

# El comportamiento a largo plazo de torres y estructuras de fábrica El Campanario de la Catedral de Monza\*

Luigia Binda, Antonella Saisi, Claudia Tiraboschi\*



1. El Campanario de la Catedral de Monza (foto: Luigia Binda)

**Palabras clave:** torre, colapso, fatiga, viscosidad, fábrica de ladrillo, comportamiento a largo plazo

*Keywords:* tower, collapse, fatigue, creep, viscosity, brick masonry, long-term behaviour

Tras el colapso de varios edificios de fábrica y torres en algunos países como Italia, los autores han formulado la hipótesis de un posible deterioro continuo de dichas estructuras debido tanto a las solicitaciones derivadas del peso propio como de las cargas cíclicas (viento, variaciones de temperatura, etc). El comportamiento a largo plazo de la mampostería histórica ha sido también objeto de estudio mediante un seguimiento continuo de ensayos en laboratorio y la aplicación de pruebas cíclicas. Los resultados indican que una investigación, tanto en laboratorio e in situ, sumada a una modelización analítica puede resultar fundamental en casos de campanarios de cierta altura. A continuación, se propone la aplicación de dichos procedimientos en el Campanario de la Catedral de Monza.

*Long-term behaviour of towers & fabric structures. The bell tower of Monza cathedral. After the collapse of some heavy buildings and towers in Italy and elsewhere, the hypothesis of possible continuous damage to these structures due to the dead and cyclic loads (wind, temperature variations, etc.) has been formulated by the authors. The long term behaviour of historic masonry has also been detected by laboratory creep and cyclic tests. The results indicate that a laboratory and on site investigation together with analytical modelling are important peculiarly for tall bell-towers. The application of these procedures on the Bell-Tower of the Cathedral of Monza is here reported and discussed.*

\*L. Binda, A. Saisi y C. Tiraboschi pertenecen al departamento de Ingeniería Estructural del Politécnico de Milán. Traducción de N. Matarredona Desantes

2. Evolución del cuadro de fisuración: 1916-20, 1932 (fotos: Fratelli Alinari) y 1995 (foto: Luigia Binda)



Tras el colapso de varios edificios de fábrica y torres en algunos países como Italia, los autores han formulado la hipótesis de un posible deterioro continuo de dichas estructuras debido tanto a las sollicitaciones derivadas del peso propio como de las cargas cíclicas (viento, variaciones de temperatura, etc). El comportamiento a largo plazo de la mampostería histórica ha sido también objeto de estudio mediante un seguimiento continuo de ensayos en laboratorio y la aplicación de pruebas cíclicas. Los resultados indican que una investigación, tanto en laboratorio e in situ, sumada a una modelización analítica puede resultar fundamental en casos de campanarios de cierta altura. A continuación, se propone la aplicación de dichos procedimientos en el Campanario de la Catedral de Monza. Este campanario construido en el siglo XVII, a 30 km de Milán, con visibles indicios de deterioro estructural, ha sido estudiado por el Departamento de Ingeniería Estructural del Politécnico de Milán con el propósito de definir el estado de sus lesiones. Un examen visual directo de las caras este y oeste de la torre, de aproximadamente 74 m de altura,

muestra fenómenos de fisuración extendidos, ya presentes con certeza desde hace más de 70 años.

En atención al desastroso y repentino colapso de la Torre Cívica de Pavía en 1989, bajo cuyos escombros perecieron cuatro personas, se ha decidido llevar a cabo un peritaje diagnóstico exhaustivo que comprende tanto pruebas in situ y en laboratorio como análisis estructural a fin de evaluar el grado de seguridad y estabilidad de la torre.

El estudio de la configuración del cuadro de fisuración ha permitido determinar una peligrosa propagación de finas fisuras en una cota comprendida entre los 11m y los 30 m con respecto al suelo. Se han tomado in situ varias muestras de mortero y ladrillo que posteriormente se han analizado y caracterizado en el laboratorio mediante pruebas químicas, petrográficas, físicas y mecánicas.

A fin de no agravar las condiciones de la mampostería, se han llevado a cabo con gato plano algunas pruebas ligeramente destructivas en puntos significativos de la estructura con el fin de acentuar el estado de esfuerzo a que se encuentra sometido el campanario y definir el comportamiento

tenso-deformativo del material. Los ensayos sónicos han permitido evaluar el estado de los muros, determinando la presencia de deterioro y su extensión.

Finalmente, se ha estudiado el comportamiento de los materiales en función de su antigüedad y a tenor de los fenómenos de fatiga. Con este objeto, se han sometido a ensayo algunas muestras tomadas del muro de la cripta de la Catedral, coetánea y similar su materialidad al campanario. Esta extracción ha sido posible gracias a la apertura de un pasaje entre la cripta y la ampliación del museo capítular.

Por último, se ha sometido a la torre a una serie de ensayos dinámicos utilizando las vibraciones inducidas por el movimiento de las campanas, que han permitido calibrar un modelo numérico eficaz del edificio. Las condiciones de la torre han sido también verificadas mediante un modelo matemático de tipo elástico, teniendo en cuenta no sólo los efectos del peso propio sino incorporando también los esfuerzos provocados por el viento y las variaciones de temperatura. Los resultados del peritaje y el análisis estructural han permitido definir y evaluar las condiciones estáticas y el estado de conservación de la torre.

### Síntesis de las vicisitudes constructivas y descripción de las primeras muestras de deterioro

La investigación y el estudio de documentación histórica sobre las fases constructivas de la torre (fig. 1), han resultado un apoyo útil para diagnosticar el estado actual de la estructura. La construcción del campanario se remonta a finales del siglo XVI. De hecho, fue iniciada en 1592, quizás bajo proyecto de Pellegrino Pellegrini, y fue concluida en 1605 (Scotti, 1989). Dado este periodo relativamente breve de trece años de obra, se puede suponer una unidad en criterios de proyecto y una uniformidad de materiales y técnicas constructivas empleadas. En contraposición al campanario de Monza, la construcción de muchas otras torres, como la Torre Cívica de Pavía, se prolongó durante varios años e incluso siglos.

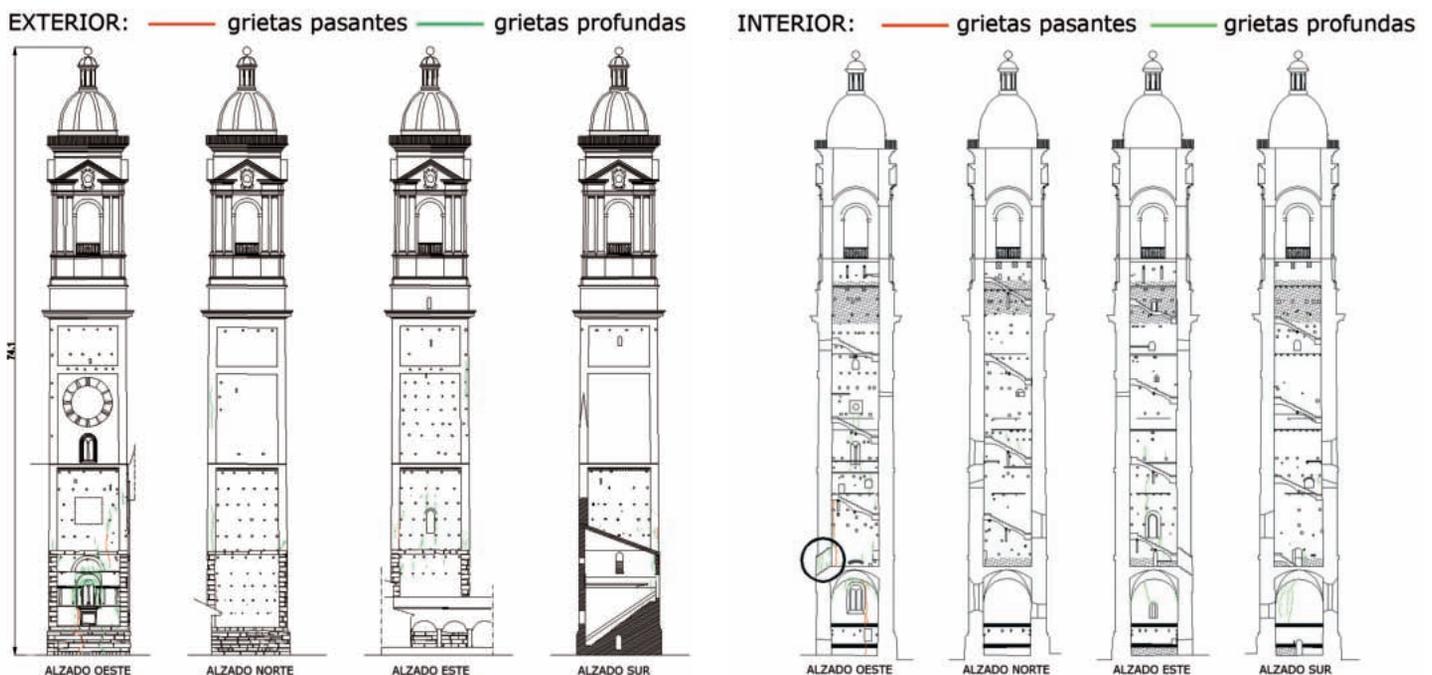
El único suceso realmente traumático para la torre registrado en los documentos históricos archivados, fue el incendio que tuvo lugar en 1740 (Archivo Capitular de

