diámetro en los tendeles, introduce un efecto de confinamiento en la fábrica (en la práctica se obtiene un efecto similar al alcanzado insertando fibras en el mortero y en el hormigón que, aun dejando sustancialmente inalteradas las características de resistencia, aumentan considerablemente la energía de fractura). Para la repriminación local de los paramentos en las zonas especialmente degradadas se han previsto técnicas de apoyo como las inyecciones, el cosido aparejado de las grietas y el retacado de las lagunas de las juntas.

El número de barras y el espaciamiento entre las mismas depende del estado de degradación existente; en el caso en cuestión se han previsto parejas de redondos de acero inoxidable con adherencia mejorada de 6 mm de diámetro dispuestas en los tendeles cada dos hiladas. Esta técnica se emplea de manera extendida en las zonas de mucha fisuración por efecto del fenómeno descrito, pero también a nivel local para el refuerzo de las esquinas externas y en zonas con fisuras localizadas (v. fig. 7c). Como se ha indicado previamente, la técnica para restañar la fisuración, tanto en

zonas muy castigadas como en casos aislados, se ha aplicado sólo en el paramento interno de la torre, donde las lesiones son especialmente llamativas. La acción de los redondos de armado se ha potenciado con la inserción de conectores transversales (constituidos por redondos metálicos gridados en forma de U) dispuestos en el interior de perforaciones esviadas retacadas posteriormente con mortero, que contribuyen además de solidarizar los paramentos con el núcleo central.

La intervención del rejuntado armado se ha distribuido sobre los cuatro paramentos en franjas comprendidas entre 11 y 28 m de altura, y en la coronación de la torre (entre 40 y 45 m de altura). El refuerzo de las esquinas, realizado con la misma técnica, ha contemplado buena parte de la zona central de la torre (entre 11 y 37 m de altura), sobre todo, en los frentes Norte y Este. El retacado de las lagunas de las juntas se ha revelado especialmente necesario en toda la coronación de la torre, tanto en el interior como en el exterior (a partir de 37 m de altura aproximadamente). Por último, la intervención de cosido aparejado de las grietas se han limitado a algunos sectores localizados en la zona superior (entre 40 y 45 m de altura, sólo en el interior) y en la inferior (hasta una altura de 20 m, tanto en el interior como en el exterior), donde ha sido necesaria también la realización de inyecciones localizadas.



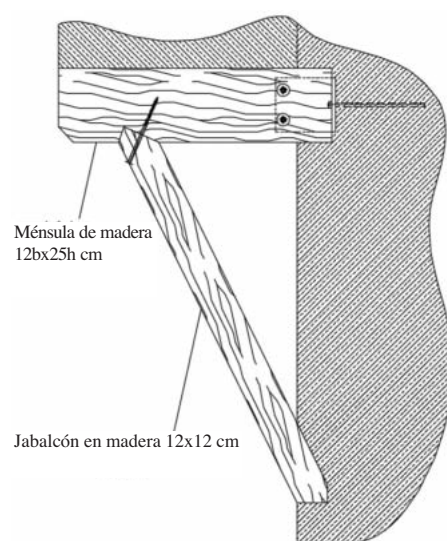
9

c) Intervención en las escaleras internas, cubierta y cornisa de coronación

Las verificaciones de seguridad efectuadas sobre las bóvedas de la escalera interna a la torre han demostrado que estas bóvedas no están sujetas en la mayor parte de los casos a estados tensionales de tracción, ni se detectan condiciones críticas para la madera y el metal que constituyen la solución de apoyo de las ménsulas intermedias con jabalcones y tirantes (fig. 9). En cambio, sí resultaba necesario actuar en las ménsulas de piedra frente a los esfuerzos inadmisibles de tracción, para las cuales se ha propuesto confiar estos esfuerzos de tracción por flexión a una grapa de acero y dejar a las ménsulas existentes únicamente la tarea de resistir las tensiones de compresión. En especial, en el caso de las ménsulas con elementos de subménsula igualmente de piedra, se ha dispuesto en el perímetro de la ménsula un perfil plano de acero inoxidable, anclado al muro mediante redondos de adherencia mejorada en acero inoxidable recibidos con resina y soldadas al perfil metálico. Se ha calculado que la intervención mantiene los esfuerzos de tracción suficientemente bajos en la piedra si el baricentro de la lámina de acero se ubica a una distancia no inferior a 10 cm del borde inferior de la sección (fig. 9).

