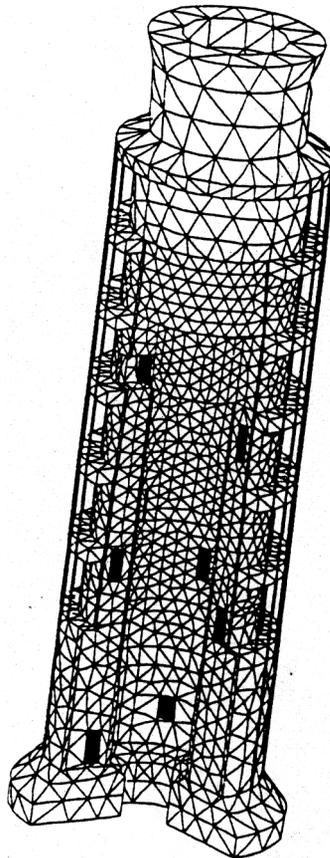


## La restauración de edificios históricos de obra de fábrica

Binda, L.\*



Modelización de la torre de Pisa: modelo numérico, FEM. sub-estructura del sistema columnario

La restauración de edificios históricos de obra de fábrica, fue, hasta los años setenta, algo reservado para unos pocos expertos. El deterioro de este tipo de construcciones, debido a los últimos sismos, a la carencia de mantenimiento y a su propia antigüedad, ha involucrado en la restauración a un gran número de arquitectos e ingenieros; como consecuencia, se plantea una gran necesidad de guías y códigos para la realización de ensayos, la aplicación de técnicas para la conservación, así como la práctica de la enseñanza. A continuación se presentan las principales recomendaciones, los códigos existentes, el desarrollo y las necesidades de futuro.

*Restoration of heritage masonry buildings.* Restoration of heritage masonry buildings was in the past, until the sixties, a job for a few experts. Damage to historic buildings due to earthquakes and decay due to lack of maintenance and ageing have now implicated a large number of architects and engineers in restoration design; as a consequence there is a great need for guidelines and codes for testing and application of various techniques for preservation as well as for training and teaching. On the following pages, the main recommendations, existing codes, development and future necessities are presented.

\*L. Binda es profesora del Departamento de Ingeniería Estructural del Politécnico de Milán. Este artículo fue presentado en el "Seventh Canadian Masonry Symposium"

Se han sostenido (y se sostienen) largas discusiones, entre historiadores, arqueólogos, arquitectos y científicos sobre la filosofía de restauración. La Carta de Venecia, (1964), se considera, actualmente, como un hito para la conservación, aunque el desarrollo y mejora del conocimiento produzca una continua renovación y actualización del tema.

Al margen de cualquier discusión cultural o interés teórico particular, lo realmente importante es el respeto que se debe a todos los edificios históricos, independientemente de si son monumentos realmente importantes o residencias pobres y pequeñas de los centros históricos. Por lo tanto, durante los últimos años la palabra “conservación” se ha venido usado con mayor frecuencia. Esto se debe al hecho que los edificios históricos, no sólo pueden ser rehabilitados como una especie de contenedor para nuevas funciones y/o adaptados a cargas de uso pesadas, sino que deben ser conservados y respetados, aun cuando se encuentren dificultades para su utilización. Además, la definición de “seguridad” y “los parámetros de seguridad” para las estructuras de mampostería existentes, especialmente, cuando están situadas en áreas sísmicas, está siendo, cada vez más, cuidadosamente revisadas por investigadores e ingenieros estructurales, y por consiguiente, la filosofía del refuerzo estructural y la consolidación ha cambiado durante los últimos años.

A fin de desarrollar y proponer un diseño para la conservación, se necesita un conocimiento profundo sobre el grado de deterioro de los edificios; esta meta puede lograrse, únicamente, aplicando una metodología correcta de investigación in situ y en laboratorio, con el objeto de medir los valores de los parámetros más importantes, necesarios para la introducción de datos del análisis estructural. Los resultados de la inspección y del análisis estructural deberían llevar a un diagnóstico del estado de la estructura y de los materiales; sólo entonces se podrá proponer un proyecto para la restauración del edificio.

Teniendo en cuenta el valor histórico y arquitectónico del edificio, el estado de conservación o de daños, las cargas accidentales finales (sísmicas, asientos del terreno, etc.), el futuro uso y, por supuesto, todos los problemas de seguridad, se podrán elegir las técnicas más apropiadas de intervención (la reparación, refuerzo, consolidación, sustitución de elementos deteriorados).

A modo de resumen, podemos afirmar que las bases fundamentales para un adecuado proyecto de restauración de las estructuras de mampostería deberían ser: la investigación de la documentación histórica e investigación visual preliminar; el estudio geométrico, monitorización y END (Ensayos No Destructivos), análisis de laboratorio y comprobación de muestras extraídas de los elementos estructurales para la medida de parámetros físicos, químicos y mecánicos; la evaluación del deterioro y sus causas (carencia de mantenimiento, asientos del terreno, deterioro de materiales y de elementos estructurales, etc.); el análisis estructural; el diagnóstico; y la elección de la técnica apropiada para la intervención, en base a los ensayos de laboratorio. Procedería efectuar un control continuo del edificio, durante, y después, de la intervención, a fin de detectar cambios inesperados en el estado tensional y de deformación, y para comprobar la efectividad de la técnica aplicada (control de los resultados de inyecciones o de refuerzos, mediante pruebas no destructivas, o ligeramente destructivas).

Teniendo en cuenta la complejidad de las estructuras y de los materiales, particularmente en el caso de obras de fábrica, la no homogeneidad del ladrillo y de la mampostería, y los efectos sinérgicos de las diferentes causas del deterioro, es evidente que el proyecto de restauración debería ser el resultado de una investigación multidisciplinar. Desafortunadamente, el diseñador no puede contar siempre con un equipo de expertos; por lo tanto, arquitectos e ingenieros exigen unos códigos de práctica a fin de tener, al menos, unas directrices a las



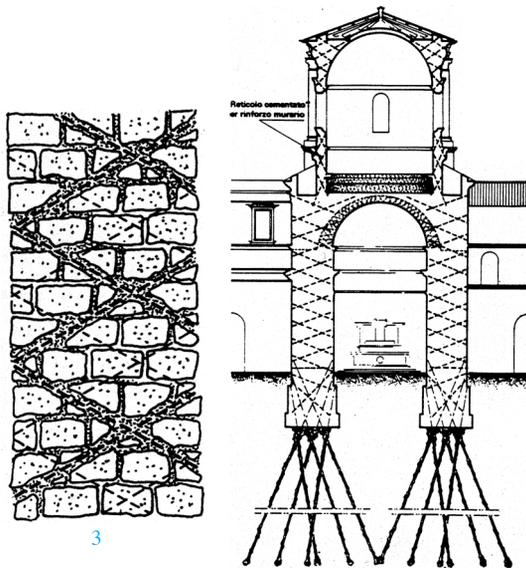
1



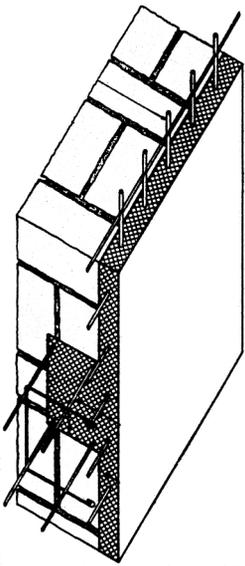
2

1. Efecto de falta de mantenimiento en una fábrica de ladrillo

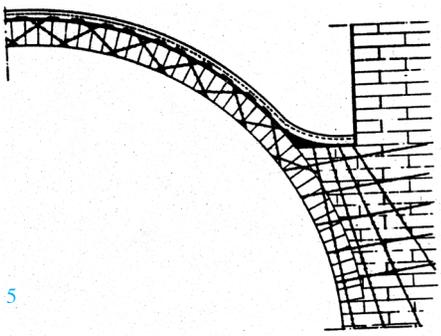
2. Iglesia de Santa María di Fossale (Friuli), dañada por el terremoto de 1976