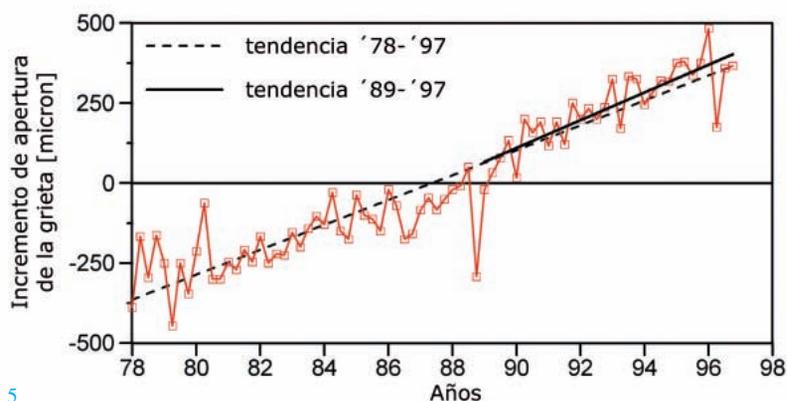
Monza, Archivo de Estado de Milán), que consumió la estructura de madera de soporte de las campanas y causó la caída de material e incluso de las campanas sobre la bóveda del primer piso, situada a 11 m del suelo. Acto seguido, se emprendieron los trabajos de restauración que se prolongaron durante varios años. En 1755 se instaló el reloj y se efectuaron algunas intervenciones de rehabilitación.

Otros eventos a destacar pero de menor entidad que el incendio, fueron la caída de un rayo en 1816 (Biblioteca Capitular de Monza) sin mayores repercusiones; un tornado en 1842 (Biblioteca Capitular de Monza) que causó daños leves en la cubierta; y el violento huracán de 1928 que provocó el derrumbe del pináculo de la fachada de la Catedral que, sin embargo, no llegó a dañar al campanario. En 1927, ante las fisuras en los muros del campanario, se colocaron en los paramentos regletas transparentes de monitorización, sobre las lesiones mayores a fin de controlar los movimientos. La comparación de tres fotografías tomadas en

1916-1920, 1932 y 1956 evidencian que las mayores grietas estaban presentes ya desde 1932. De todos modos, no se tiene constancia de intervenciones que pretendiesen limitar la propagación de dicho fenómeno de fisuración y del desequilibrio que se estaba gestando (fig. 2). Esta fisuración se desarrolla verticalmente y es pasante en las caras este y oeste de la torre (figs. 3, 4). La más extendida y preocupante ocupa la fachada principal oeste, y es visible incluso desde la plaza (fig. 6). Desde 1978 a 1998, las fisuras fueron controladas mediante extensímetros desmontables que se controlaban periódicamente, cuyos datos muestran un progresivo y continuo empeoramiento. De hecho, el incremento anual de la apertura pareció incrementarse desde 1988, suscitando grande preocupación por la seguridad de la estructura.

La figura 5 muestra el gráfico del seguimiento de la grieta principal en el periodo 1978-1998, en el que es posible observar una clara tendencia de incremento, especialmente rápido a partir de 1988.





5

Existen otras fisuras en los paramentos internos de la torre: se trata de fisuras verticales, sutiles y difusas en los cuatro lados de la torre, pero particularmente profundas a la altura del pasaje que permite el acceso a la torre, donde se concentran las sollicitaciones (fig. 8). La fisuración se concentra principalmente en los ladrillos y prosigue hacia el interior de la sección del muro hasta una profundidad de 45 cm, tal como se ha demostrado mediante una precisa toma de datos de la zona.

El estado de fisuración que se ha desarrollado con los años podría estar relacionado con el comportamiento dependiente de la antigüedad de los materiales, y ligado a la presencia de un considerable peso propio (Binda et al., 2003). Este fenómeno, junto al efecto de las cargas cíclicas como el viento y las variaciones térmicas, podría provocar el colapso de la estructura.

Situaciones similares con fisuras verticales y colapso repentino se verificaron en el caso de la Torre Cívica de Pavía que se desmoronó en 1989 (Binda et al., 1992) (fig. 9), en la Torre de Santa Magdalena de Goch que se vino abajo en 1992 (Gantert Engineering Studio, 1993) o en la Catedral de Noto, que se derrumbó parcialmente en (Iacono B, 1996) (Binda et al 2001a,b) (fig. 10).

Ante esta situación, se decidió encargar al Departamento de Ingeniería Estructural del Politécnico de Milán, bajo la responsabilidad de L. Binda y C. Poggi, la definición de una campaña de ensayos y experimentos para poder evaluar el estado de la torre.

### Peritaje in situ

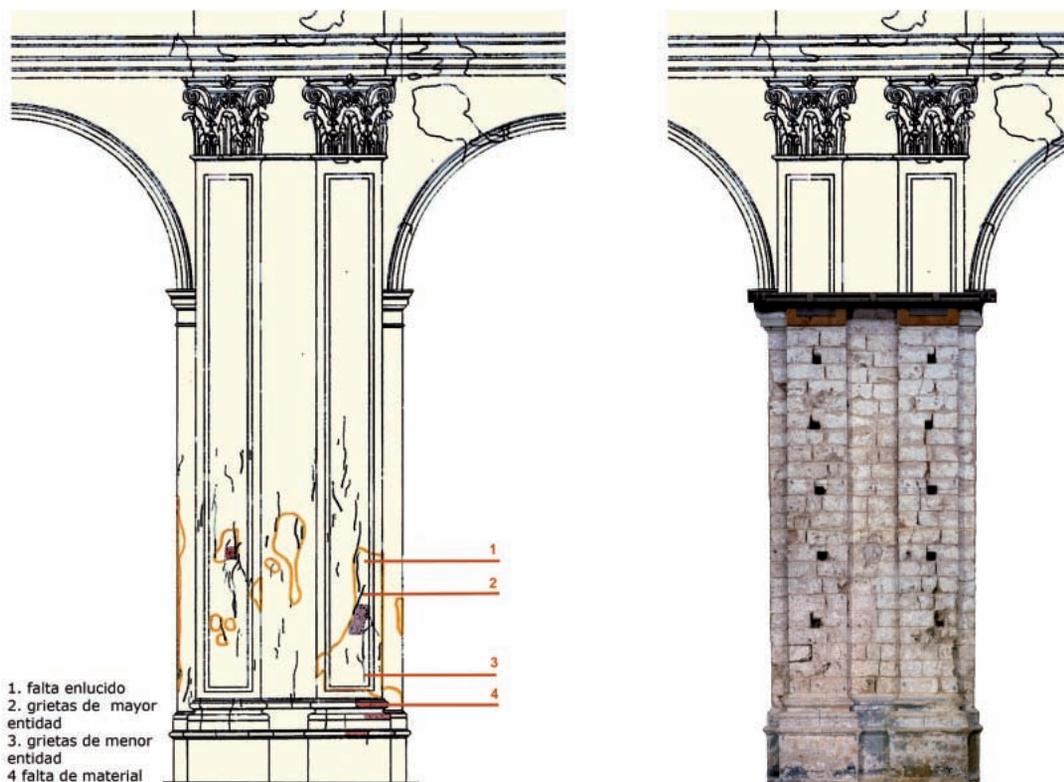
La primera información requerida en un diagnóstico es la geometría del edificio. En efecto, el levantamiento métrico llevado a cabo fue empleado no sólo para la creación de un modelo tridimensional importado posteriormente a los análisis numéricos, sino como referencia para las sucesivas estrategias de diagnóstico (Binda et al. 2000). A pesar de que las mayores fisuras fueron controladas desde 1978, no se halló documentación alguna previa referente a plantas y alzados de la torre.