Para las ménsulas de piedra con jabalcón de madera anclado a la fábrica mediante dos tirantes de acero no se ha detectado problema alguno de resistencia. En cualquier caso, resulta necesario valorar durante la obra el estado de conservación de la madera de los jabalcones y el grado de fiabilidad del anclaje de los tirantes de acero existentes. En el jabalcón se han previsto eventualmente intervenciones de sustitución de las cabezas en el caso de que estén podridas con prótesis de madera maciza o laminada, elementos taraceados y ensamblados con ayuda de tornillos para poder garantizar la continuidad y el funcionamiento estructural del jabalcón (fig. 10b). Para los elementos nuevos de madera se podrá emplear el mismo material y la filosofía de los elementos existentes, teniendo cuidado además de no recibir en obra elementos con un grado de humedad diverso del que tiene la madera existente. La fiabilidad de los tirantes de acero existentes se podrá garantizar con la inserción de un redondo de acero inoxidable con adherencia mejorada, plegado en modo de formar dos brazos paralelos, recibidos con resina al menos 40 cm dentro del muro. La junta de mortero descarnada para la inserción deberá ser retacada con mortero de cal.

Por último, en el caso de las dos bóvedas encadenadas donde falta la ménsula de

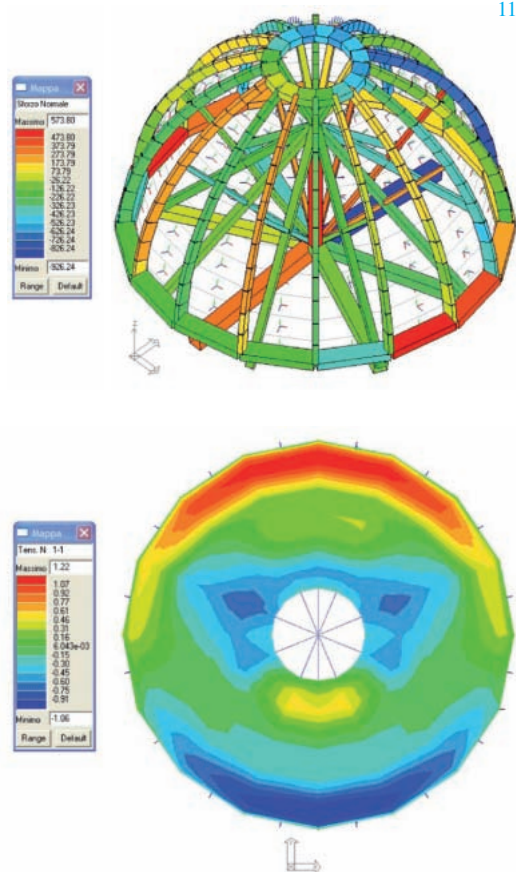


10a

10b



11. Mapa de las tensiones de compresión sobre los elementos bidimensionales de la cubierta (a) y distribución tensional de los elementos tridimensionales en la sección de los meridianos de la cúpula (b)



