

CUADERNOS INTEMAC

Diagnosis estructural y rehabilitación de edificios históricos

Structural diagnosis and rehabilitation of historical buildings

Prof. Dr. Giorgio Macchi



INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 7

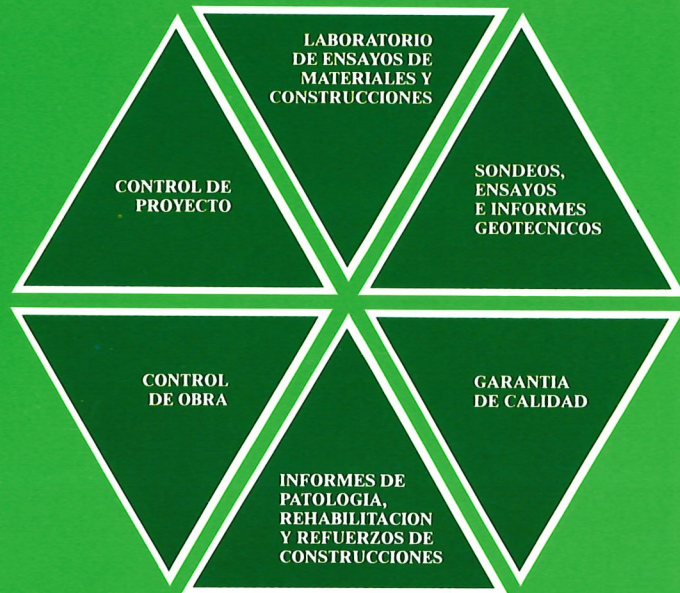
3.º TRIMESTRE '92



INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

OBRAS PUBLICAS
EDIFICACION
INSTALACIONES



INTEMAC
AUDIT



AUDITORIA TECNICO-ECONOMICA
DE CONSTRUCCIONES

DIAGNOSIS ESTRUCTURAL Y REHABILITACION DE EDIFICIOS HISTORICOS (*)
STRUCTURAL DIAGNOSIS AND REHABILITATION OF HISTORICAL BUILDINGS (*)



Prof. Dr. Giorgio Macchi
Dr. Civil Engineer
Professor of Structures
at the University of
Pavia, where he has been
Dean and Director
of the Structural Engineering
Institute. Vicepresident of
«The International Association
of Bridge and Structural
Engineering» (IABSE).
President of the
«Structural Design» Commission of
the CEB
Member of the International
Committee for Research
on the Tower of Pisa

Prof. Dr. Giorgio Macchi
Dr. Ingeniero Civil
Profesor de Estructuras
de la Universidad de
Pavia, de la que ha sido
Decano y Director
del Instituto de Ingeniería Estructural.
Vicepresidente de la
«International Association of
Bridges and Structural
Engineering» (IABSE)
Presidente de la Comisión
«Structural Design» del CEB.
Miembro del Comité
Internacional para el estudio
de la Torre de Pisa

(*) Esta Publicación recoge el texto de la Conferencia pronunciada el 21 de octubre de 1991 por el Dr. Macchi en el Ciclo de Conferencias «PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZO DE OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO» que organizado por INTEMAC, tuvo lugar en Barcelona, del 21 al 25 de octubre de 1991, en coincidencia con el curso de Patología organizado por el Instituto en esas mismas fechas.

(*) This Publication includes the paper from the Conference given on the 21th. October 1991 by Dr. Macchi during the Series of Conferencias organized by INTEMAC on «PATHOLOGY, REHABILITATION AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES» which were held in Barcelona, from the 21 to 25 Octoberr 1991, in coincidence with the course on Pathology organized by the Institute on the same days.

Copyright © 1992, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

ISBN 84-87892-07-08

Depósito legal: M-26.287-1992
Torreangulo Arte Gráfico, S. A. - Batalla de Belchite, 19

INDEX

- 1 RELIABILITY OF ANCIENT HISTORICAL MASONRY
- 2 IMPROVED RELIABILITY CRITERIA
 - 2.1 Evaluation of the risk
 - 2.2 Acceptability of the risk
 - 2.3 Warning associated to the type of structure
- 3 MATERIAL INVESTIGATIONS, MODELLING, MONITORING
 - 3.1 Structural and material investigations
 - 3.2 Modelling
 - 3.3 Monitoring
- 4 DESTRUCTIVE TESTS
- 5 NONDESTRUCTIVE TESTS
 - 5.1 Radar
 - 5.2 Thermography
 - 5.3 Sonic methods. Sonic tomography
 - 5.4 Endoscopy
 - 5.5 Pressimeters
 - 5.6 Flat jacks
- 6 NUMERICAL MODELLING AND ITS EXPERIMENTAL CHECK
 - 6.1 Modelling
 - 6.2 Safety check
 - 6.3 Experimental check
- 7 DYNAMIC DIAGNOSIS
- 8 MONITORING
 - 8.1 Preliminary survey
 - 8.2 Instruments
 - 8.3 Choice of the system