La información métrica requerida incluía la entidad, distribución y profundidad de las fisuras en la sección del muro. Para ello, se tomaron datos del estado actual de fisuración, documentando el desarrollo de las fisuras en planta, alzado y sección, con tal de obtener un cuadro del conjunto que permitiese dar una primera interpretación del deterioro de la estructura y se convirtiese en una referencia válida para modelos matemáticos lineales y no lineales.

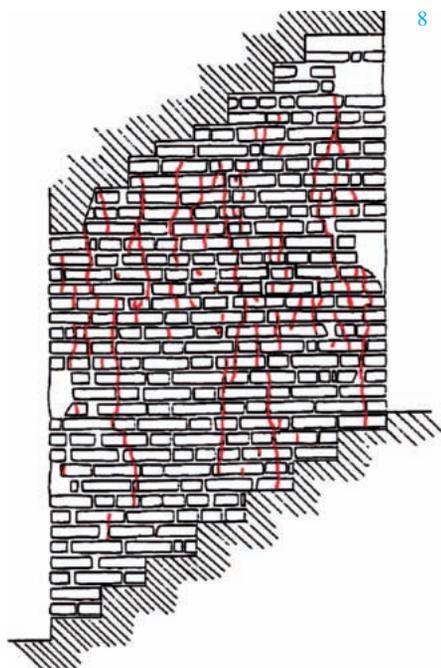


6

3. Cuadro de fisuración de los alzados exteriores
4. Cuadro de fisuración de los alzados interiores. Destaca la concentración de fisuras en la entrada de la torre
5. Incremento de la apertura de la fisura monitorizada desde 1978
6. Fisura en el alzado oeste de la torre (foto: Luigia Binda)



1. falta enlucido
2. grietas de mayor entidad
3. grietas de menor entidad
4. falta de material



7. Cuadro de fisuración de uno de los pilares de la Catedral de Noto antes y después de la eliminación del enlucido

8. Detalle del cuadro de fisuración de la mampostería en el ingreso al núcleo de comunicación de la torre

9. La Torre Cívica di Pavía después del colapso (foto: Luigia Binda)

10. La Catedral de Noto (Siracusa) tras el derrumbe (foto: R. De Benedictis)

### Levantamiento geométrico

Por razones económicas y ahorro de tiempo, se decidió efectuar el levantamiento de las caras externas utilizando técnicas fotogramétricas, y el de los alzados internos mediante métodos tradicionales. Como apoyo, se usó una red topográfica de vértices situados en la plaza de la Catedral definida en 1993. Utilizando como estación algunos vértices de dicha red, se tomaron puntos significativos del alzado oeste que sirvieron para la restitución de las fotografías. (Binda et al., 1996, Astori et al., 1992). Las tomas se realizaron con una cámara Rollei 6006, que ha permitido obtener referencias métricas exactas mediante la superposición a la imagen de una retícula de puntos calibrada. La restitución de las imágenes se ha efectuado mediante un programa de fotogrametría simplificada (Elcovisión 10). De este modo, se han podido obtener dos productos: un modelo tridimensional detallado a partir del cual se han obtenido los alzados externos e internos y las secciones, más

un modelo simplificado en el que se reflejan sólo las características esenciales de la geometría a utilizar en los análisis numéricos, restando importancia a los detalles no significativos para el cálculo. No se ha tomado en consideración para el levantamiento métrico la pendiente debida al ligero fenómeno de hundimiento que afecta a la plaza.

### Toma de datos del cuadro fisurativo y de la sección del muro

La presencia de un estado de fisuración difuso ha impuesto la necesidad de llevar a cabo una completa y precisa toma de datos de las fisuras presentes en los muros de la torre, que se midieron in situ y en fotografías y, posteriormente, se recogieron en plantas, alzados y secciones. Mientras tanto, se continuó controlando el desarrollo de las grietas mayores, hasta el punto que en 1992 se decidió instalar un sistema automático de monitorización. La tendencia a la apertura de tres lesiones monitorizadas fue igual a 30'6, 31'3 y 39'7 micrometros/año en el periodo 1978-1995,



9

10





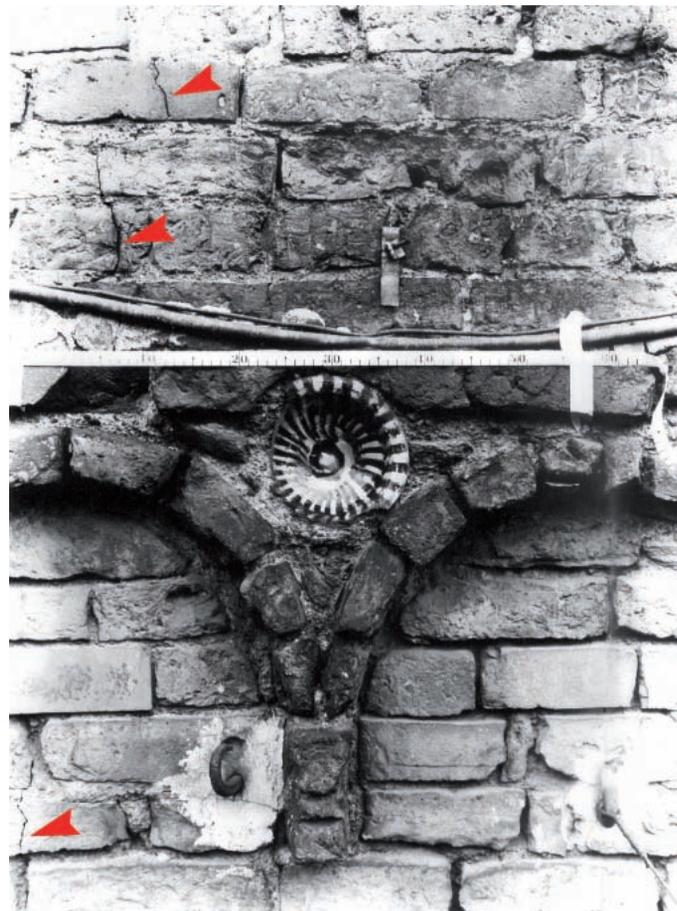
11



12



13



14

11. Detalle de una fisura situada en la arista de la Torre de Monza (foto: Luigia Binda)

12. Sutiles fisuras en el muro de ingreso al núcleo de la torre. Se puede observar como las fisuras se propagan incluso hacia el interior de la sección del muro (foto: Luigia Binda)

13. Ladrillo extraído de mampostería deteriorada. Es importante subrayar cómo se ha pulverizado completamente (foto: Luigia Binda)

14. Detalle de las sutiles fisuras presentes en la mampostería de la Torre Cívica de Pavía (foto: Luigia Binda)

15. Ensayo con el gato plano simple y doble: secciones de corte, toma de datos del muro y localización de las bases de medida