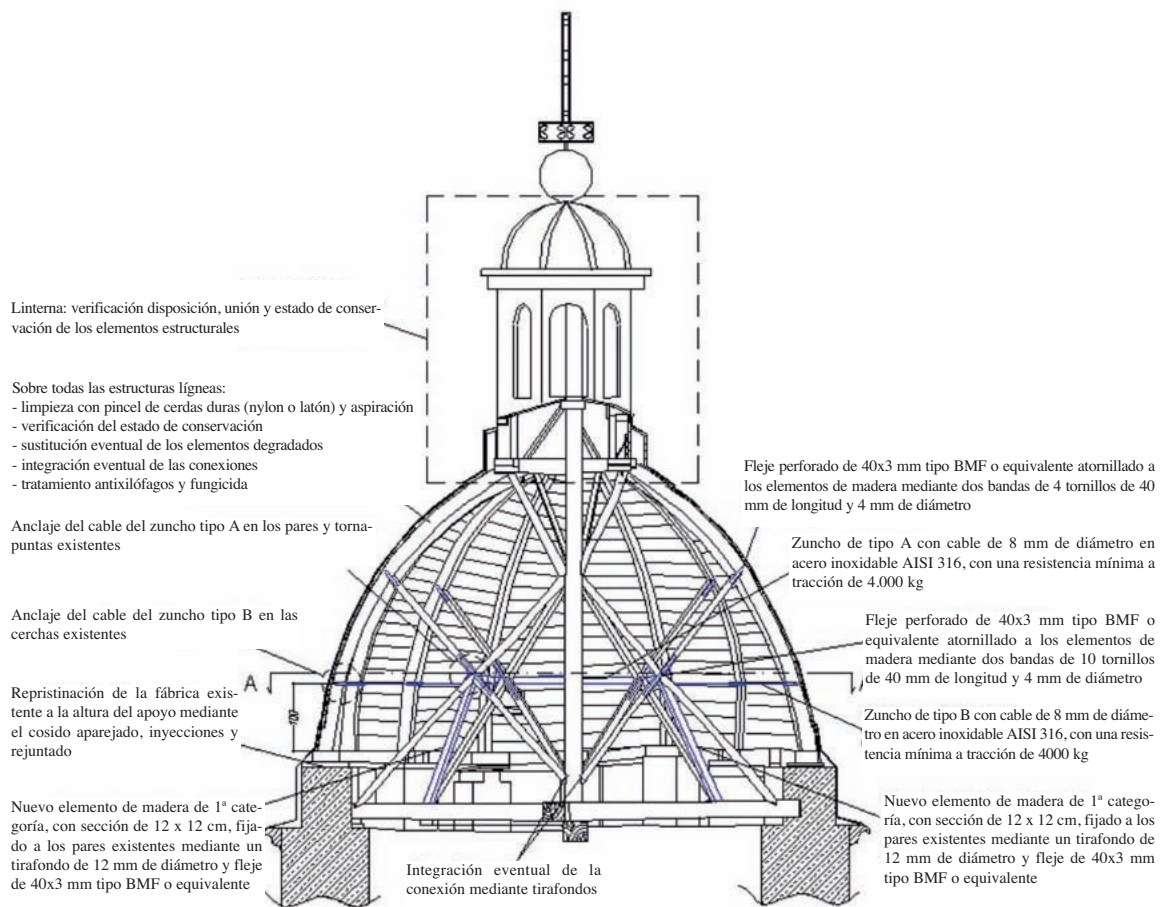
apoyo, se ha previsto la inserción de una nueva ménsula que absorba completamente los esfuerzos de descarga de las bóvedas. Se prevé realizar esta nueva ménsula en madera de 1ª categoría, con el objetivo de distinguir los elementos nuevos de los pétreos ya existentes y, en lo que se refiere a la geometría, se propone la tipología de ménsula con jabalcón en madera (fig. 10a).

El análisis del modelo de elementos finitos del cupulín de la estructura de cubierta, constatado por oportunas inspecciones in situ, nos ha brindado el estado de las solicitaciones de los elementos resistentes, que no resulta excesivo en relación con su resistencia y deformabilidad (fig. 11). Se prevé en cualquier caso la realización de algunas intervenciones de mejora en la estructura y en las conexiones entre los diversos elementos. En las intersecciones de las partes integrantes de las cerchas, se ha previsto el empleo de flejes metálicos atornillados para solidarizar los elementos entre sí. El modelo por elementos finitos ha proporcionado también información para el dimensionado de dos anillos a realizar con ayuda de cables, a colocarse a nivel de la intersección entre pares y tornapuntas (anillo A) para la mejora de la estabilidad de los pares de contraviento de las cerchas y como conexión de las 16 cerchas que constituyen la armadura de la cúpula (anillo B), con el objetivo de absorber parte de los esfuerzos de tracción que actúan sobre el durmiente e impedir la apertura eventual de la cúpula sujeta a la acción del viento (fig. 12). Además, la estabilidad global de los elementos de contraviento de las ocho cerchas viene garantizada por la inserción de dos nuevos elementos de madera de 1ª categoría, conectados con tirafondos sobre flejes y dispuestos en manera que trabajen como puntales o como tirantes, según la dirección de bandeo de los pares. En lo que se refiere al durmiente dañado que aparece en la fig. 4, se prevé la aplicación de flejes metálicos atornillados y

redondos fileteados inoxidables recibidos con resina. En cualquier caso, se ha previsto la aplicación del tratamiento insecticida y fungicida en todos los elementos ligneos existentes y la verificación del estado de la fábrica en los puntos de apoyo de las cerchas, interviniendo eventualmente mediante cosido de las grietas, inyecciones y retacado de juntas.