INDICE

- 1 LA FIABILIDAD DE LA ALBAÑILERIA ANTIGUA E HISTORICA
- 2 MEJORA DE LOS CRITERIOS DE FIABILIDAD
 - 2.1 Valoración del riesgo
 - 2.2 Aceptabilidad del riesgo
 - 2.3 Advertencias relacionadas con el tipo de estructura
- 3 INVESTIGACION DE MATERIALES, MODELIZACION, SEGUIMIENTO
 - 3.1 Investigaciones estructurales y de materiales
 - 3.2 Modelización
 - 3.3 Seguimiento
- 4 ENSAYOS DESTRUCTIVOS
- 5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
 - 5.1 Radar
 - 5.2 Termografía
 - 5.3 Métodos sónicos, sonda tomográfica
 - 5.4 Endoscopia
 - 5.5 Presurómetro
 - 5.6 Gatos planos
- 6 MODELIZACION NUMERICA Y SU CONTRASTE EXPERIMENTAL
 - 6.1 Modelización
 - 6.2 Comprobación de seguridad
 - 6.3 Contraste experimental
- 7 DIAGNOSIS DINAMICA
- 8 SEGUIMIENTO
 - 8.1 Inspección preliminar
 - 8.2 Instrumentos
 - 8.3 Elección del sistema

Abstract

Preservation, rehabilitation and strengthening of historical buildings and monuments require the development of appropriate reliability criteria, as well as the use of special techniques for diagnosis and safety assessment in view of possible interventions. Non destructive testing and dynamic identification are promising techniques in the field.

1 RELIABILITY OF ANCIENT HISTORICAL MASONRY

Historical buildings and monuments should not always be a matter of concern for their structural stability.

Nevertheless, for some of them a situation of serious risk may be presumed, so that a deep diagnosis is needed before undertaking any kind of strengthening, which might well result useless or detrimental for the artistic identity of the building.

Stability concerns may arise for characteristics of the structure inherent to its initial concept or execution; otherwise, concern may be due to degradation, alterations, or damages shown after accidental actions, such as earthquakes.

This latter is the usual case: a building which is considerably leaning, with cracked or otherwise damaged walls and vaults, with deteriorated facing materials, normally creates apprehension. On the contrary, a building without apparent damages, and having withstood natural actions for centuries may not be cause of serious concern, according to current opinion.

Nevertheless, the assessment of the structural status of some historical buildings has recently shown that for some of them the structural safety is extremely low, at a level absolutely unacceptable, even under the optimistic assumption that no strength degradation is taking place in the materials. This has been dramatically shown by some recent collapses, for which no reason was found other than a deficient safety level of the structure since its origin.

Particularly in the Gothic age, the construction of churches was continued till its physical limit, often after several attempts and partial collapses; even the civic towers built in the Middle Ages were a challenge to structural stability, and were often built as tall as possible.

This is the reason why most of them have been demolished (due to a justified feeling of risk, or after partial collapses), or, in a few cases, they effectively collapsed in a dramatic way.

Therefore, such buildings and monuments, whose stability is so precarious, may collapse under slight earthquakes, a strong wind, subsidence of foundations, as well as possible damages due to local material degradation, and even lightning.

Such collapses can be avoided by an appropriate and rational use of structural engineering techniques, such as structural mechanics and numerical analysis.

However, such techniques should be deeply improved and critically modified, at least in three fundamental aspects:

- i The definition of the mechanical properties (mainly strength and stiffness of unknown materials);
- ii The implementation of new constitutive laws for degraded materials, and methods of analysis for damaged structures;
- iii The improvement of the reliability criteria: they cannot be the same as those currently used for new constructions, because they would often lead to the demolition or to strengthening of buildings which do not need it.

2 IMPROVED RELIABILITY CRITERIA

When discussing if we should accept a higher risk in presence of a building of higher historical or artistic value, we should be clear: we shall separate the problem of the risk evaluation in terms of human lives, the discussion of the risk that we are prepared to accept, the evaluation of the risk of losing a valuable object or of losing its historical and artistic identity by means of inappropriate strengthening interventions.

The usual problem of structural reliability has therefore new aspects deserving special consideration.

Resumen

La conservación, rehabilitación y refuerzo de edificios y monumentos históricos requiere tanto el desarrollo de un criterio adecuado y fiable, como el uso de técnicas especiales para la diagnosis y evaluación de la seguridad con vista a posibles intervenciones. Los ensayos no destructivos y la identificación dinámica son técnicas que prometen mucho en este campo.