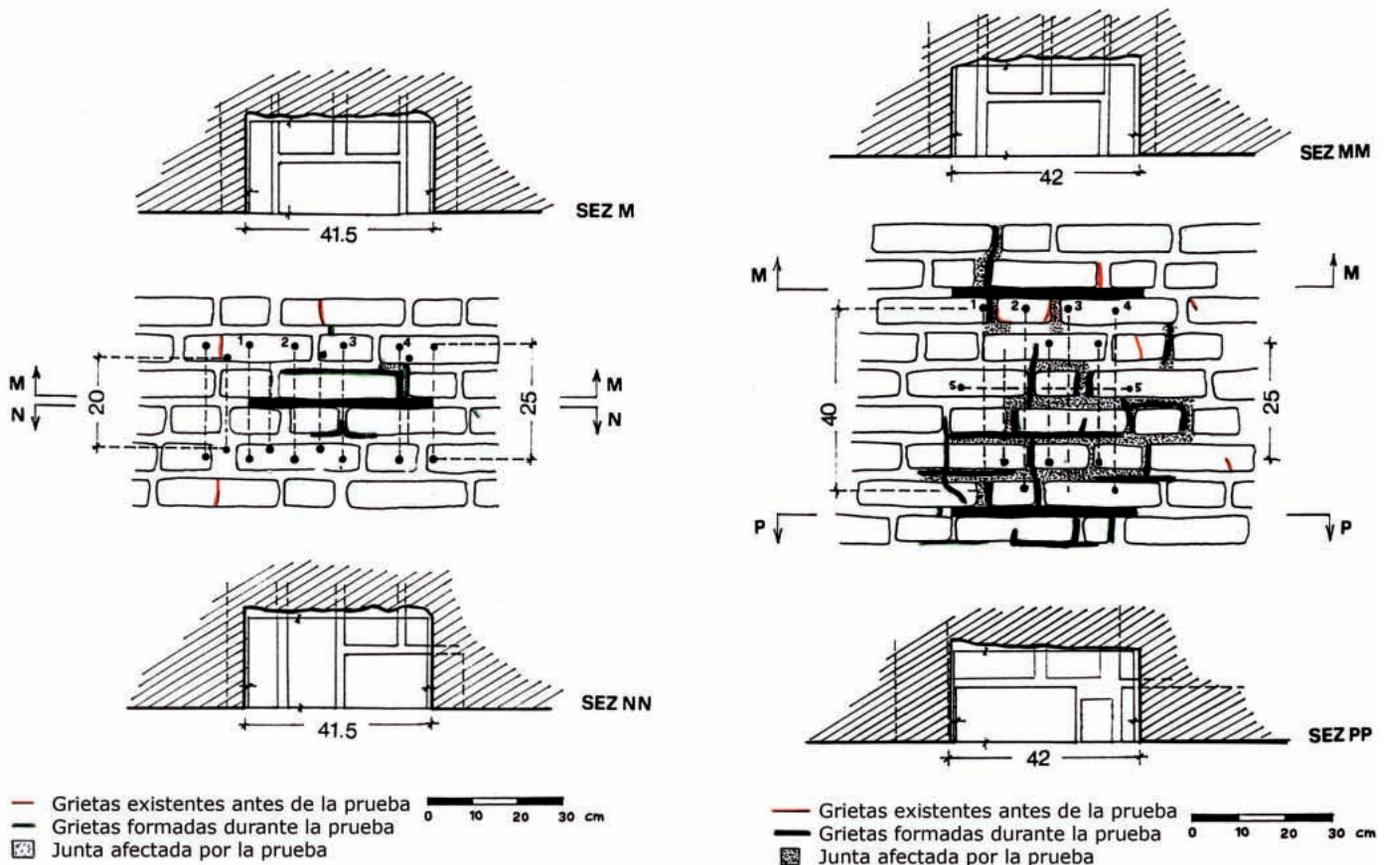
16. Ensayo con gato doble efectuado a cota 5'4 m

17. Ensayos con gato doble efectuado a cota 38 m

y a 412, 35'2 e 56'2 micron/año en el periodo 1988-1997. Merecen especial atención las grietas presentes en las aristas de las caras norte y sur de la torre, zonas que no son accesibles desde el exterior si no es mediante andamio (fig. 11).

Las operaciones de documentación han evidenciado una alta concentración de fisuras verticales que fracturan los ladrillos, tanto en el interior como en el exterior de la torre a partir de una cota de 12 m hasta alcanzar alrededor de dos tercios de su altura total. Esta situación es perfectamente visible en la figura 3 donde se han relacionado mediante superposición los cuadros de fisuración y los alzados de la torre. En las figuras 8 y 12 se puede observar la difusión de las finas fisuras en los muros que delimitan el pasaje de acceso al campanario. Fisuras similares eran visibles también en el caso de la torre de Pavía previo al derrumbe.

La mampostería externa de la torre está compuesta por hiladas regulares de ladrillo. A fin de averiguar si la sección del muro era maciza o estaba formada por más de una capa, como sucede en algunas torres, se procedió a la extracción de varios ladrillos y a su posterior reposición tras haberse tomado datos gráficos y fotográficos sobre la composición interior del muro y el estado de fisuración en el interior de la cata. Las figuras 12 y 13 representan la profundidad de las fisuras en la sección del muro y el estado de los ladrillos extraídos de los muros más fisurados, respectivamente. Se sometieron a examen cuatro puntos de la fábrica, obteniendo los mismos resultados y consideraciones finales. Esta inspección no sólo ha confirmado que la sección del muro es una fábrica maciza de ladrillo tomado con mortero de cal, sino también ha permitido extraer material para analizar y caracterizar en laboratorio.



15

### Sondeos

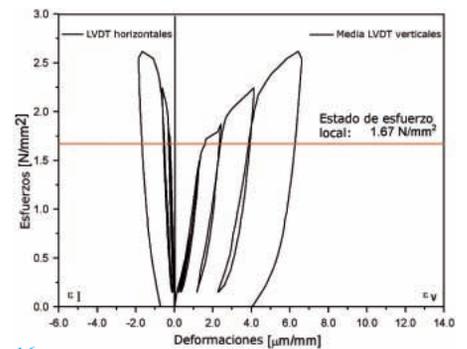
Esta técnica de peritaje está considerada como la menos destructiva para la obtención de material, y por tanto ha sido utilizada en muchos más puntos. Sin embargo, en el caso de materiales como el mortero de la junta, puede llegar a hacer añicos el material durante la operación y convertirse en destructiva. El sondeo sólo permite definir la estratigrafía de la sección del muro, pero no consiente una posterior reconstrucción.

En el caso del campanario de la Catedral de Monza, la falta de consistencia de la cara externa de los ladrillos no ha permitido un anclaje estable del aparato de sondeo en la fábrica, comprometiendo el éxito de la operación. Aún así, las inspecciones mediante videocámara en los orificios dejados por el sondeo han confirmado la hipótesis de una sección maciza.

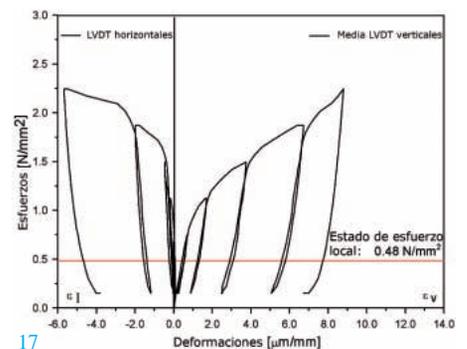
### Gato plano

Se han efectuado pruebas con gatos planos (fig. 15) para medir el valor del estado de sollicitación y la deformabilidad del material (ASTM, 1991, RILEM, 1990). Se llevaron a cabo siete pruebas con gato plano simple, respectivamente a cotas 5'4, 5'6, 13'0, 14'0, 31'5, 38'0 m de la torre. Los resultados obtenidos se reflejan en la figura 18. Se puede observar como el valor del estado de esfuerzo crece desde la cúspide hacia la base de la torre, con variaciones debidas a la presencia de aperturas, que son mayores en número en la parte baja de la torre.