La intervención de reparación de la cornisa pétreo de coronación, ubicada a 70 m de altura, consiste en la consolidación general de todos los elementos pétreos con la ayuda de pernios, bandas de fibra de carbono y microinyecciones de todas las fisuras, así como la construcción de un marco plano que, mediante un sistema de anclajes, consienta la puesta en seguridad de la cornisa frente a eventuales desprendimientos de los elementos pétreos.

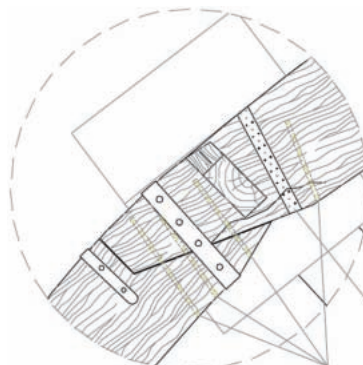
En especial, la solución para el refuerzo se compone de tres grupos de elementos: un zunchado del tambor superior, cuatro marcos de esquina, y una serie de tirantes de anclaje (fig. 1 y 13). El zunchado del tambor superior, efectuada con perfiles calandrados, posee la doble función de rigidización y de base de anclaje para el marco de la esquina y para los tirantes. Los marcos de esquina están constituidos por tubos se sección cuadrada dispuestos de modo que puedan abrazar todos los elementos pétreos en torno a las columnas ornamentales en piedra ubicadas en las esquinas. La estructura está constituida por tramos de perfil tubular soldados en taller y ensamblados en obra mediante tuercas y barras roscadas. Los tirantes de anclaje están constituidos por placas conectadas a los elementos de piedra con redondos y resina. Se ha previsto un cierto grado de deformabilidad de los encuentros con los marcos y con los zunchos para evitar los daños debidos a la acción térmica dado que, estando la estructura de refuerzo de la cornisa expuesta al exterior del campanario, estos efectos podrían ser significativos. De hecho, una eventual dilatación o retracción de los tirantes de anclaje posterior a la fase de instalación podría instau-



12a



12b

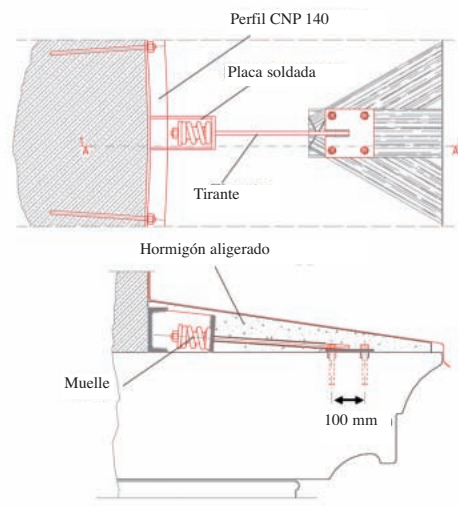
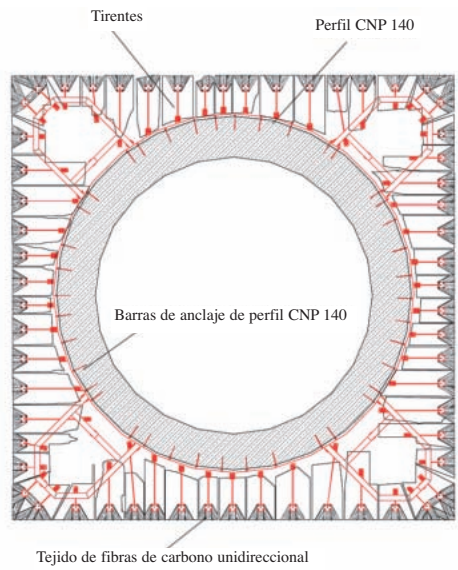


12c

Nº 1+2 flejes perforados 40x3 mm tipo BMF o equivalente fijados mediante tornillos de 40 mm de longitud y 4 mm de diámetro

Nº 4 redondos fileteados de acero inoxidable de 10 mm de diámetros recibidos con resina

12. Descripción general de las intervenciones en la cúpula de la torre (a), detalle del anclaje del cable para el zuncho A (b) y de la intervención en el durmiente lesionado (c)