3



4



5

3. Refuerzos en base a técnicas pesadas: los cosidos de refuerzo.

4. Ejemplo de refuerzos mediante revestimientos en base a la inserción de vigas de hormigón.

5. Refuerzo de una bóveda de ladrillo

que atenerse para efectuar sus operaciones. Esta exigencia no ha sido satisfecha aún en muchos países, simplemente, porque no se han establecido tales pautas para la restauración. A nivel internacional, se ha publicado algún trabajo, pero se necesitan muchos más para lograr un consenso sobre las directrices o normas.

A nivel nacional, sólo en algunos países se han alcanzado mayores cotas (Estados Unidos, Italia, Grecia, Eslovenia) donde los efectos dramáticos de los terremotos han convencido a investigadores, expertos y políticos de la necesidad de contar con directrices para la conservación y la protección de edificios históricos.

La pequeña comunidad científica que comenzó la investigación sobre la restauración de obras de fábrica, ha adquirido mayor importancia en la actualidad y ha mejorado el conocimiento de la historia de la tecnología, propiedades de los materiales, comportamiento de estructuras, ensayos no destructivos y destructivos y técnicas para la reparación y refuerzo.

No obstante, todavía existen vacíos entre los resultados de las experimentos y de los modelos matemáticos, entre los datos de END y la elaboración para su utilidad práctica, y entre las propuestas para el uso de nuevos materiales y conocimiento para su aplicación práctica.

### LOS EDIFICIOS DESCUIDADOS: FALTA DE MANTENIMIENTO Y DETERIORO DE LAS OBRAS DE FÁBRICA

Cuando, a principios del siglo XX, se descubrió el hormigón armado como un material maravilloso para construir estructuras duraderas y fuertes, la mampostería quedó olvidada prácticamente en la mayoría de naciones como material estructural.

La mampostería quedaría reservada para muros de carga o para cerramiento de los edificios de moda o lujosos en países ricos. En los países menos desarrollados se utilizaba como el material único para el cobijo. En ese caso, frecuentemente, los materiales eran pobres (adobe, tapial, etc.). Inclu-

so, en los países en vías de desarrollo donde el cemento era difícil de conseguir, el hormigón llegó a ser el material más usado como signo del desarrollo del país.

Al comenzar los años treinta, la investigación sobre los materiales para obras de fábrica se abandonó, prácticamente, en la mayoría de los países. Sólo se producen algunas excepciones referidas a modelización e investigación experimental sobre los arcos de piedra (Pippard, 1936; Kooharian, 1953; Heyman, 1966). En los años cuarenta y cincuenta se desarrolló una importante investigación en Estados Unidos sobre la adherencia entre morteros y ladrillos (Voss, 1933; Anderegg, 1942). También se realizaron trabajos con una cierta continuidad en algunos países como en Reino Unido, Alemania y Estados Unidos, mayoritariamente, relacionados con el uso de obras de fábrica de nueva construcción (Johnson, 1967; Gross et al., 1969; Sahlin, 1971; Lenczner, 1972).

Si las nuevas mamposterías atrajeron escasa atención, los edificios existentes tampoco tuvieron mejor suerte. Unos pocos expertos en la restauración se dedicaron al estudio de los edificios históricos más importantes. Esta situación continuaría tras la segunda guerra mundial. De hecho, después de la reconstrucción de los centros históricos fuertemente bombardeados, las áreas históricas de las ciudades se dejaron, en la mayoría de los países europeos, a la iniciativa voluntaria de las autoridades locales que, a veces, preferían demoler las antiguas residencias y edificios derruidos para construir sobre ellos nuevos centros comerciales e industriales.

En muchos países, los centros históricos, en progresivo deterioro, o seriamente dañados por la carencia de mantenimiento, eran abandonados al segmento más pobre de la población lo cual redundaba en un mayor ajamiento. También las construcciones más importantes, como iglesias y palacios, quedaron abandonados por largo tiempo, sin el adecuado mantenimiento, bajo la creciente agresividad medioambiental provocada por la contaminación

del agua y del aire (fig. 1). El deterioro aumentó lenta, pero profundamente, hasta que los trágicos efectos de los terremotos más intensos (Skopje, Friuli, Irpinia) destruyeron no sólo la obra de fábrica, sino también iglesias y torres (fig. 2). Tales debacles podrían haberse evitado, por lo menos parcialmente, si se hubiese realizado el mantenimiento y la consolidación de las estructuras más viejas. Estos sucesos obligaron, finalmente, a los investigadores y profesionales a involucrarse en el comportamiento estructural y físico de la mampostería. Las primeras reacciones fueron, por supuesto, en contra de las obras de fábrica como elemento resistente sometido a cargas dinámicas horizontales; ninguna ductilidad, bajas tensiones de tracción y ninguna continuidad eran los puntos más débiles. Además, algunos ingenieros estructurales se convencieron que, probablemente, se había empleado un diseño pobre debido a que, antiguamente, no se conocían las leyes que gobiernan la resistencia de los materiales y el comportamiento de éstos; si los coeficientes de seguridad fueran calculados adoptando las reglas modernas, se deberían obtener valores muy bajos en los edificios con obra de fábrica.

La urgencia por reconstruir y proteger edificios vulnerables obligaba a encontrar soluciones. Durante los años setenta y ochenta, al considerarse la mampostería como un material pobre que podría quedar en muy mal estado tras cualquier suceso dinámico, los ingenieros procedieron a colocar en la estructuras de mampostería elementos de refuerzo pesados y de hormigón armado para que pudiesen responder a las cargas sísmicas (figs. 3, 4 y 5).

Después de algunas experiencias, los investigadores llegaron a ser conscientes de que este camino no era el más razonable y seguro; las intervenciones pesadas se realizaron sin mucho respeto para con la arquitectura y estructuras existentes (en algunos casos, sólo las fachadas se habían preservado y aún ahora se mantienen). También se aplicaron criterios de ingenie-

ría muy duros o, incluso, modelizaciones equivocadas. Se requerían nuevos conocimientos, pero los procedimientos de estudio y los modelos analíticos para diagnósticos y técnicas de reparación apropiadas para los edificios existentes no se actualizaban, mientras los códigos y las normas para pruebas estaban disponibles, aunque, solamente, orientadas hacia las nuevas obras de fábrica.

## DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES.

Al principio, sólo unos pocos pioneros trabajaban seriamente en la investigación de los materiales y estructuras de mampostería (Hilsdorf, 1969; Nuss et al., 1978; Mayos & Clough, 1975). No obstante, en pocos años el desarrollo fue rápido. El IBMaC era inaugurado en 1967 en Estados Unidos, Austin, Tejas, seguido por el NAMC y el Canadian Masonry Symposium en los setenta. Se efectuaron ediciones especiales como el Masonry International Masonry en 1987 en el reino Unido, el diario TMS en 1985 en Estados Unidos, seguidos por otros coloquios y cursillos nacionales e internacionales.

No obstante, la restauración era todavía un tema para arquitectos e historiadores, mientras que sólo un número restringido de científicos, principalmente químicos, físicos y geólogos, se preocupaban del deterioro del ladrillo y de las fábricas de piedra, debido a la agresión del ambiente. El primer coloquio internacional sobre el deterioro de la piedra tuvo lugar en Bolonia (Italia) en 1973.

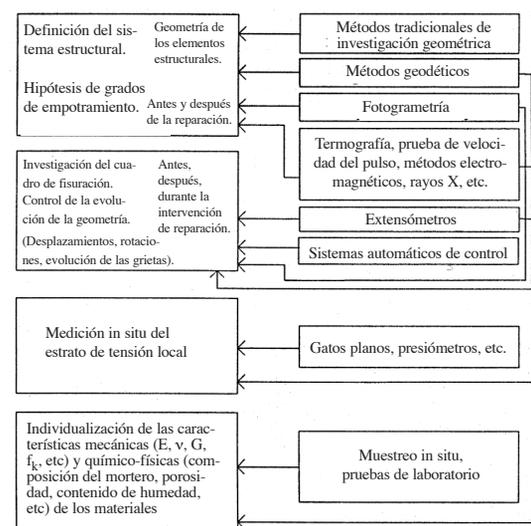
El terremoto de Skopje seguido por el de Friuli y el de Irpinia ofrecieron, trágicamente, la oportunidad a los investigadores europeos y estadounidenses para trabajar en común en las estructuras de mampostería existentes. En 1983, año en que se realizó el Simposio del IABSE que tuvo lugar en Venecia, fue la fecha inicial de una larga colaboración entre investigadores italianos y estadounidenses. La organización de dos centros colaboradores Italia-EEUU en Italia (1986) y Estados Unidos



6

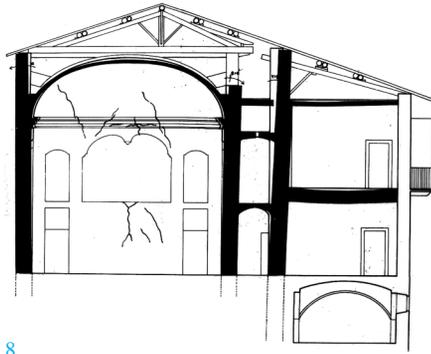
6. Fallo de una superficie de terracota conteniendo sales alcalinas.

7. Información requerida y las correspondientes técnicas de investigación

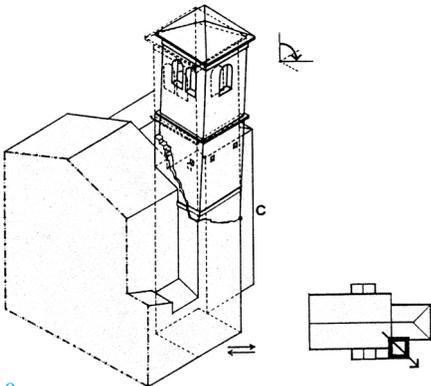
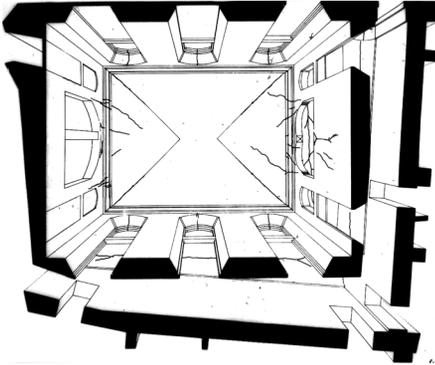


7

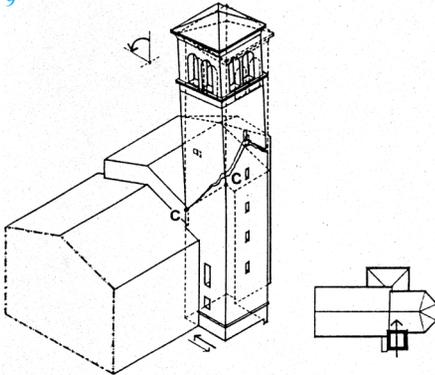
(1987), apoyados por el NCR y el NSF (NSF & CNR, 1986, 1987), fue seguida por la investigación común. Desde entonces, un grupo de investigadores americanos de Boulder, Atkinson, Noland & Ass, B. Shing, B. Amadei de la Universidad de Boulder y otros grupos de Italia, L. Binda, G. Baronio (DIS, Politécnico, Milán), P.P. Rossi (ISMES, Bergamo), C. Modena (Universidad de Padua) y Eslovenia, M. Tomazevic (Ljubljana) trabajan sobre END, la modelización numérica, la reparación y la consolidación de las estructuras de mampostería. La investigación común fue apoyada por los siguientes organismos: CNR, NSF, OTAN. Otras colaboraciones se establecieron también entre la Universidad de Pavía (G. Macchi, M. Calvi) y de Roma (C. Gavarini, A. Giuffrè) y la Universidad de Berkeley (V.V. Bertero), San Diego (M.J.N. Priestley).



8



9



8. Villa Crivelli, Inverigo, Italia: cuadro fisurativo del teatro y efectos geométricos debidos al empuje de la bóveda

9. Mecanismo de colapso que se ha supuesto en base a la interpretación de los fallos detectados

Se promocionó una mejora no sólo sobre el estudio de terremotos sino también sobre: la estabilidad de materiales de mamposterías (Binda & Baronio, 1985; Binda & Baronio, 1987), los END de mamposterías existentes (Berra et al., 1992; Schuller et al., 1994), la detección in situ del estado tensional y de deformación de la mampostería (Atkinson et al., 1995), y los procedimientos para probar la eficacia de técnicas de inyección (Schuller et al., 1994; Binda et al., 1994). Se organizaron dos cursillos, el primero en Milán por L. Binda (CNR-GNDT, 1992) y el segundo en Trento por C. Modena (Prov. di Trento, A.N.I.A.C. C. A.P., ITEA, 1993) sobre el último tema.

En Orvieto se organizó un tercer grupo de trabajo Italia/EEUU, auspiciado por L. Binda, N. Avramidou y M. Comerio, y apoyado por NSF y CNR (National Science Foundation, Washington D.C., C.N.R., Roma, 1992). Se centró en el aprendizaje de la práctica, en concreto, una revisión de la experiencia arquitectónica de construcción y diseño después de un terremoto.