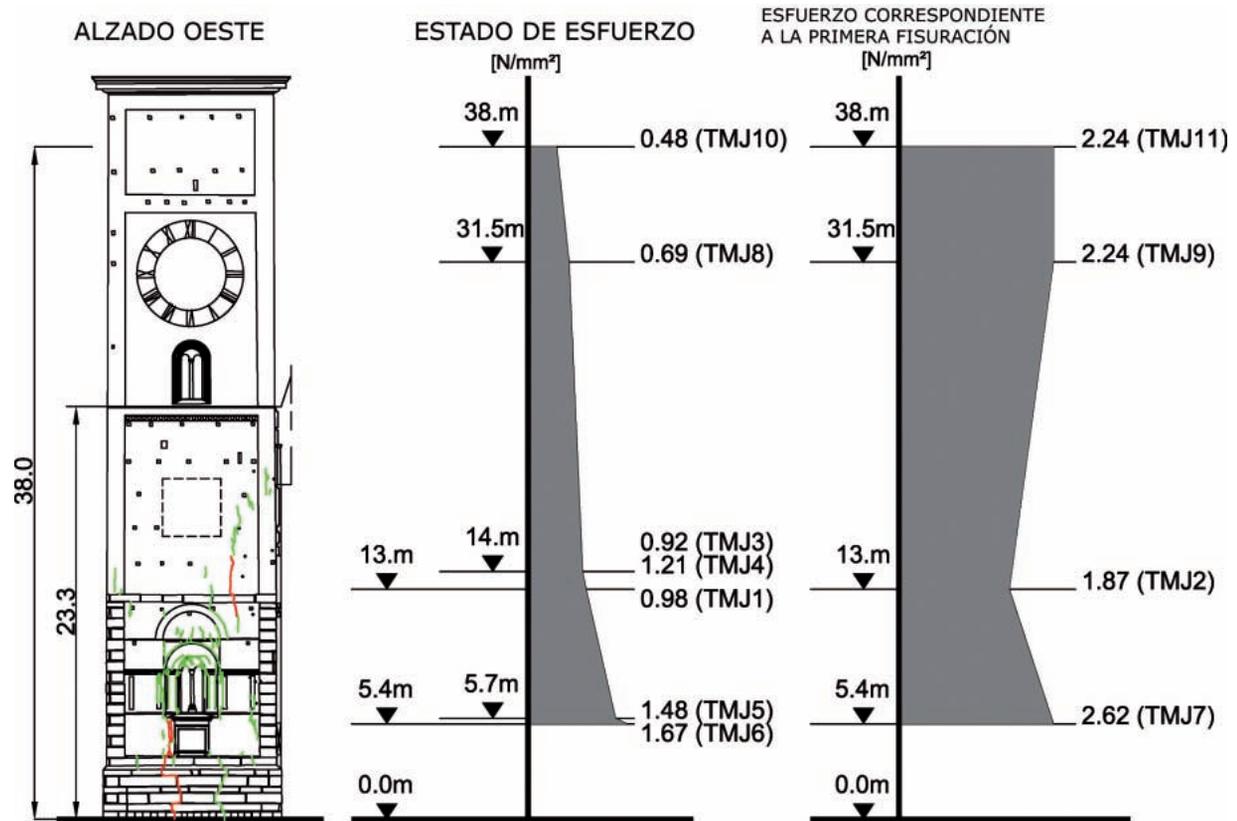
Los valores de pico del estado de sollicitaciones se muestran especialmente peligrosos, teniendo en cuenta los valores de resistencia característicos de este tipo de fábricas que fueron obtenidos en las pruebas con el gato doble (Binda et al., 1999 e 2002). La figura 16 muestra, por



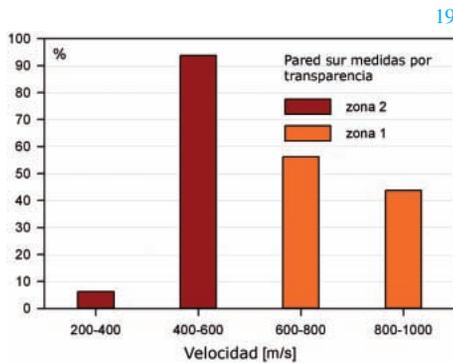
16



17



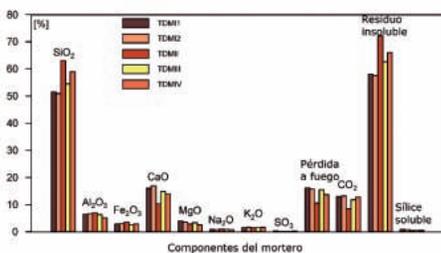
18



19

ejemplo, los resultados obtenidos a dos alturas diferentes. En la misma figura se reflejan también los estados de esfuerzo medidos en idénticas posiciones con gato sencillo. La tabla 1 refleja los valores de fisuración de la fábrica obtenidos en los ensayos y evidencia como las solicitaciones no son muy distantes a los valores alarmantes, si se consideran los factores de seguridad adoptados de los códigos referentes a obra nueva. Los resultados aclaran las causas del difuso cuadro de fisuración obtenido en la Torre.

destructivas (Binda et al, 2000 e 2001). En concreto, para la calibración, se distinguieron dos áreas de una altura de 12 m, correspondientes a muros de un espesor similar, que ronda los 1.80 m. En la zona 1, el muro puede ser considerado en condiciones aceptables. No se evidencian indicios de fisura o lesión, a pesar de que las pruebas precedentes con el gato plano habían determinado un valor de esfuerzo bastante elevado en su interior (0.92 N/mm<sup>2</sup>). Por el contrario, en la zona 2, se presentan desequilibrios bien visibles con fisuración difusa.



20

### Peritaje sónico

El campanario de la catedral de Monza fue también sometido a peritaje de carácter sónico, obteniendo datos cualitativos sobre el estado de los muros. Si son calibradas adecuadamente, las velocidades sónicas pueden proporcionar información cualitativa sobre áreas extensas de muro, sin tener que recurrir a pruebas

Una comparación entre los datos obtenidos muestra como la zona 1 presenta valores sistemáticamente superiores respecto a la zona 2. La diferencia es claramente visible en los histogramas de frecuencia en la figura 19. Ensayos posteriores han confirmado la existencia de zonas de muro muy perjudicadas en niveles inferiores en la torre.

### Ensayos de laboratorio

Las muestras de material extraídas de los muros de la torre fueron calificadas mediante ensayos de laboratorio. Contemporáneamente fueron extraídas algunas probetas de la cripta de la catedral que, según los historiadores, es coetánea a la torre. Los ensayos realizados a los materiales constituyentes confirmaron esta suposición: los materiales de la cripta y de la torre son del mismo tipo. Como consecuencia, se ensayaron las probetas a viscosidad y fatiga para analizar el comportamiento a través del tiempo de un material similar al de la torre (Lenczner D, 1982, Binda et al., 1997).

### Mortero y ladrillos

Las muestras de mortero y ladrillos extraídas de la torre fueron sometidas a análisis químicos, mineralógico-petrográficos, físicos y a ensayos mecánicos. Los análisis químicos tenían como objetivo obtener la composición de los morteros, en términos de naturaleza del conglomerante y tipo de árido, y obtener información acerca del grado de alteración.

Los morteros, que presentan características muy similares entre ellos, están constituidos por cales aéreas y conglomerante silíceo, provenientes de la región de Ticino. La figura 20 muestra los resultados de los análisis químicos. Sobre el mortero, muy descohesionado, no ha sido posible efectuar ensayos mecánicos. Aun así, la adherencia entre mortero y ladrillo parece buena, exceptuando los 20 mm más externos de la mampostería.

Los ladrillos son de dos tipos diferentes, reconocibles por la diferente coloración (pardo y rojo claro) y distinguibles por considerables diferencias en sus propiedades físicas y mecánicas. El primer tipo es menos poroso y absorbente (coeficiente de absorción por inmersión total igual a 13%) y más resistente (resistencia a compresión entre 28 y 33 N/mm<sup>2</sup> y módulo elástico entre 2050 y 5300 N/mm<sup>2</sup>). El segundo se caracteriza por un mayor coeficiente de absorción

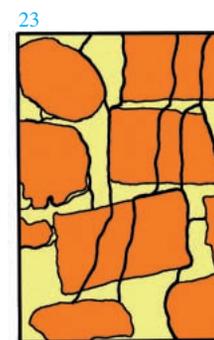
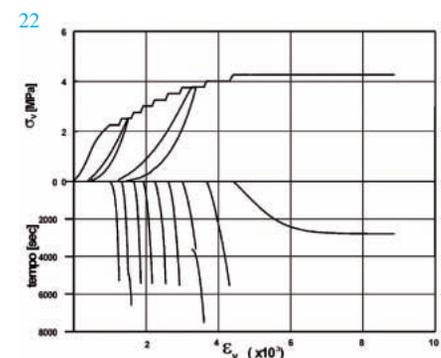
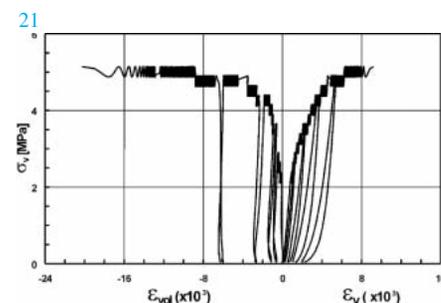
(18%), una menor resistencia (4 y 12 N/mm<sup>2</sup>) y un menor módulo elástico (500 y 1330 N/mm<sup>2</sup>). Desgraciadamente, el tipo pardo apenas se encuentra presente. La investigación mineralógico-petrográfica ha confirmado la diferencia entre ambos tipos, debida a una cocción a diferentes temperaturas. Los ladrillos rojos, de peor calidad, fueron producidos a una temperatura más baja (Binda et al., 1996), alrededor de los 800°C. Son los que se encuentran presentes en una mayor cantidad, y por tanto responsables de la debilidad de la mampostería.