1 LA FIABILIDAD DE LA ALBAÑILERIA ANTIGUA E HISTORICA

La estabilidad estructural de edificios históricos y monumentos no debe considerarse siempre como motivo de preocupación.

Sin embargo, se puede suponer que existe un riesgo importante en algunos de ellos, y por lo tanto hace falta hacer una diagnosis en profundidad antes de realizar algún tipo de refuerzo, que pudiere resultar inútil o actual en detrimento de la identidad artística del edificio.

Las preocupaciones por la estabilidad pueden surgir de las características estructurales propias, de su concepto o ejecución inicial; o las debidas a su degradación, modificación, o a los daños que hayan resultado de acciones accidentales, como es el caso de los terremotos.

Edificios con una fuerte inclinación, con muros o bóvedas que muestran signos de fisuración u otro tipo de daños, o con revestimientos deteriorados, normalmente causan aprensión. Por otro lado, un edificio sin deterioro aparente, y que ha soportado las acciones naturales durante siglos no suele dar lugar a una preocupación excesiva, según la interpretación corriente.

Sin embargo, la evaluación del estado estructural de algunos edificios históricos ha demostrado recientemente que la seguridad estructural es muy baja en algunos de ellos, y se encuentra a un nivel totalmente inadmisibile, incluso bajo la suposición optimista de que no se esté produciendo una disminución de la resistencia de los materiales. Esto se ha puesto en evidencia de forma dramática por derrumbamientos recientes, debidos simplemente a un nivel de seguridad deficiente de la estructura desde sus orígenes.

En el período gótico, en particular, la construcción de iglesias se llevaba hasta su extremos estructurales, a menudo incluso después de varios intentos y colapsos parciales; hasta las torres municipales construidas en la Edad Media fueron un desafío a la estabilidad estructural, y se construyeron tan altas como era posible.

Esta es una de las razones por las que la mayoría de ellas han sido derribadas (debido a su riesgo evidente, o tras un derrumbamiento parcial), o en algunos casos se han derrumbado solas y de una forma dramática.

Así, estos edificios y monumentos cuya estabilidad es tan precaria, pueden derrumbarse por causa de un terremoto leve, vientos fuertes, movimiento de las cimentaciones, y también debido a daños provocados por la degradación local de materiales, e incluso en el caso de rayos.

Tales colapsos se pueden evitar a través de la aplicación adecuada y racional de técnicas de ingeniería estructural, como mecánica estructural y análisis numérico.

Sin embargo, hay que modificar y mejorar estas técnicas en tres aspectos fundamentales, por lo menos:

- i la definición de las propiedades mecánicas (principalmente la resistencia y rigidez de materiales desconocidos).
- ii la aplicación de nuevas leyes constitutivas para materiales degradados, y métodos de análisis para estructuras dañadas.
- iii la mejora de los criterios de fiabilidad; no pueden ser los mismos que se emplean hoy en día para construcciones nuevas, porque ésto a menudo implicaría el derribo o refuerzo de edificios que no lo necesitan.

2 MEJORA DE LOS CRITERIOS DE FIABILIDAD

Al hablar de la aceptación o no, de un mayor nivel de riesgo admisible de un edificio de alto valor histórico y artístico, hay que ser claro: tenemos que considerar individualmente los problemas implicados en la valoración del riesgo en términos de vidas humanas, el riesgo que estamos dispuestos a aceptar, y la posibilidad de perder un objeto valioso o de perder su identidad histórico-artística debido a refuerzos inadecuados.

2.1 Evaluation of the risk

In the risk evaluation the following data may differ from the usual cases.

- The fact that the building is still standing shows that it withstood even rather rare actions (having a considerable return period).
- Some actions, such as the self weight, may be better known than in a new structure to be built.
- The mechanical properties of the materials may be better known in some cases, but may be nearly unknown in other cases, due to difficult access to the structure, difficulties of coring and testing, availability of non-destructive test only.
- The existence (or not) of a clear pathological picture showing the effects of an existing distress; some kinds of deficiencies, on the contrary, do not show any sign of their presence.
- For many ancient buildings the complexity of a structural analysis may be so high that a reliable structural assessment is practically impossible.
- The risk for human life is highly dependent on the use of the building; the consequences of a collapse may be more or less serious according to the conditions:
 - isolated and non accessible building;
 - building standing in an urban area;
 - building open to public;
 - building open to great assemblies of people (cathedrals, etc.).

The consideration of the above exposed peculiarities leads to different numerical values of the components of the risk to human life, in comparison with usual conditions, but is not influencing the acceptability of the risk itself.

2.2 Acceptability of the risk

Having determined the risk, the actions to be undertaken depend on the level of acceptance of that risk from the society.

Nevertheless, in such a balance new risks should be considered: that of losing the monument and its historical and artistic value, and the opposite risk of losing its artistic value through unsuitable repairs or strengthenings.