También se ha establecido una buena relación entre los grupos que investigan sobre consolidación y restauración de edificios existentes, mediante dos comités RILEM: 76LUM presidido por el Prof. Hendry que se cerró en 1990 y 127MS todavía en proceso, presidido por L. Binda. El primero trabajó, principalmente, con pruebas mecánicas en mamposterías y en materiales de mampostería, mientras que el segundo se dedicó al estudio de su durabilidad, END y pruebas mecánicas in situ. Mediante estos dos comités, se establecieron relaciones entre organizaciones e investigadores de Australia (Page, Lawrence), Canadá (Maurerbrecher), Estados Unidos (Noland, Borchelt, Grimm), Italia (Binda, Baronio, Modena, ISMES), Suecia (Bekker, TNO), Reino Unido (De Vekey, Forde, Hendry, Oeste), Alemania (Stöckl, Schubert).

Por supuesto, también en Europa se entablaron contactos entre los profesionales que, entretanto, trabajaban en otras organizaciones activas en el campo de la investi-

gación para la restauración, p. ej. la Universidad de Karlsruhe (F. Wenzel, H. Hilsdorf), la Universidad de Bath (D.A. Cook), la Universidad de Leuven (D. Van Gemert, K. Van Balen), la Universidad de Padua, Milán, Roma y Nápoles, el Instituto para la Investigación en Materiales y Estructuras, Ljubljana (M. Tomazevic), LCPC en París, TNO, Suecia, BAM, Alemania, BRE, Reino Unido y la Universidad de Atenas. En los últimos años, se ha producido una proliferación de acciones conjuntas en Europa, debido a la subvención de proyectos de investigación en el ámbito de iniciativas de la CEE, como el Environment, Bríte Euram, Human Capital and Mobility Networks, Eurocare y Eurolime.

Aun cuando las iniciativas mencionadas (entre otras) también tienen lugar en otros países de África (Egipto, Marruecos), Asia (India, China), o Sudamérica (Perú, Argentina, Brasil), y aportan una gran mejora a la experimentación con END, la modelización matemática y la consolidación, falta todavía conocimiento suficiente y es probable que las equivocaciones realizadas en el pasado puedan repetirse en el futuro.

## LA INVESTIGACIÓN, MODELADO Y DIAGNÓSTICO

Como se mencionó anteriormente, debido al condicionante de la seguridad, y a la carencia de conocimientos, se aplicaron algunas técnicas pesadas de intervención después de los daños ocasionadas por los terremotos. Nos referimos, en concreto, al uso de nuevos materiales de alta resistencia y nivel tecnológico, junto con la introducción de elementos de hormigón, refuerzos a base de inyecciones de cemento y revestimiento de paredes, arcos y bóvedas. La idea de esta elección radicaba en aportar continuidad a la mampostería y ductilidad y resistencia a la tracción, a fin de reparar y prevenir mayores daños. Las figuras 3, 4 y 5 muestran algunas de las técnicas adoptadas; sin conocer detalles adicionales, queda claro que la reparación estaba cambiando el comportamiento pre-

vio o inicial de la estructura. Además, en el caso de deterioro de la superficie exterior de los edificios históricos, que, frecuentemente, se atribuyó a la acción del aire y de la contaminación del agua (lluvia ácida, depósitos secos de contaminantes, sulfatación, etc.) sin tener en cuenta la carencia de mantenimiento, sólo se consideró el empleo de los tratamientos superficiales donde se detectó un deterioro profundo y no se podía sustituir ninguno de los elementos dañados. Las aplicaciones eran, generalmente, a base de nuevos materiales sintéticos orgánicos o inorgánicos (siliconas, resinas epoxy, silicatos etílicos, etc.) consolidantes o hidrofugantes aplicados a la superficie con diferentes técnicas. Estos tratamientos no resultaban siempre afortunados, debido a la impregnación del material, los cambios en su capacidad mecánica y rigidez de la superficie tratada, y la baja permeabilidad baja al vapor de agua y al agua (fig. 6). Los efectos negativos se incrementaron cuando la mampostería contenía humedad y sales.

Después de algunas experiencias negativas, se hizo evidente que la elección del tipo de intervención depende de un diagnóstico previo realizado mediante un estudio apropiado, para poder conocer cada detalle de la construcción (la historia de la estructura, su evolución al socaire de los siglos, la geometría, el cuadro fisurativo y movimientos en función del tiempo, los asentamientos del terreno y de la estructura, la distribución del deterioro). Después, deben de ser medidos experimentalmente los valores de los parámetros mecánicos, físicos y químicos, útiles para el modelado matemático del comportamiento de las estructuras. El estadio final del conocimiento del estado de la estructura debería ser el análisis estructural con modelos simples o complejos.

**La experimentación destructiva y no destructiva**

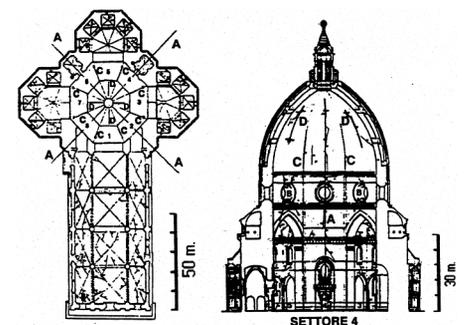
La prevención y la rehabilitación sólo pueden realizarse acertadamente si el diagnóstico del estado del daño del edificio se ha

efectuado cuidadosamente. Durante los últimos años, los recientes procedimientos y técnicas de experimentación destructiva y no destructiva usadas en otros campos (la medicina, el acero, el hormigón) se han introducido ampliamente. No obstante, es muy difícil aplicar los resultados de una investigación, aun cuando son positivos, cuando el proyectista no está suficientemente preparado; en ese caso, una gran cantidad de datos permanecen inutilizados y otros se emplean de manera incorrecta. Debe quedar claro que, aunque sea necesaria la existencia de expertos consultores en este campo, es el proyectista o un miembro del equipo proyectista quien deberá responsabilizarse del diagnóstico. Deberá realizar, efectivamente, las siguientes tareas: establecer la inspección in situ y la investigación de laboratorio; controlar la inspección constantemente; averiguar e interpretar los resultados; posibilitar técnicamente el uso de los resultados incluyendo su incorporación como una entrada de datos matemáticos; escoger modelos apropiados para el análisis estructural; y llegar al diagnóstico final del estudio completo. Se han implementado en los años recientes varios procedimientos de investigación; el fin es emplear siempre que sea posible las técnicas no destructivas disponibles. No obstante, en la actualidad existen pocas posibilidades para correlacionar los datos de ensayos END del comportamiento de la mampostería ( Grupo de trabajo END Conf., Boulder, CO, 1992). En la figura 7 se realiza un intento de describir las necesidades y los procedimientos correspondientes (Binda et al., 1994). Desafortunadamente, la mayoría de los procedimientos sólo pueden ofrecer resultados cualitativos. Por tanto al proyectista se le pide que interprete los resultados y los use, por lo menos, como valores comparativos entre partes diferentes de la mampostería (por ejemplo, calificar las diferentes partes de una estructura de mampostería o de muros, mediante el valor de velocidades sónicas u forma de las ondas, cuando se apliquen pruebas sónicas).

Las primeras informaciones a recoger serán el estudio geométrico, la pérdida de la verticalidad u horizontalidad en los elementos de carga y el tipo y distribución de fisuras y grietas del cuadro fisurativo. El tipo de grietas y su geometría puede ayudar a comprender las causas del daño (fig. 8 a,b). Su dirección, contribuye a interpretar el mecanismo de desplome (fig. 9 a,b) (Doglioni et al., 1994).