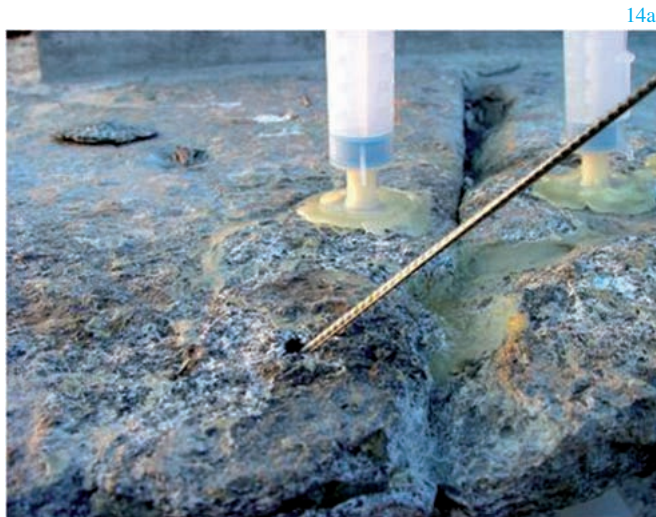
13. Esquema de refuerzo de la cornisa de coronación y detalle de los tirantes de anclaje
 14. Intervención de consolidación en la cornisa mediante inyecciones y barras (a) y fijación mediante grapas metálicas (b)

rar coacciones no toleradas por los elementos pétreos. Para obviar este problema se ha pensado la interposición de muelles en el nudo de anclaje de los tirantes con la estructura de marco (compuesta por el zunchado y los marcos horizontales de esquina), de manera que se consienta la dilatación del tirante por la acción térmica, manteniendo la tensión de tracción bajo los límites consentidos. Para completar el sistema de anclaje se ha previsto una banda de fibra de carbono en la parte perimetral superior, además de microinyecciones consolidantes y grapas metálicas para algunas de las partes dañadas o sueltas de la cornisa de piedra (fig. 14).

CONCLUSIONES

La campaña de estudios previos realizada por el Politécnico de Milán, además de la monitorización de las lesiones más importantes (ininterrumpida desde 1978) han permitido desvelar las partes más dañadas de la torre y las causas de estas patologías. La situación de la estructura ha inducido una intervención sin mayor delación ni ulteriores monitorizaciones. El proyecto de intervención se ha centrado por tanto en la consolidación de la torre. La estrecha colaboración entre el proyectista, los investigadores del Politécnico de Milán y de la Universidad de Padua, y el continuo contacto con la

Soprintendenza ha permitido, en primer lugar, reducir la intervención estructural prevista al mínimo indispensable y, en segundo lugar, evitar el lavado y los tratamientos dañinos en las superficies externas por la presencia de rejuntados con presencia de yeso. Esta colaboración, la revisión y las sugerencias brindadas por el Consejo Nacional para los Bienes Culturales de Italia –materializado en el Comité del Sector de Bienes Ambientales y Arquitectónicos y en la Soprintendenza, han coadyuvado a la realización de un proyecto con variantes funcionales que se ha planteado desde el mayor respeto posible hacia al edificio existente.



Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los ingenieros C. Bettio, D. Penzo, F. Bergo, F. Lucchin y E. Barin por su apoyo en las fases de verificación de los datos y el proyecto de intervención.