This latter is a risk highly considered today, and this rather recent philosophy of preservation leads to the tendency to preserve several monuments in rather dangerous situations, both versus the consideration of the risk of their loss, and versus the consideration of human life. Therefore a question arises: should we accept a higher personal risk in presence of a historical building?

2.3 Warning associated to the type of structure

It is common in structural engineering to reject with higher factors of safety the mechanism of collapse which are not announced by clear signs of distress, so that there is no warning for an evacuation.

In the case of historical buildings, we should consider at least the difference between:

- Building with large vaults or arches, which should show large distress and displacements before reaching a real unstable situation; in such a case a continuous monitoring of the structure may be extremely useful, and provide a suitable warning through the detection of sensitive deviations from the «physiological» behaviour; long term monitoring under daily and seasonal effects provides suitable alarm functions, and the velocity of the deviation may give the measure of the alarm.
- Buildings in which a sudden collapse may occur due to compression failure or instability, without any visible distress or warning; in such a case only the rational conclusions of a structural analysis may discover the risk; this is the case of towers in which masonry is subject to a high state of stress; long term monitoring may only detect, in this case, unknown phenomena due, for instance, to soil subsidence; the risk associated to possible earthquakes may only be assessed by an appropriate structural analysis.

2.1 Valoración del riesgo

En la valoración del riesgo los datos siguientes pueden diferir de los casos que usualmente se consideran.

- El hecho de que el edificio siga en pie demuestra que el mismo ha soportado el efecto de acciones poco frecuentes (que implica un período de retorno considerable).
- Algunas acciones, como el peso propio, pueden conocerse mejor en estos edificios que en *estructuras nuevas*.
- Se pueden conocer las propiedades mecánicas de algunos de los materiales, pero en otros casos pueden ser desconocidas, como resultado del difícil acceso al edificio, dificultades en obtener testigos o ensayos, o debido a la imposibilidad de realizar ensayos no-destructivos.
- La presencia (o la ausencia) de un cuadro patológico claro demuestra la existencia de deterioro; por otro lado algunos tipos de deficiencias no muestran signos de su existencia.
- La dificultad de realizar un análisis estructural en muchos edificios antiguos puede ser tal que impida una valoración estructural fiable.
- El riesgo para la vida humana depende en gran medida del uso del edificio; las consecuencias de un derrumbamiento pueden ser más o menos serias según las siguientes condiciones:
 - edificio aislado y no accesible.
 - edificio dentro de la zona urbana.
 - edificio abierto al público.
 - edificio abierto a grandes asambleas (catedrales, etc.).

La consideración de las peculiaridades expuestas anteriormente lleva a distintos valores numéricos de los componentes del riesgo para la vida humana, con respecto a las condiciones normales, pero no llega a afectar a la aceptabilidad del riesgo en sí mismo.

2.2 Aceptabilidad del riesgo

Una vez determinado el riesgo, las acciones a tomar dependen del nivel de aceptación del riesgo por la sociedad.

Sin embargo, hay que tener en cuenta la posibilidad de nuevos riesgos; como la pérdida del monumento y su valor histórico artístico, o por el contrario el riesgo de perder dicho valor a través de unas reparaciones o refuerzos inadecuados.

Esto último es un riesgo a tener muy en cuenta hoy en día, y esta filosofía reciente de conservación conduce a la tendencia de conservar monumentos en estado bastante peligroso, en oposición a su posible pérdida y al riesgo para la vida humana. Por lo tanto surge la pregunta, ¿deberíamos aceptar un mayor riesgo personal ante la presencia de edificios históricos?

2.3 Advertencias relacionadas con el tipo de estructura

Es muy común en la ingeniería estructural, penalizar con coeficientes de seguridad altos, los mecanismos de colapso que no son advertidos con claros signos de deterioro, y que, por ello, no avisan en caso necesario para una evacuación.

En el caso de edificios históricos debemos considerar la diferencia entre:

- Edificios con grandes bóvedas o arcos, con indicios de gran deterioro y desplazamientos antes de llegar a situaciones verdaderamente inestables. En tal caso el seguimiento continuo de la estructura puede ser muy útil y dará unas señales adecuadas a través de la detección de desviaciones sensibles del comportamiento «fisiológico»; el seguimiento a largo plazo de los efectos diarios y estacionales desempeñará unas funciones de aviso adecuadas, y la velocidad de la desviación proporciona una medida del grado de dicha advertencia.
- Edificios que pueden sufrir un colapso repentino debido a rotura por compresión o inestabilidad, sin dar ninguna señal visible. En tal caso el riesgo puede ser descubierto solamente a través de las conclusiones racionales del análisis estructural. Este es el caso de torres donde la fábrica está sometida a grandes esfuerzos. El seguimiento a largo plazo solamente puede detectar fenómenos desconocidos, debidos por ejemplo al asentamiento del suelo, y el riesgo relacionado con posibles terremotos solamente puede ser evaluado a través de un análisis estructural adecuado.