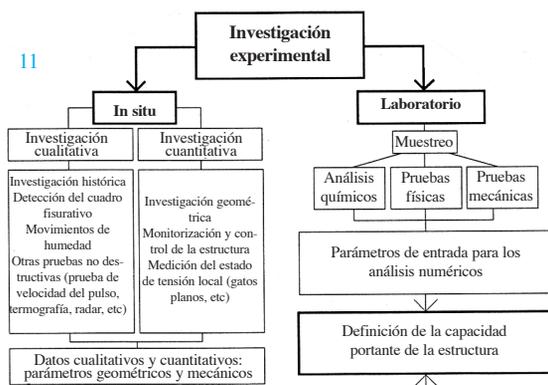
Cuando se detecte un cuadro fisurativo importante y se sospeche su crecimiento progresivo debido a los asentamientos del terreno, se deberán conocer las deformaciones y desplazamientos en función del tiempo. Puede instalarse un sistema de monitorización sobre la estructura a fin de seguir esta evolución; este tipo de estudio se aplica frecuentemente en construcciones impor-

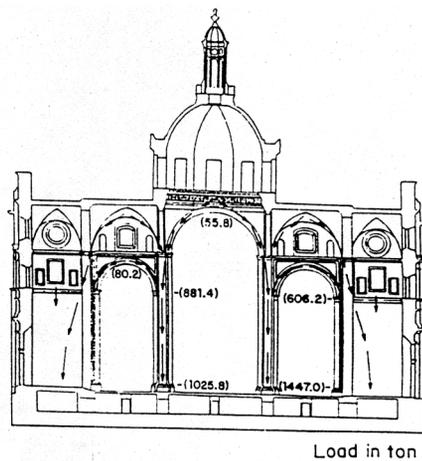
10



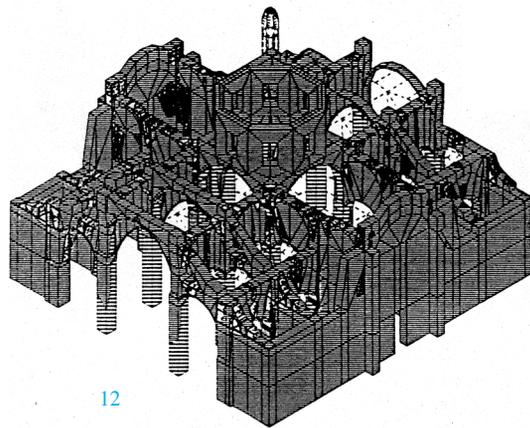
10. Santa María del Fiore, Florencia, Italia. posición de las grietas principales de la cúpula, denominadas A, B, C y D; planta. posición de las grietas principales de la cúpula, denominadas A, B, C y D; sección. curvas de desplazamiento en el tiempo, obtenidas como una correlación de datos procedentes de la monitorización.

11. Objetivo de las inspecciones experimentales para el análisis estructural





Load in ton

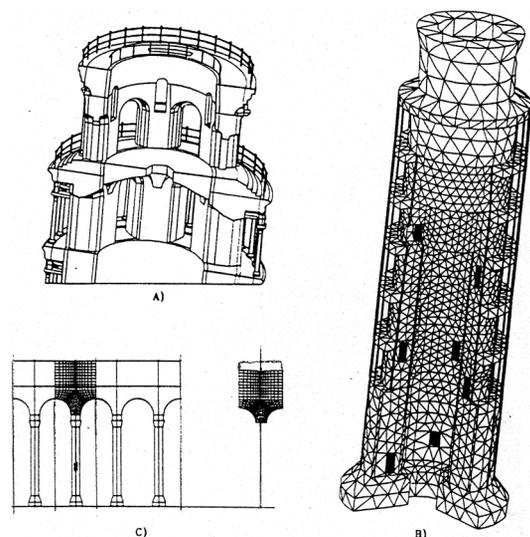


12

12. Catedral de Méjico, parte central. Estado de cargas bajo la cúpula central. Estado tensional debido a la gravedad, de un análisis FE

13. Modelización de la torre de Pisa: modelo numérico, FEM. sub-estructura del sistema columnario

13



A)

C)

B)

tantes, como los campanarios (torres de Pavía y de Pisa) o las catedrales. El equipo puede permanecer en el lugar durante años antes de que se tome una decisión para proceder a su reparación. La figura 10 muestra la evolución en cuatro años de algunas de las rupturas principales de la cúpula de la Catedral de Santa María del Fiore en Florencia (fig. 10 a,b) (Chiarugi et al., 1993) (Véase LOGGIA n° 2).

El estado tensional de una estructura no puede describirse experimentalmente como el estado de deformación. No obstante, los métodos con base en la relajación tensional, como los ensayos con gatos planos, las pruebas de sacudidas o la de dilatómetro en perforaciones de sondeo, pueden ser útiles para medir localmente el estado tensional o la deformabilidad de la mampostería, aportando no solamente un valor numérico en un punto o localización, sino también la posibilidad de calibrar los modelos matemáticos mediante medidas experimentales (Rossi, 1990).

Naturalmente, los resultados obtenidos in situ deben ser contrastados con pruebas de laboratorio sobre materiales llevados desde la obra. Las técnicas no destructivas de evaluación pueden aplicarse para varios propósitos: detectar elementos estructurales ocultos, como estructuras de piso, arcos y pilares; conocer la aptitud de la mampostería y de sus materiales; estimar el alcance de daños mecánicos en estructuras agrietadas; localizar la presencia de grietas y defectos; evaluar el contenido de humedad y su variación; y detectar el deterioro de la superficie. La correlación de datos de los END a propiedades mecánicas o físicas es muy difícil en el caso de la mampostería debido, principalmente, a su no homogeneidad. La monitorización extensométrica y dinámica, la termografía infrarroja, la investigación de radar, la velocidad de pulso sónico y ultrasónico representan los métodos más sofisticados aplicados a la investigación in situ, pero existen otros más simples como el martillo de rebote, los durómetros, la perforación o pruebas de arranque, etc.

## El análisis estructural para el diagnóstico

Los resultados de la investigación in situ y de laboratorio deberían usarse como entrada de datos de modelos matemáticos implementados para estudiar el comportamiento de estructuras de mampostería. La fig. 11 muestra cómo se pueden organizar los resultados.

El modelado de una estructura de mampostería es una tarea difícil, dado que esta técnica constructiva no respeta, aparentemente, ninguna hipótesis adoptada para otros materiales (isotropía, comportamiento elástico, homogeneidad).

En las décadas anteriores se habían realizado varios intentos para asumir modelos usados para otros materiales, pero los resultados eran muy pobres. Los modelos elásticos pueden ofrecer un indicio sobre el comportamiento mecánico de la estructura (fig. 12) pero no permiten seguir el comportamiento más allá del período elástico (Mell & Sánchez-Ramírez, 1993). Los modelos no lineales suelen resultar muy costosos y pesados de manejar. En el caso de tratarse de estructuras muy deterioradas y complejas, pueden llevarse a cabo varias verificaciones elásticas; esta metodología fue seguida para la torre inclinada de Pisa (fig. 13) bajo diferentes hipótesis de colaboración de las diversas partes de una estructura (Macchi et al., 1993). A veces, el cálculo tiene que realizarse mediante consideraciones de ingeniería y subdividir la estructura en subestructuras antes de llevar a cabo un análisis final (fig. 14 a, b y c) (Ronca & Castiglioni, 1992).