### Ensayos de viscosidad y fatiga

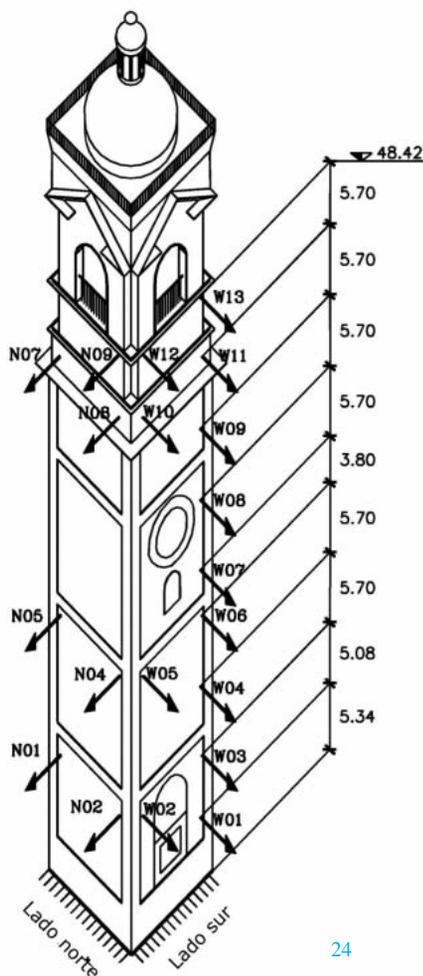
En publicaciones precedentes se presentaba el comportamiento a largo plazo de muros de mampostería sometidos a elevados esfuerzos de compresión, y se demostraba que tienen un comportamiento viscoso que puede llevar a la estructura al colapso en un determinado plazo (Anzani et al., 1995, Binda et al., 1997). Quedaba pendiente establecer si también la mampostería de la torre mostraba el mismo tipo de comportamiento, pero no existía la posibilidad de extraer material en cantidades suficientes para ensayarlo. Sin embargo, sí era posible extraer dos bloques de muro, de grandes dimensiones, de la cripta de la Catedral, con ocasión de la apertura de una puerta de acceso al Museo. Como se ha comentado, se considera que la cripta fue realizada en el mismo periodo que la torre, y por tanto con la misma clase de técnica constructiva. De los bloques de fábrica se obtuvieron probetas de dimensiones 200 x 200 x 500 mm que se sometieron, tras su identificación, a ensayos sónicos por transparencia, ensayos de compresión monoaxial de diferente tipo: (I) monótonas, con tal de obtener una primera indicación de valores de resistencia de la fábrica y (II) cíclicas, efectuadas en un segundo plazo con aplicaciones de ciclos de  $\pm 0.15$  N/mm<sup>2</sup> a 1 Hz en cada incremento de carga, (III) pruebas de compresión aplicando la carga en pasos sucesivos, manteniéndola

Tabla 1. Resultados de las pruebas con gatos planos

Nº prueba	GATOS SIMPLE		GATOS DOBLES	
	Estado de esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	Primera fisuración (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo elástico E <sub>g</sub> (20-50%) (N/mm <sup>2</sup> )	Δ <sub>h</sub> /Δ <sub>c</sub> (20-50%)
TMJ1,2	0,98	1,87	985	0,13
TMJ6,7	1,67	2,62	1380	0,19
TMJ8,9	0,69	2,24	1372	0,07
TMJ10,11	0,48	2,24	465	0,20



- 18. Comparación entre los resultados obtenidos mediante ensayos con gatos simple y doble, efectuadas respectivamente a 5'4, 5'6, 13, 14, 31'5, 38 m
- 19. Histogramas de frecuencia de las velocidades sónicas relativas a las zonas 1 y 2
- 20. Análisis químico de los morteros
- 21. Ensayo a fatiga de una probeta de muro extraída de la cripta de la Catedral
- 22. Ensayo de viscosidad de una probeta de muro extraída de la cripta de la Catedral
- 23. Cuadro de fisuración de una muestra al final del ensayo de viscosidad



24

24. Localización de las estaciones de toma de datos durante los ensayos dinámicos

25. Modos de vibración estimados mediante el modelo dinámico y comparación con las frecuencias teóricas experimentales

constante durante un intervalo de tiempo definido de alrededor de 1.5 horas. Visto que cada prueba se prolongaba por más de un día, las probetas se descargaban de noche por motivos de seguridad y se ponían de nuevo en carga el día sucesivo. La figura 21 muestra los valores de esfuerzo de deformación volumétrica obtenidos durante una prueba cíclica. Se puede notar que, durante la aplicación de los ciclos, se verifica una deformación de entidad creciente a medida que aumentan las cargas. Además, considerando la deformación volumétrica, se observa que la dilatación se verifica desde el inicio del ensayo.

En la figura 22, se refleja un diagrama de esfuerzos verticales y tiempo relativo en una prueba realizada con sucesivos incrementos de carga. La deformación viscosa se puede observar claramente a carga constante. Durante la aplicación del último nivel de cargas, aparece la viscosidad terciaria. La figura 23, muestra el cuadro de fisuración obtenido al final del ensayo: se nota la presencia difusa de fisuras verticales, indicio grave de deterioro del material, legible también por el incremento de las deformaciones volumétricas y dilataciones mostradas.

### Ensayos dinámicos y modelación numérica

En 1995 y 2001, se efectuaron dos series de ensayos dinámicos con excitación ambiental para verificar la respuesta de la torre ante acciones dinámicas y sus consecuentes efectos en términos de sollicitaciones. Las vibraciones fueron inducidas, entre otros factores, mediante el movimiento de las campanas o el viento. La red de toma de datos, constituida en la primera campaña por seis estaciones de medida y por veintiuna en la segunda (fig. 24), y la posterior fase de elaboración, han permitido recabar los parámetros modales de los registros, en términos de frecuencia, formas modales y amortiguación (Gentile et al, 2001 e 2004). Otros instrumentos, como por ejemplo los

transmisores colocados a caballo de las fisuras junto a la ventana en la base de la torre, han permitido verificar situaciones locales durante las pruebas. Los valores resultantes, junto a los parámetros obtenidos mediante los otros ensayos realizados in situ (gatos planos) y en laboratorio, y a la toma de datos del cuadro de fisuración, han permitido una calibración fiable del modelo estructural de la torre (fig. 25). La disponibilidad de un modelo numérico interpretativo fiable ha consentido un control directo de la estructura, proporcionando indicaciones acerca de la distribución de los esfuerzos y de las posibles diferencias de rigidez a lo largo de la altura de la torre, variaciones posiblemente vinculadas al deterioro del material y a las diferentes técnicas de construcción. Aparte, ha sido verificada la respuesta de la torre frente a las acciones del viento y variaciones de la temperatura. La acción del viento, en particular, provoca un aumento significativo del estado tensional en las zonas más sollicitadas.

### Control experimental de la eficacia de la técnica de reparación

Como se ha comentado previamente, la presencia de una fisuración extendida revela altos valores de deformaciones horizontales, señal de una situación de alarma. La intervención, por tanto, debería dirigirse fundamentalmente a confinar de modo general la mampostería y limitar la dilatación del material.

El restablecimiento de una continuidad de la mampostería mediante reconstrucciones locales o recomposiciones del aparejo es aplicable sólo de modo local. En casos específicos, debida la gran difusión del cuadro fisurativo (11 x 9.5 m) y su extensión en profundidad (en algunos casos más allá de los 45 cm sobre un total de 140 cm), no es aplicable la técnica de recomposición del aparejo o el uso exclusivo de tirantes o cadenas a nivel del forjado a fin de reducir las deformaciones laterales de la estructura.