3 MATERIAL INVESTIGATIONS, MODELLING, MONITORING

Several engineering techniques have been implemented, in recent decades, for use in the diagnosis of structures. Each of them has its own field of application in such a delicate field of activities, and should be applied in each case according to the needs and the state (damaged or not) of the structure.

3.1 Structural and material investigations

They include any kind of survey, study or test, on site or in laboratory, aimed at the definition of the geometry (cross sections, regular or deformed shape, etc.), of the physical and mechanical properties of the masonry, possible degradation or pathological state (cracks, dislocations, etc.), *as it is at the moment*.

Historical studies may add precious information on previous damages already repaired in the past, and alterations of the original material and structurally resistant parts (See Photo 1).

3.2 Modelling

Modelling is the complex set of operations aimed at the construction of mathematical models based on the geometry and on the mechanical properties determined through the previous investigations.

The models should be suitable for the application of the methods of structural mechanics and allow for the determination of idealized strains, states of stress, displacements, the information needed for a static and dynamic diagnosis, then for an evaluation of the structural safety.

3.3 Monitoring

Monitoring is the long term observation of the structure, the measure of the history of strains and movements, the measure of the physical quantities giving rise to the movements (environmental quantities, movements of soil and of water table, etc.) in order to record a «physiological» normal behaviour of the structure, and be able therefore to detect in the following any possible abnormal, pathological behaviour.

4 DESTRUCTIVE TESTS

Very seldom the diagnosis of a historical building can be based on destructive tests on the original material.

Sometimes samples of masonry may be removed and tested to destruction in laboratory; it may happen when the intervention is dealing with the rehabilitation of a complete historical center, and some parts of a building may need demolition or reconstruction.

In such cases the tests on masonry samples (necessarily large enough to be representative of the mean quality) can provide sound information about the strength and other mechanical properties of the material on site (mean values and characteristic values if the specimen population is sufficient). The information may therefore be of great advantage if representative of a vast population of similar masonry walls, built with the same technique with similar basic materials.

Such research has been done in the 60's for Venice, where several ancient brickwork samples have been removed from historical palaces and tested; the result was a very useful picture of the mean strength and of its possible deviation.

Another outstanding case has been the extensive series of tests performed on the Middle Age masonry of the Civic Tower which collapsed on the 17th February 1989 in Pavia. The size of the walls, having a thickness of 2,800 mm, and the particular structure (made with two brick facings and an infill of a poor conglomerate of rubble and brick ruins connected with a lime mortar) suggested to perform two full scale tests on blocks of the size of 1,800 × 3,000 × 700 mm. The test have been made in the Structural Laboratory at the University of Pavia, and have been followed by several tests of smaller blocks (See Photo.2, 3, 4).

3 INVESTIGACIONES DE MATERIALES, MODELIZACION, SEGUIMIENTO

En las últimas décadas se han puesto en práctica varias técnicas de ingeniería para la diagnosis de estructuras. Cada una de ellas tiene su propio campo de aplicación en este terreno de actividades tan delicado, y estas técnicas deberían ser aplicadas en cada caso según las necesidades y estado de la estructura (dañada o no).

3.1 Investigaciones estructurales y de materiales

Estas incluyen cualquier tipo de inspección, estudio o ensayo, in-situ o en el laboratorio, dirigido a la definición de la geometría (secciones transversales, formas regulares o deformadas, etc.), de las propiedades mecánicas y físicas de la fábrica, de la posible degradación o estado patológico (fisuras, roturas), sobre la configuración actual.

Los estudios históricos pueden aportar una información valiosa de daños anteriores que ya han sido reparados, y de las alteraciones en el material original y en los elementos estructurales (Ver Foto 1).

3.2 Modelización

La modelización es un conjunto de operaciones complejas, dirigidas al establecimiento de modelos matemáticos basados en la geometría y en las propiedades mecánicas definidas en investigaciones previas.

Los modelos deben ser adecuados para la aplicación de métodos de mecánica estructural y permitir la determinación de deformaciones, estado tensional, desplazamientos, y todos los datos necesarios para una diagnosis estática y dinámica, y para la evaluación de la seguridad estructural.

3.3 Seguimiento

Por seguimiento entendemos la observación de la estructura a largo plazo, la medida de deformaciones y movimientos, la medida de las magnitudes físicas que daban lugar a estos movimientos (magnitudes ambientales, desplazamientos del suelo y del nivel freático, etc.), para registrar el comportamiento «fisiológico» normal de la estructura, y de esta manera permitir la detección en el futuro de cualquier comportamiento patológico atípico.