La fig. 15, presentada por la autora de este trabajo en 1983 (Binda et al., 1983) trata de aportar algunas directrices; desde entonces, han surgido nuevas propuestas sobre los métodos de cálculo para adaptarlos a la falta de continuidad, anisotropía, heterogeneidad, falta de comportamiento elástico y grandes desplazamientos, aspectos típicos de las estructuras de mampostería (Amadei et al., 1995; Jankulovski et al., 1995).

No obstante, la mayoría de los modelos tienen que ser verificados, todavía,

mediante la investigación. La experimentación sigue siendo imprescindible, a pesar de haberse logrado una gran mejora en los últimos cinco o seis de años.

### LA VERIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE REPARACIÓN Y DE REFUERZO

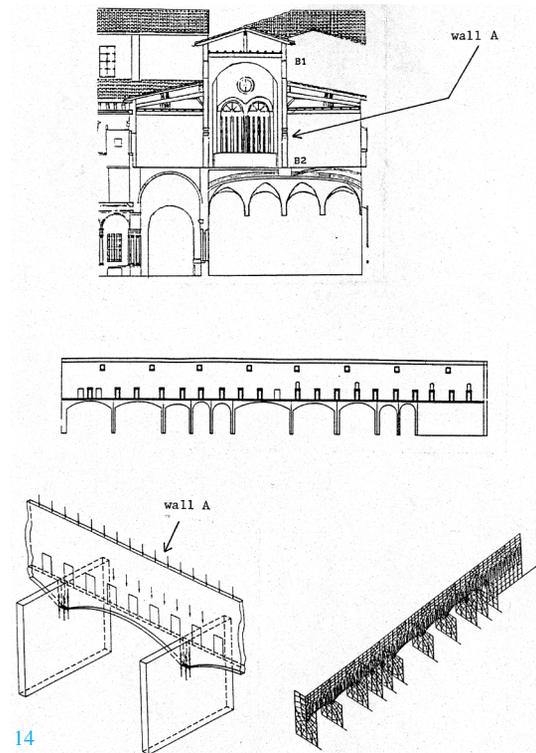
Como se mencionó anteriormente, las técnicas para la reparación y la protección de los edificios de mampostería, se adoptaron en muchos casos bajo la presión de la urgencia, caso de las áreas sísmicas, o de la idea fascinante de que los nuevos materiales avanzados serían más adecuados que los tradicionales para alcanzar un comportamiento mejor de los edificios históricos. Después de éxitos, pero también de fracasos, en la actualidad, se realiza un enfoque más cuidadoso en áreas sísmicas. Debe ser tenido en cuenta por todos, que la resistencia mecánica no es el único parámetro importante en la restauración; la rigidez, y las propiedades físicas (porosidad, movimientos de la humedad) y químicas (composición, reacción posible de los agregados de los morteros) son parámetros a ser tomados en consideración. Los factores de seguridad en edificios históricos deberían establecerse con un nuevo criterio basado en los límites del comportamiento exigibles. Se han aportado nuevas directivas, por ejemplo, en el Ministerio de Cultura italiano para la restauración de edificios monumentales en áreas sísmicas, donde se sugieren la reparación y la mejora, antes que los cambios radicales de la estructura, también sujetas a un diagnóstico y estudio previo que apunta al conocimiento profundo de la estructura existente (Corsanego et al., 1993).

La estabilidad de los tratamientos superficiales debería ser estudiada con mayor profundidad, no sólo considerando los componentes únicos (elementos de piedra, ladrillos), sino analizando sus efectos sobre el conjunto de albañilería. La investigación sobre la estabilidad de los tratamientos tendría que efectuarse a fin de lograr un mejor conocimiento (fig. 16). Por

supuesto, la investigación de laboratorio no puede ser abandonada a fin de desarrollar procedimientos de ensayos como el envejecimiento artificial (Amadei et al., 1995) para los materiales usados en tratamientos protectores y consolidantes. Cuando fuese necesario, se deberían utilizar modelos exteriores a escala natural para determinar la durabilidad de los edificios (fig. 17). Finalmente, habría que determinar los procedimientos para medir el nivel de deterioro y comparar la estabilidad de materiales tratados y no tratados (fig. 18).

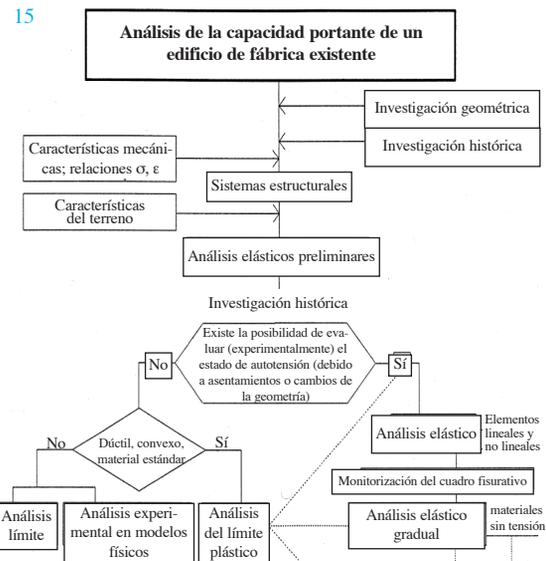
La eficacia de las técnicas de refuerzo también debería estudiarse a fin de clasificar el tipo de problemas y de requerimientos, clasificar el tipo de materiales de albañilería y la mampostería, establecer procedimientos para el control de las técnicas en el laboratorio y en el sitio, e implementar modelos matemáticos para el análisis de las estructuras reparadas.

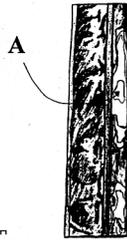
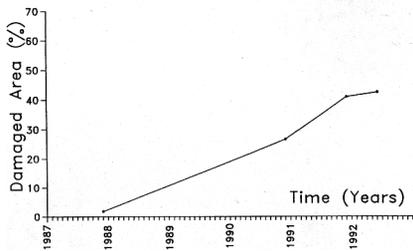
En los últimos años, se han desarrollado investigaciones sobre la eficacia de la técnica de revestimiento de muros de ladrillo y de la técnica de inyección de lechadas. Se han realizado ensayos en muestras de tamaño real y se han aplicado modelos matemáticos para el caso del así llamado *jacketing* (Gelmi et al., 1993). Se efectuaron ensayos en probetas de pequeño tamaño, sometidas a cargas horizontales a fin de estudiar la respuesta de edificios de mampostería reparados mediante inyecciones de lechadas, y compararlas con otras técnicas de refuerzo (Tomazevic et al., 1994). Se estableció un procedimiento para probar la eficacia de la técnica de inyección para muros de hojas múltiples (Binda et al., 1994). Después de haber clasificado la sección de los muros mediante un estudio geométrico estadístico (fig. 19), se dedujo el tamaño y la distribución de los huecos. Se construyeron algunas maquetas de ensayo dentro de cilindros transparentes que se inyectaban con lechadas diferentes, a fin de controlar su inyectabilidad. Los cilindros se ensayaron a compresión. Los ensayos con gatos planos se efectuaron sobre el edificio objeto de la reparación en



14. San Faustino, Brescia, Italia: Sub-estructura del sistema murario: sección del edificio. Sección longitudinal del muro. Subestructura modelo de elementos finitos de la estructura

15. Fases y alternativas de los análisis numéricos de las estructuras existentes, 1983





16

algunos puntos de control, antes y después de la inyección a fin de comprobar su optimización tras ésta (fig. 20). Con posterioridad, se obtuvieron muestras del corazón, desde el exterior, para verificar la penetración y la difusión de las inyecciones.