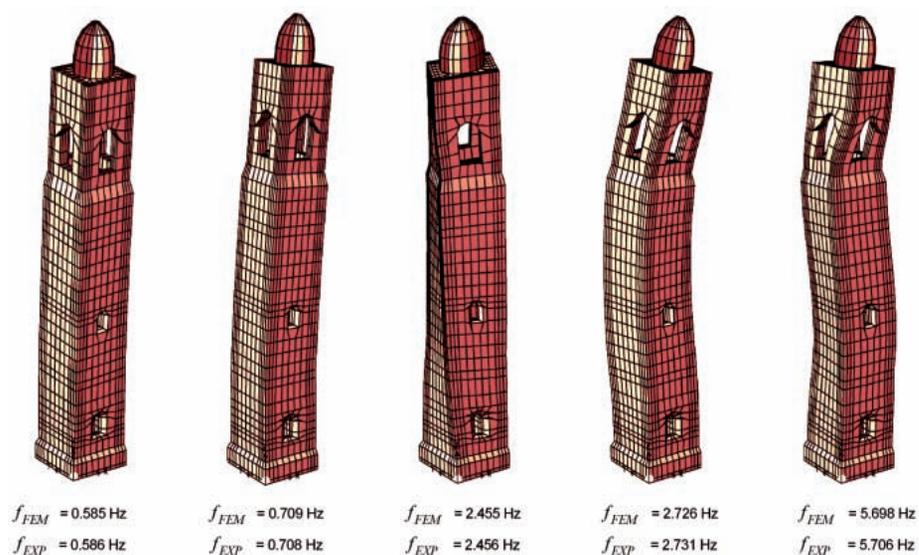
Entre las posibles técnicas a emplear en

la consolidación y reparación de la estructura de los muros, recientemente, se ha estudiado y propuesto el refuerzo de las juntas de mortero, especialmente, en los casos de deterioro por comportamiento viscoso a largo plazo. Esta técnica puede llevarse a cabo eliminando una capa superficial de mortero (hasta un máximo de aproximadamente 6-8 cm) y disponiendo en las juntas una o dos barras de pequeño diámetro. Para ello, parece más oportuno el uso de barras de acero inoxidable que las de FRP.

La intervención (fig. 26) puede ser llevada a cabo de modo sencillo y con dispositivos bastante comunes, limitados a una o ambas caras del muro, según la accesibilidad y las características de la estructura. En ambos casos, el uso de conectores transversales insertados en perforaciones posteriormente selladas, puede mejorar la acción de confinamiento de las barras (fig. 27), tanto en sentido longitudinal como transversal. Éstos pueden resultar especialmente importantes para muros compuestos de piedra con capas o rellenos interiores.

La técnica está principalmente enfocada a la reducción y contención del cuadro fisurativo, especialmente peligroso para la seguridad global de la estructura cuando afecta a los ladrillos o piedras en la mampostería. La eficacia de la técnica y la influencia de los diversos parámetros sobre el comportamiento mecánico de la mampostería han sido analizados a través de dos series de ensayos experimentales en el Politécnico de Milán, como fase experimental preliminar a la intervención en la torre (Binda et al. 2001).

Concretamente, los ensayos iban dirigidos a la evaluación: (a) del comportamiento por compresión monótona de muros de mampostería reparados a una sola cara, tras un previo deterioro siempre por compresión, y (b) del comportamiento de muros reforzados en ambas caras (pero sin deterioro previo) frente a acciones de compresión prolongadas en el tiempo, gracias a las pruebas de viscosi-



25

dad acelerada, con modalidades análogas a las empleadas en las muestras de mampostería de la cripta.

El programa experimental para la segunda serie se resume en la Tabla 2. Para esta segunda serie de pruebas, dos muros no reforzados y otros tantos reforzados se sometieron a ensayos de viscosidad. En la figura 30 se ilustra la geometría y la localización el esfuerzo.

### Valoración de los resultados

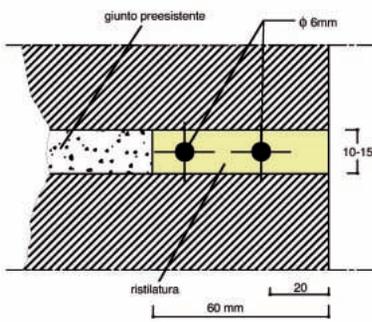
En la primera serie de ensayos, los muros reparados alcanzaron tan solo alrededor de un 50% de la resistencia original, y presentaron una rigidez variable de entre el 43% para caras reforzadas y el 29% para aquellas que no lo estaban, con respecto a la rigidez original. En cualquier caso, es importante subrayar que los resultados principales han sido obtenidos en términos de reducción de dilatación y de la fisuración vertical de la mampostería. Concretamente, todas las paredes han mostrado un reducido cuadro de fisuración en las caras reparadas, mientras que en las no reparadas se registra un aumento ya sea en el número que en la profundidad de las fisuras.

En la segunda serie de ensayos, el esquema de carga ha permitido reprodu-

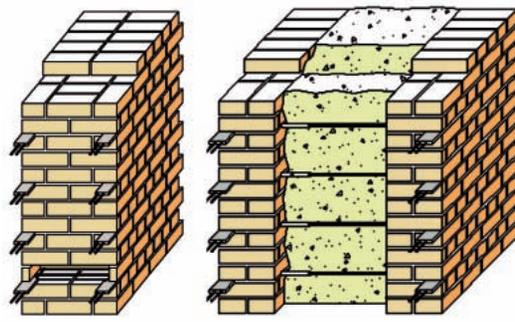
cir un cuadro de fisuración muy similar a aquel observable en las estructuras reales. En general, los resultados de las pruebas, han demostrado una reducción significativa de las deformaciones horizontales (37-39%) (fig. 31) y una consiguiente menor difusión de las fisuras (fig. 29). Esta particularidad se considera crucial para calificar la eficacia de la técnica de reparación, impidiendo el desarrollo del mecanismo de deterioro identificado. A pesar de todo, la presencia del refuerzo no influencia de modo evidente la resistencia máxima de la pared.

### Conclusiones

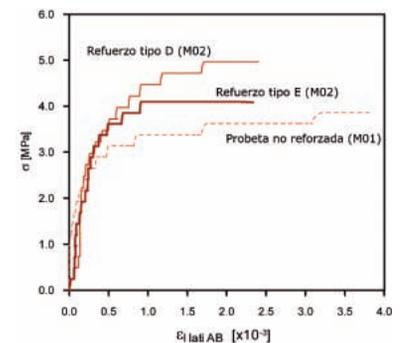
Las investigaciones conducidas tras el derrumbe de la Torre Cívica de Pavía, permitieron comprender el comportamiento de los materiales y de las estructuras de la antigua torre. Las torres están sometidas, generalmente, a un considerable peso propio debido a su altura y a las técnicas constructivas empleadas. Consecuentemente, el grado de sollicitaciones en la base puede resultar bastante cercano a los valores de resistencia límite del material, con incremento de deformaciones viscosas a carga constante. Con el tiempo, dicho comportamiento induce