BIBLIOGRAFÍA

- Anzani A., Binda L. e Mirabella G. (1999), "The role of heavy persistent actions into the behaviour of ancient masonry" en *Structural Faults + Repair*, 8th International Conference and Exhibition, London, UK (CD ROM)
- Anzani A., Binda, L., Mirabella Roberti G. (2000), "The Effect of Heavy Persistent Actions into the Behaviour of Ancient Masonry" en *Materials and Structures*, vol. 33, n. 228, 2000, pp. 251-261
- Bettio C., Bolognini L., Modena C. (1995), "Structural evaluation of the leaning bell tower of S. Stefano in Venice" en *IABSE Symposium Extending the Lifespan of Structures*, S. Francisco, USA, Agosto 1995, pp. 687-692
- Binda L., Anti L., Valsasini L. (1993), "Indagine sperimentale sul comportamento meccanico dei materiali recuperati dalle rovine della torre civica" en *Tema-Tempo Materia Architettura*, 4, pp. 27-41
- Binda L., Modena C., Saisi A., Tongini Folli R., Valluzzi M.R. (2001), "Bed joints structural repointing of historic masonry structures" en *9th Canadian Masonry Symposium 'Spanning the centuries'*, Fredericton, New Brunswick, Canada, 4-6/06/2001 (en CD-ROM)
- Binda L., Modena C., Valluzzi M.R. (2003), "Il restauro del campanile del Duomo di Monza: scelte di progetto e tecniche d'intervento" en *Arkos - Scienza e Restauro dell'Architettura 1*, Enero/Marzo 2003, Nardini Ed., pp. 44-53
- Binda L., Modena C., Valluzzi M. R., Zago R. (1999), "Mechanical effects of bed joint steel reinforcement in historic brick masonry structures" en *Structural Faults + Repair - 99*, 8th International Conference and Exhibition, London, England, Julio, 13-15 1999 (en CD-ROM)
- Binda L., Poggi C., Tiraboschi C., Tongini Folli R. (2001), "Il Campanile del Duomo di Monza: diagnosi in situ e in laboratorio su struttura e materiali" en *ARKOS*, 2001, 4, pp. 40-47
- Binda, L., Anzani A. (1993), "The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation" en *The Masonry Society Journal*, vol. 11, n. 2, 1993, pp. 17-34
- Binda, L., Anzani, A., Gioda, G. (1991), "An analysis of the time-dependent behaviour of masonry walls" en *9th International Brick/Block Masonry Conference*, Berlin, 1991, vol. 2, pp. 1058-1067
- Binda, L., Gatti, G., Mangano, G., Poggi, C., Sacchi Landriani, G. (1992), "The collapse of the Civic Tower of Pavia: a survey of the materials and structure" en *Masonry International*, vol. 6, n.1, 1992, pp. 11-20
- Modena C. (1994), "Repair and upgrading techniques of unreinforced masonry structures utilized after the Friuli and Campania-Basilicata Earthquakes" en *Earthquake Spectra*, 1994, Vol. 10, 1, pp. 171-185
- Modena C. (1997), "Criteria for cautious repair of historic buildings" en L. Binda & C. Modena (Eds.): *Evaluation and Strengthening of Existing Masonry Structures*, RILEM, Paris, pp 25-42
- Modena, C., Valluzzi, M.R., Tongini Folli, R., Binda, L. (2002), "Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower" en *Construction and Building Materials*, Special Issue, Elsevier Science Ltd., 16 (7) (2002) 385-395
- Saisi, A., Valluzzi, M.R., Binda, L., Modena, C. (2004), "Creep behavior of brick masonry panels strengthened by the bed joints reinforcement technique using CFRP thin strips", en *Proc. of SAHC2004: IV Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions - possibilities of experimental and numerical techniques*, Padova, Italy, noviembre 2004, 837-846
- Tinazzi, D., Valluzzi, M.R., Bianculli, N., Lucchin, F., Modena, C. & Gottardo, R. (2003), "FRP strengthening and repairing of masonry under compressive load" en *Proc. 10th International Conference on Structural Faults and Repair*, London 1st-3rd Julio 2003, (CD-ROM). Edinburgh: Engineering Technical Press
- Valluzzi M.R., Casarin F., Garbin E., da Porto F., Modena C. (2005a), "Long-term damage on masonry towers: case studies and intervention strategies" en *11th International Conference on Fracture*, Turin (Italy), Marzo 20-25, 2005 (CD-ROM)
- Valluzzi M.R., da Porto F., Modena C. (2003a), "Structural investigations and strengthening of the civic tower in Vicenza" en *Structural Faults & Repair - 2003*, Commonwealth Institute, Kensington, London, UK, 1-3 Julio 2003 (10 pp., on CD-ROM)
- Valluzzi, M.R., Binda, L., Modena, C., (2004), "Mechanical behavior of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing" en *Construction and Building Materials*, Elsevier Science Ltd. 19 (1) (2004) 63-73
- Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Garbin, E., Modena, C., (2003b), "FEM modelling of CFRP strips bond behaviour for bed joints reinforcement technique", en *Proc. of STRUMAS VI, Septiembre 2003*, Rome, Italy, en *Computer Methods in Structural Masonry 6* (T.G. Hughes & G.N. Pande Ed., Computers & Geotechnics Ltd, Swansea, UK) 149-155
- Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C., (2005b), "Strengthening of masonry structures under compressive loads by FRP strips: local-global mechanical behavior" en *Science and Engineering of Composite Materials*, Special Issue, Freund Publishing House Ltd, Tel Aviv, Israel, 12 (3) (2005) 203-218