**CÓDIGOS Y RECOMENDACIONES**

Existe una gran dificultad para establecer reglas estrictas para la restauración de edificios existentes, ante todo, debido a las diferencias entre edificios y estructuras, y a las múltiples tecnologías de construcción y materiales. Los códigos de prácticas, no obstante, son necesarios para ofrecer directrices que permitan elegir el adecuado modelo de comportamiento estructural y las técnicas de reparación y de consolidación que resulten más exitosas, tales como normas para el uso de materiales tradicionales o nuevos, en la restauración.

Se han establecido varias recomendaciones y códigos en diversos países. El *Uniform Code for Building Conservation* en Estados Unidos representa un ejemplo de cómo pueden proponerse algunas reglas comunes para el caso de edificios existentes.

La recomendación para ensayar probetas extraídas de los edificios existentes y los materiales usados para la reparación y la restauración, se han preparado en Italia por comités nombrados por el Ministerio de Cultura. Estas pruebas resultan, en efecto, muy importantes para la elección de las técnicas y materiales adecuados para su restauración. No obstante, aún falta un código de buena práctica actualizado a estas necesidades.

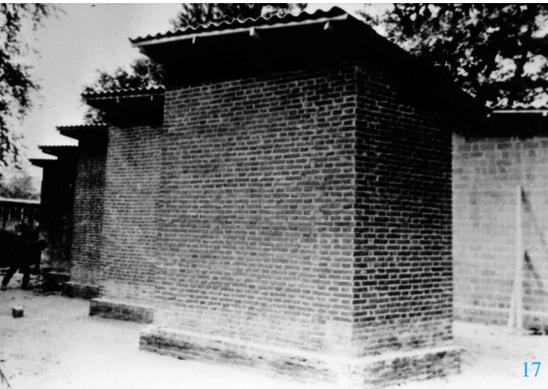
Otros países, seguramente, trabajan a nivel nacional, pero deberían también establecerse comités a nivel europeo.

Un Comité RILEM, el 127MS, todavía en funcionamiento, estudia los ensayos destructivos y no destructivos de la mampostería, con pruebas de durabilidad; planteamientos mediante gatos planos, pruebas de sacudidas, pruebas sónicas y ultrasónicas. Próximamente, se publicarán sus conclusiones. El CIBW23 es un Comité que estudia también los ensayos y modelizaciones para las reparaciones y refuerzos de estructuras de mampostería.

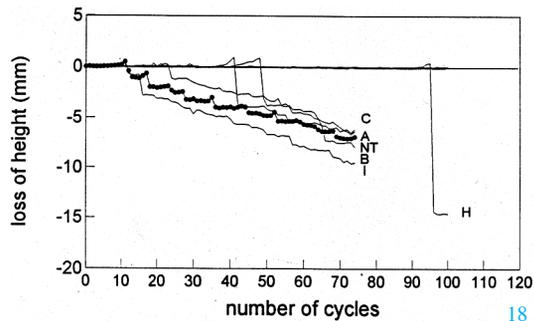
**CONCLUSIONES**

En estas escasas páginas, se ha realizado un intento por resumir el estado de la investigación y de la filosofía de la seguridad. Por supuesto, debido a la carencia de espacio y la falta de información, el artículo dista mucho de ser exhaustivo y se han omitido otras investigaciones importantes, hecho por el cual la autora pide disculpas. La restauración tiene que ser entendida, en la medida de lo posible, como la conservación de la estructura y de sus materiales, aún en áreas sísmicas. En algunos casos, pueden ser salvados por una simple consolidación, como han demostrado los resultados de investigaciones realizadas en Italia, Eslovenia, Alemania y en otros países, la aplicación de la ley en Estados Unidos y algunas intervenciones hechas en Italia, en Grecia, incluso en edificios de vivienda.

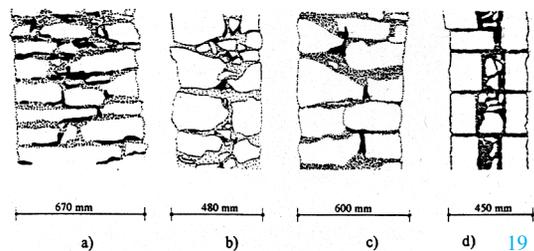
El aspecto positivo de la situación actual es que, cada vez más, las organizaciones ayudan a los profesionales a trabajar dentro del marco de profundo respeto a los edificios existentes; no importa si se trata de residencias sencillas o de construcciones monumentales. Las técnicas modestas y las costosas deberían ser aplicadas según una selección sensata, basada, no solamente en nuevos materiales sino también en métodos tradicionales. Se necesitan más esfuerzos para verificar los procedimientos de investigación, la modelización matemática y la codificación o redacción de recomendaciones.



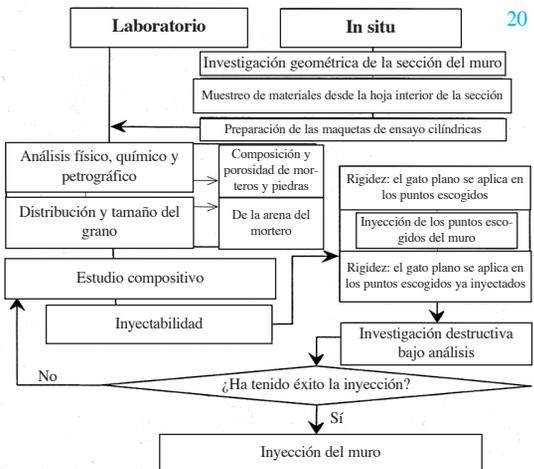
17



18



19



20

16. Catedral de Milan, Italia, fachada: gráfico de las lesiones físico-químicas de un fragmento

17. Modelos a escala 1:1 construidos en un laboratorio exterior en Milan

18. Curvas de deterioro de piedras tratadas y sin tratar; el espesor del material desaparecido vs. número de ciclos actuantes