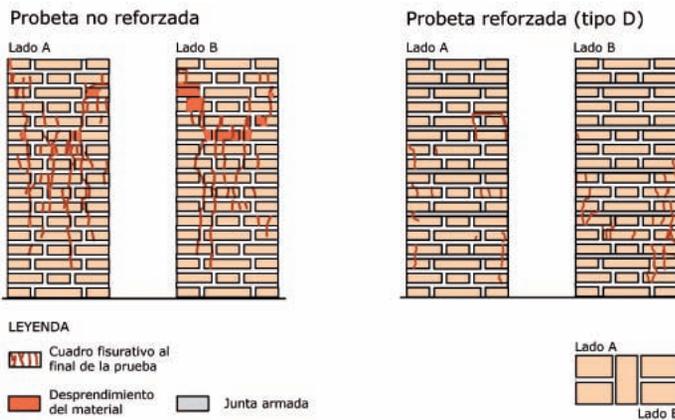
26



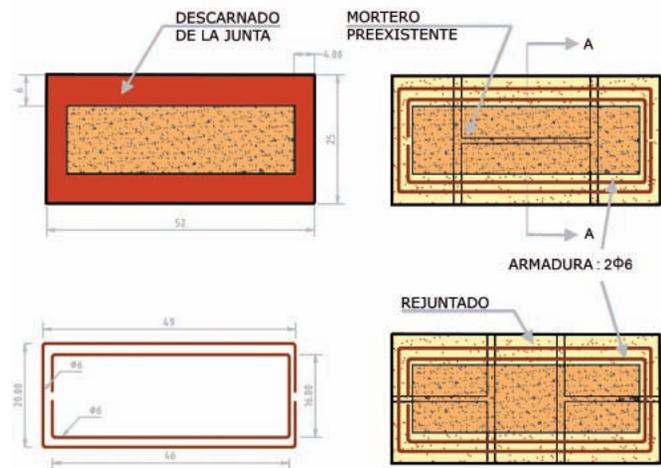
27



28



29



30

26. Esquema de la técnica de refuerzo con juntas armadas

27. Inserción de barras en las juntas horizontales previamente vaciadas y posteriormente retacadas con materiales de características apropiadas. Las barras contienen las deformaciones horizontales parcialmente, limitando un posterior desarrollo de las fisuras

28. Comparación entre las deformaciones transversales medidas en las caras de mayor dimensión de las probetas

29. Ejemplos de cuadros de fisuración tomados al final del ensayo de probetas reforzadas y no reforzadas

30. Geometría y localización del refuerzo denominado "E"

31. Diagramas de esfuerzo-deformación en función del tiempo: a) probetas no reforzadas, b), c) refuerzos tipo D y E

un deterioro continuo del material y puede conducir al colapso de la torre. De forma análoga, la acción de cargas cíclicas puede provocar un incremento repentino de las deformaciones locales. El efecto combinado de estos factores puede acercar al edificio a una situación crítica. Si se debe conservar su condición estática, se ha de tener en debida consideración cada fuente posible de variación de esfuerzos, comprendidas eventuales concentraciones de esfuerzo debidas a discontinuidades geométricas o efectos consecuencia de la acción del viento, sonido de las campanas o variaciones cotidianas de temperatura o provocadas por el cambio de estación. A juzgar por los resultados obtenidos, se deduce que ya sólo por

su propio peso, la torre se encontraba en una condición de riesgo a destacar. Como conclusión de la fase de diagnóstico, y sobre la base de los parámetros relevantes del específico mecanismo de deterioro, se ha controlado experimentalmente la eficacia de la técnica de intervención propuesta en fase de intervención. Las pruebas, de hecho, han demostrado la posibilidad de contención de las deformaciones transversales, particularmente peligrosas para la seguridad global de la estructura. El objetivo se satisface mediante la presencia de barras, que contribuyen a la reducción de la dilatación de los muros y, por consiguiente, a la contención de la propagación de las fisuras.

## Agradecimientos

La investigación ha sido apoyada por el CNR-GNDT, MURST y la parroquia de Monza. Los autores desean agradecer a los Srs. P. Perolari, G. Ghilardi, M. Cucchi, M. Antico, C. Arcadi y M. Iscandri por su ayuda y colaboración en el trabajo experimental tanto in situ como en laboratorio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Archivio Capitolare di Monza, Sezione Cronache 2, 1805-1838

- Archivio di Stato di Milano, Fondo Religione, Cartella 2566

- Biblioteca Capitolare di Monza, Burocco-Sirtori, Annali di Monza, Vol.III, 1770-1850

- Biblioteca Capitolare di Monza, Burocco-Sirtori, Annali di Monza, Vol.IV, 1770-1850

- Anzani A, Binda L, Mirabella Roberti G: A Numerical Interpretation of Long-term Behaviour of Masonry Materials under Persistent Loads. 4th STREMA, Architectural Studies, Materials & Analysis, Computational Mechanics Publications, Vol. 1, 1995; 179-186

- Astori B, Bezoari G, Guzzetti F: Analogue and Digital Methods in Architectural Photogrammetry. XVII Int. Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission V, Washington 1992

- Binda L, Gatti G, Mangano G et al.: The Collapse of the Civic Tower of Pavia: a Survey of the Materials and Structure. *Masonry International* 1992;11-20

- Binda L, Mirabella Roberti G, Poggi C: Il Campanile del Duomo di Monza: valutazione delle condizioni statiche. *Editoriale L'Edilizia* 1996; 7/8: 44-53

- Binda L, Poggi C: Ricerca volta a stabilire le condizioni statiche del Campanile del Duomo di Monza mediante analisi chimiche, fisiche e meccaniche dei materiali. D.I.S. Politecnico di Milano; 1996

- Binda L, Poggi C: Ricerca volta a determinare il comportamento meccanico della muratura del Campanile del Duomo di Monza mediante procedure sperimentali e simulazioni numeriche. D.I.S. Politecnico di Milano; 1997

- Binda L, Anzani A, Mirabella Roberti G: The failure of ancient Towers: problems for their safety assessment. *Int. Conf. on Composite Construction - Conventional and Innovative*, Zurich, 1997; 699-704

- Binda L., Tiraboschi C., Flat-jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures, 8th Int. Conf. Structural Faults and Repair, CD-ROM, 1999

- L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries, *Construction and Building Materials*, ed. Elsevier-Norwich, Vol. 14, N. 4, June 2000, pp. 199-233

- L. Binda, A. Saisi, C. Tiraboschi, Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures, *Non Destructive Testing and Evaluation International*, ed. Elsevier Science Ltd., Vol. 34, N. 2, January 2001, pp. 123-138

- L. Binda, A. Saisi, S. Messina, S. Tringali, Mechanical damage due to long term behaviour of multiple leaf pillars in Sicilian Churches, III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, University of Minho, Guimarães (Portugal), 7th-9th November 2001, pp. 707-718

- L. Binda, C. Modena, A. Saisi, R. Tongini Folli, M.R. Valluzzi, Bed joints structural repointing of historic masonry structures, 9th Canadian Masonry Symposium Spanning the Centuries with Masonry, Fredericton (Canada), 4-6 June 2001, CD-ROM

- L. Binda, A. Anzani, A. Saisi, G. Mirabella Roberti, Structural Integrity in Historic Structures, in AA.VV, *Comprehensive Structural Integrity. Fracture of Materials from nano to macro*, Volume I: Structural Integrity Assessment - Example and Case Studies, Editors I. Milne, R.O. Ritchie, B. Karihaloo, Pergamon Elsevier Science, Oxford, Vol. 1, Cap. 1.02, 2003, pp. 25-47

- Gantert Engineering Studio: Technical opinion about the collapse of the Bell Tower of St. Maria Magdalena in Goch (Germany). November 1993

- C. Gentile, A. Saisi, L. Binda, Dynamic investigation of a historic masonry Bell Tower, 6th International Masonry Conference, London, 4th-6th November 2002, pp. 192-199

- Gentile C., Saisi, A., Dynamic-based F.E. model updating to evaluate damage in masonry towers, IV International Seminar Structural Analysis of Historical Constructions (P. Laurenço, C. Modena, P. Roca Eds.), Padova 10th -12th November 2004, Balkema, Vol. 1, pp. 439-449

- Iacono B: Noto, la Cattedrale: cenni storici ed architettonici dalle origini al crollo. In *Noto...mia! la Cattedrale - Architettura ed Urbanistica del Centro Storico- 1976-1995*, Sicula Editrice netum, Noto (Siracusa), 1996

- Lenczner D, Warren DJN: In situ measurement of Long-term Movements in a Brick Masonry Tower Block. *Proceedings of the 6th IBMaC*, Rome, 1982; 1467-1477

- Scotti A: L'età dei Borromei in Monza. In *Il Duomo nella storia e nell'arte*, Electa, Milano, 1989

31

Tabla 2. Programa Experimental

Serie	Nombre de la muestra	Tipo de prueba	Intervención	Geometría del refuerzo
2 (refuerzo a dos caras)	MU6H04	monótona	-	-
	M04	monótona	reparado	D
	M05	monótona	reparado	E
	M01	viscosidad	-	-
	M03	viscosidad	-	-
	M02	viscosidad	reparado	E
	M06	viscosidad	reparado	D