4 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

La diagnosis de un edificio histórico rara vez puede estar basada en ensayos destructivos del material original.

Algunas veces se pueden tomar muestras de la fábrica y realizar ensayos hasta rotura en el laboratorio; ésto puede ocurrir cuando se trata de la rehabilitación de un centro histórico en su conjunto, en el que hay que demoler o reconstruir partes del edificio.

En tal caso los ensayos sobre muestras de fábrica (suficientemente grandes para ser representativas de la calidad media) pueden proporcionar datos importantes sobre la resistencia y otras propiedades mecánicas del material in-situ (valores medios y característicos si el número de testigos es suficiente). Los datos, por lo tanto, pueden ser muy útiles si son representativos de un gran número de muros de fábrica similares, construidos con las mismas técnicas y materiales básicos.

Tales investigaciones fueron llevadas a cabo durante los años sesenta en Venecia, donde varias muestras de la fábrica de ladrillo antigua se extrajeron de palacios históricos y luego se sometieron a ensayos. Los resultados proporcionaban datos valiosos sobre la resistencia media y su posible dispersión.

Otro caso a destacar es la serie de ensayos realizados sobre la fábrica de la Torre Municipal Medieval en Pavia, que se derrumbó el 17 de febrero de 1989. Por el tamaño de los muros, de un grosor de 2.800 mm, y su estructura particular (hecha con dos capas de ladrillo y un relleno de un conglomerado pobre, de *escorbros* y ladrillos con mortero de cal) fue necesario realizar dos ensayos completos sobre bloques de 2.800 × 3.000 × 700 mm. Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio Estructural de la Universidad de Pavia, y se completaron con otros ensayos sobre bloques de menor tamaño (Ver Fotos 2, 3, 4).

The entire population of tests allowed to evaluate the mean strength in 3 MPa, and a characteristic value in 2 MPa.

This information is precious for the assessment of numerous monuments (and particularly tall towers) built in the same period with a similar technique; the similarity may well be established by small diameter cores, and non destructive tests.

In some seismic areas of Italy, full scale destructive tests in compression and diagonal compression have been performed on walls of ancient buildings during demolition. Removable equipment has been used, leaving the wall on site. This procedure may be allowed only for buildings of little artistic value, to be demolished, but may provide valuable information for an entire category of buildings.

Smaller size shear tests may be used on brickwork on site; the amount of destruction is limited, but would hardly be admitted on a very important monument.

The admissible amount of «destruction» is a matter of judgement, and of the seriousness of the stability problem to be solved.

For this reason the writer suggests, in the case of very important monuments, the simulation of the masonry in laboratory; the similarity of the reconstructed masonry may be obtained through a parametric variation of some materials (mainly the mortar), and judged through tests on cores and nondestructive tests (sonic, pressiometers, flat jacks, etc.). This technique, if widely applied, could provide in some years precious data for assessment and structural strengthening of ancient buildings in large areas of the Country.

5 NONDESTRUCTIVE TESTS

Mechanical tests in cores or thin cuts operated in the material may be considered nondestructive. Nevertheless, before any kind of drill or cut, some physical phenomena may be used for getting useful information.

5.1 Radar

This technique uses electromagnetic impulses emitted on the surface of the wall to be examined. The impulses are partially reflected on surfaces of discontinuity of the dielectric constant, and recorded on the emission surface. The reflected energy detects change of material and cavities, and their position may be found by calibration of the distances on the recorded transmission time.

The physical property studied is therefore the dielectric constant.

The sensitivity of the method is a function of the wave length used: for thick masonry walls suitable wave lengths are of the order of magnitude of 300 mm, therefore cavities smaller than that size cannot be clearly detected (See Photo 6).

5.2 Thermography

The physical quantity used in this case is thermal radiation; it depends on the temperature of the particles giving the emission. Clearly cut cavities (such as the «buche pontaise») may be easily detected; random distributed small cavities result in a mean reduction of the emission, which may indicate less mechanical soundness (See Photo 7).

5.3 Sonic methods. Sonic tomography

The velocity of mechanical waves of different wave length (sonic and ultrasonic) is a function of the modulus of elasticity of the material. Therefore, measurements of velocity across the wall or between parallel holes may provide mean values of the elastic properties, which are correlated with the strength.

The interpretation of such measurements is a particularly arduous task when the walls are thick, heterogeneous and altered by cracks and cavities. As already suggested they, would work better in association with simulated specimens of the masonry.

Esta serie de ensayos dan como resultado una resistencia media de 3 MPa, y un valor característico de 2 MPa.

Estos datos son muy importantes para la valoración de muchos monumentos (y torres altas en particular) construidos durante el mismo período y con técnicas similares. Se puede establecer la similitud utilizando testigos de pequeño diámetro, y realizando ensayos no destructivos.