19. Estudios de secciones de muros

20. Proceso de investigación de la eficacia de las inyecciones

## REFERENCIAS

1. AMADEI, B., LIN, C.T., SHING, B., MIRABELLA, G., BINDA, L. (1995), Modelling the stability of masonry structures with discontinuous deformation analysis (DDA) method, Int. Symp. on Computer Methods in Structural Masonry, Lisbon.
2. ANDEREGG, A. (1942), The Effect of Brick Absorption Characteristics upon Mortar Properties, Proc. ASTM 42.
3. ATKINSON, R.H., BINDA, L., KINGSLLEY, G., NOLAND, J.L., ROSSI, P.P., TIRABOSCHI, C. (1995), In-Situ Measurement of Bond Shear Strength of Masonry: the Shove Test, Internal Report, Dept. Struct. Engineering, Politecnico di Milano.
4. BERRA, M., BINDA, L., ANTI, L., FATTICIONI, A. (1992), Utilisation of Sonic Tests to Evaluate Damaged and Repaired Masonries, Conf. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, Boulder, Colorado.
5. BINDA, L., BARONIO, G. (1985), Alteration of the Mechanical Properties of Masonry Prisms due to Ageing, 7th IBMAC, Melbourne, Australia, vol. 1.
6. BINDA, L., BARONIO, G. (1987), Mechanisms of Masonry Decay due to Salt Crystallisation, Durability of Building Materials, N. 4, Elsevier, Amsterdam.
7. BINDA, L., MIRABELLA ROBERTI, G., ABBANEIO, S. (1994), The Diagnosis Research Project, Earthquake Spectra, vol. 10, N. 1.
8. BINDA, L., MODENA, C., BARONIO, G., GELND, A. (1994), Experimental Qualification of Injection Admixtures Used for Repair and Strengthening of Stone Masonry Walls, 10th Int. Brick/Block Masonry Conf., Calgary, Vol. 2.
9. BINDA, L., ROSSI, P.P., SACCHI LANDRIANI, G. (1983), Diagnostic Analysis of Masonry Buildings, IABSE Symp. on Strengthening of Buildings Structures, Ed. IABSE-AIPC-IVBH, Venice, Italy.
10. CHIARUGI, A., FANELLI, M., GLUSEPETTTI, G. (1993), Diagnosis and Strengthening of the Brun.-elleschi Dome, IABSE Symposium, Rome, Italy.
11. CNR-G, T (1992), International Workshop Effectiveness of Injection Techniques for Retrofitting of Stone and Brick Masonry Walls in Seismic Areas, ed. Binda, L., Milano, Italy.
12. CORSANEIO, A., D'AGOSTINO, S., GAVARINI, C. (1993), Decision Process for Monuments, IABSE Symposium, Rome.
13. DOGLIONI, F., MORETTI, A., PETRINI, V. (1994), Le Chiese e il 'Terremoto, LINT, Tdeste.
14. GELMI, A., MODENA, C., ROSSI, P.P., ZANINETTI, A. (1993), Mechanical Characterisation of Stone Masonry Structures in Old Urban Nuclei, The Sixth North American Masonry Conference, Philadelphia.
15. GROSS, J.G., DIKKERS, R.D., GROGGAN, J.C. (1969), Recommended Practice for Engineered Brick Masonry, Brick Institute of America, McLean, Va.
16. HENDRY, A., W. (1981), Structural Brickwork, Mc Millan Press, London.
17. HILSDORF, H., K. (1969), Investigation into the Failure Mechanism of Brick Masonry loaded in Axial Compression, Design, Engineering and Constructing with Masonry Products, Johnson F., Gulf Pub. Co.
18. HEYMAN, J. (1966), The Stone Skeleton, Int. J. Sol. Struct., Pergamon Press, vol.2.
19. JANKULOVSLD, E., PARSANEJA, S., SALEH, A. (1995), Discrete Element approach for in-plane failure of masonry walls, Int. Symp. on Computer Methods in Structural Masonry, Lisbon.
20. JOHNSON, F., B., THOMPSON, J.N. (1967), The development of Diametrical Testing Procedure to Provide a Measure of Strength characteristics of Masonry assemblages, 1st Int. Conf on Masonry Struct. Systems, Austin, Texas.
21. KOOHARIAIL, A. (1953), Limit Analysis of Voussoirs, Proc. Arri. Concr. Inst.
22. LENZNER, D. (1972), Elements of Loadbearing Brickwork, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Braunschweig.
23. MACCHI, J., EUSEBIO, M., RUGGERI, G., MONCECCHI, M. (1991), Structural Assessment of the Leaning Tower of Pisa, IABSE Symposium, Rome.
24. MELI, R., SANCHEZ-RAMIREZ, A.R. (1993), Studies for the Rehabilitation of the Mexico City Cathedral, IABSE Symposium, Rome.
25. MAYES, R., L., CLOUGH, R., W. (1975), A Literature Survey - Compressive, Tensile, Bond and Shear Strength of Masonry, Rep. N. EERC 75 - 15 Earth. Eng. Res. C., College of Eng., Univ. of California, Berkeley, California.
26. NSF, Washington D.C., C.N.R., Rome (1986), Joint USA-ITALY Workshop on Evaluation and Retrofit of Masonry Structures, Italy.
27. NSF, Washington D.C., C.N.R., Rome (1987), Joint USA-ITALY Workshop on Evaluation and Retrofit of Masonry Structures, USA.
28. NSF, Washington D.C., C.N.R., Rome (1992), Joint USA-ITALY Workshop on Learning from Practice, A Review of Architectural Design and Construction Experience After Recent Earthquakes, Orvieto, Italy.
29. NUSS, L., K., NOLAND, J., L., CHIM, J. (1978), The Parameters Influencing Shear Strength between Clay Masonry Units and Mortar, Proc. of North American Masonry Conf., University of Colorado, Boulder, Co.
30. PIPPARD, A. J. S., TRANTER, E., CHITTY, L. (1936), The Mechanics of the Voussoir Arch, Int. Inst. C. E., vol. 4.
31. Prov. di Trento, A.N.I.A.C.C.A.P., ITEA (1993), International Workshop on Murature, Sicurezza, Recupero, ed. Modena, C., Trento, Italy.
32. RONCA, P., CASTLGLIONI, L. (1992), Lo Strumento dell'Analisi Numerica nelle Fasi di Diagnosi e di Scelte Progettuali per il Consolidamento Conservativo di Vecchie Strutture, IV National Congress on Consolidamento e Recupero dell'Architettura Tradizionale: dagli Interventi Singoli agli Interventi d'Insieme Urbatio, Prato.
33. ROSSI, P.P (1990), Non-Destructive Evaluation of the Mechanical Characteristics of Masonry Structures, Int. Conf on Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials, Boulder, Co.
34. SAHLIN, S. (1971), Structural Masonry, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
35. SCHULLER, M., P., ATKINSON, R., BORGMILLER, J., T. (1994), Injection Grouting for Repair and Retrofit of Unreinforced Masonry, 10th Int. Brick/Block Masonry Conf, Calgary, Vol. 2.
36. SCHULLER, M., BERRA, M., FATTICIONI, A., ATKINSON, R., BINDA, L. (1994), Use of Tomography for Diagnosis and Control of Masonry Repair, 10th Int. Brick/Block Masonry Conf., Calgary, Vol. 3.
37. TOMAZEVIC, M., APIH, V., LUTMAN, M. (1994), Aseismic Strengthening of Historical Stone-Masonry Buildings by Building-Friendly Technologies, TMS Journal, August, Vol. I, N. 1.
38. VOSS, W., C. (1933), Permeability of Brick Masonry Walls - An Hypothesis, Proc. ASTM 33.