En algunas zonas sísmicas de Italia, se han realizado ensayos destructivos a escala real a compresión y compresión diagonal, hasta rotura, sobre los muros de los edificios durante su demolición. Se emplearon equipos portátiles sobre el muro in-situ. Este procedimiento puede ser empleado únicamente en edificios de poco valor artístico, que van a ser demolidos, pero se pueden conseguir datos de mucho valor para una determinada categoría de edificios.

Se pueden realizar ensayos a esfuerzo cortante in-situ sobre la fábrica de ladrillo; esto implica cierto daño al edificio y por tanto no sería posible en monumentos de gran valor.

El límite admisible de «destrucción» depende del criterio tomado en cada caso, y de la gravedad del problema de estabilidad que se pretende resolver.

Por lo tanto, el autor sugiere, en el caso de monumentos muy importantes, realizar una simulación de la fábrica en el laboratorio; se puede obtener una similitud de la fábrica reconstruida a través del análisis paramétrico de algunos materiales (principalmente el mortero), con ensayos sobre testigos y ensayos no destructivos (sonda, presurómetros, gato plano, etc.). Esta técnica, aplicada ampliamente, podría proporcionar unos datos valiosos en el futuro para la valoración y refuerzo estructural de edificios antiguos en muchas partes del país.

5 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos mecánicos sobre testigos o pequeños cortes hechos en el material pueden ser considerados como no destructivos. Sin embargo, antes de emplear cualquier tipo de taladro o hacer cualquier corte, se pueden aprovechar algunos fenómenos físicos para obtener datos útiles.

5.1 Radar

Estos impulsos son parcialmente reflejados por las superficies de discontinuidad entre constantes dieléctricas y registrados en la superficie de emisión, reflejando los cambios de material y cavidades cuya posición se puede detectar calibrando las distancias de acuerdo al tiempo de transmisión registrado.

La propiedad física estudiada es, por lo tanto, la constante dieléctrica.

La sensibilidad de este método es función de la longitud de onda utilizada. Para muros de fábrica de gran espesor es adecuada una longitud de onda del orden de 300 mm, por lo cual, las cavidades inferiores a este tamaño no pueden ser detectadas con claridad (Ver Foto 6).

5.2 Termografía

La magnitud física empleada en este caso es la radiación térmica, y depende de la temperatura de las partículas que produce la emisión.

Cavidades claramente cortadas (como la *"buche pontale"*) pueden ser detectadas con facilidad; la existencia de cavidades pequeñas distribuidas aleatoriamente conducen a una disminución de la emisión, que puede indicar unas propiedades mecánicas más bajas (Ver Foto 7).

5.3 Métodos sónicos. Sonda tomográfica

La velocidad de propagación de las ondas mecánicas de distinta longitud de onda (sónicas y ultrasónicas) es función del módulo de elasticidad del material.

Así, las medidas de velocidad a través de un muro o entre dos huecos paralelos, pueden dar valores medios de las propiedades elásticas, que están en correlación con la resistencia.

La interpretación de tales medidas es una tarea especialmente difícil cuando los muros son de gran espesor, heterogéneos o están alterados por fisuras y cavidades. Como ya se ha sugerido, esto funcionaría mejor utilizando muestras simuladas de la fábrica.

Sonic tomography is a promising technique, used so far only in few cases. It is being used for the leaning Tower of Pisa. There is no doubt that the new technique should improve the possibility of detecting cavities, but all sonic methods cannot identify small cavities in large masses.

5.4 Endoscopy

Coring may provide more reliable data; however, very seldom cores obtained in masonry (and particularly in «sacco» masonry, formed of two facings and infill) can be submitted successfully to mechanical testing.

Therefore, the most valuable information being derived is the qualitative knowledge of the constituent materials (bricks, stones, rubble, mortars) and the consequent petrographic and chemical-physical analysis. By such means possible degradation products and corresponding processes may be identified.

Moreover, endoscopic color TV allows a careful description of the composition of conglomerates, as well as the nature and size of crack cavities (See Photo 5).

5.5 Pressimeters

Loading tests inside the holes can be performed by means of pressimeters; the difficulty of the tests is such that the results cannot yet be considered completely satisfactory and reliable; masonry may in fact be less homogeneous than rock and soil, where the technique is satisfactorily used.

However, this is the only available technique providing a mechanical test inside the masonry, and therefore to provide internal stress-strain relationships, and the stress level of onset of large deformations. Great effort should be devoted to the improvement of such a recent technique.

5.6 Flat jacks

Very similar are the load tests performed by means of flat jacks; they provide stress-strain laws of the material on site, and so allow a satisfactory diagnosis, nevertheless, they can only work near the surface of the walls, where thin cuts can be mechanically operated.

6 NUMERICAL MODELLING AND ITS EXPERIMENTAL CHECK

6.1 Modelling

Numerical modelling uses the previous determination of the geometry, of the mechanical properties and of the actions.

Linear elastic finite elements remain the most suitable technique for an approach to the state of stress, the deformations, and the dynamic behaviour of the important masonry structures.

Nonlinear constitutive laws, even if used at a scientific level, still cause delicate convergency problems in large meshes.

Cracks, often present in a macroscopic way in masonry structures, may be conveniently simulated in the mesh, still using linear elastic methods. In most cases the soil should also be simulated, but a limited number of linear elastic elements may be sufficient (See Photo. 8, 9, 10).

6.2 Safety check

The results of the structural analysis may be directly compared with the presumed resistance of the material, reaching in this way a first evaluation of the safety margin.

La tomografía sónica es una técnica prometedora, que no ha sido empleada con mucha frecuencia hasta ahora. Actualmente está siendo empleada para la Torre inclinada de Pisa. No hay duda alguna de que esta nueva técnica podría mejorar las posibilidades de detección de cavidades, pero como todos los métodos sónicos, no puede identificar pequeñas cavidades en grandes masas.

5.4 Endoscopia

Mientras que los testigos pueden dar unos datos más fiables, raras veces los testigos obtenidos de la obra de fábrica (y sobre todo en muros "a la romana", formados de dos hojas y relleno) pueden ser sometidos con éxito a ensayos mecánicos.

Por lo tanto, los datos más valiosos son los procedentes de los conocimientos cualitativos de los materiales constituyentes (ladrillos, piedras, cascotes y morteros) y el consiguiente análisis petrográfico y físico-químico. De esta manera se pueden identificar los posibles productos de una degradación y sus procesos correspondientes.

Además, la endoscopia en color permite tanto la descripción detallada de la composición de los conglomerados como de la naturaleza y tamaño de las fisuras (Ver Foto 5).

5.5 Presurómetro

Se pueden realizar ensayos de carga dentro de los huecos con el uso de presurómetros. Las dificultades que se presentan en este tipo de ensayos son tales que no se pueden considerar los resultados obtenidos como fiables y satisfactorios; la obra de fábrica puede ser de hecho menos homogénea que las rocas y los suelos donde esta técnica se utiliza con éxito.

Sin embargo, ésta es la única técnica disponible que permite realizar ensayos mecánicos en el interior de la fábrica, y así dar las propiedades mecánicas internas y el nivel de los esfuerzos al comienzo de grandes deformaciones. Hace falta un gran trabajo para mejorar esta técnica tan incipiente.

5.6 Gatos planos

Los ensayos de carga llevados a cabo con gatos planos son muy similares; dan la relación tensión-deformación del material in-situ, y así permiten una diagnosis satisfactoria; sin embargo, solamente funcionan en las proximidades de la superficie de los muros, donde se pueden realizar mecánicamente pequeños cortes.

6 MODELIZACION NUMERICA Y SU CONTRASTE EXPERIMENTAL

6.1 Modelización

La modelización numérica está basada en la determinación previa de la geometría, de las propiedades mecánicas y de las acciones.

Los elementos finitos lineales y elásticos siguen siendo la técnica más adecuada para establecer el estado tensional, las deformaciones, y el comportamiento dinámico de estructuras importantes de fábrica.

Las leyes de comportamiento no lineales provocan unos problemas de convergencia delicados en grandes mallas, incluso cuando están empleadas a un nivel académico.

Las fisuras que aparecen de una forma macroscópica en las estructuras de fábrica, pueden simularse en la malla incluso utilizando métodos elásticos lineales.

En la mayoría de los casos, se debería llevar a cabo una simulación del suelo aunque debe ser suficiente un número reducido de elementos elásticos lineales (Ver Fotos 8, 9, 10).

6.2 Comprobación de seguridad

Los resultados del análisis estructural pueden ser comparados directamente con la resistencia supuesta del material, obteniéndose así la primera evaluación sobre el margen de seguridad.

However, such safety margins may result an illusion if unexpected stress concentrations on some bearing elements may be caused by non homogeneous material, presence of cavities, separation of facings or walls (due sometimes to previous inaccurate restorations, as in the case of the Maino Tower in Pavia) (See Photo 11).

6.3 Experimental check

An experimental check with physical test on site may therefore be essential before final assessment conclusions based on the results of the analysis.

The flat jacks may therefore be again useful: their application in a cut (unfortunately not more than 200 mm from the surface) provides the existing state of stress; several applications showed that the results are very regular when the masonry is regular and uniform (e.g. Carmine Belltower in Pavia); otherwise, dangerous stress concentrations have been found. See Fig. 1, 2 and 3.

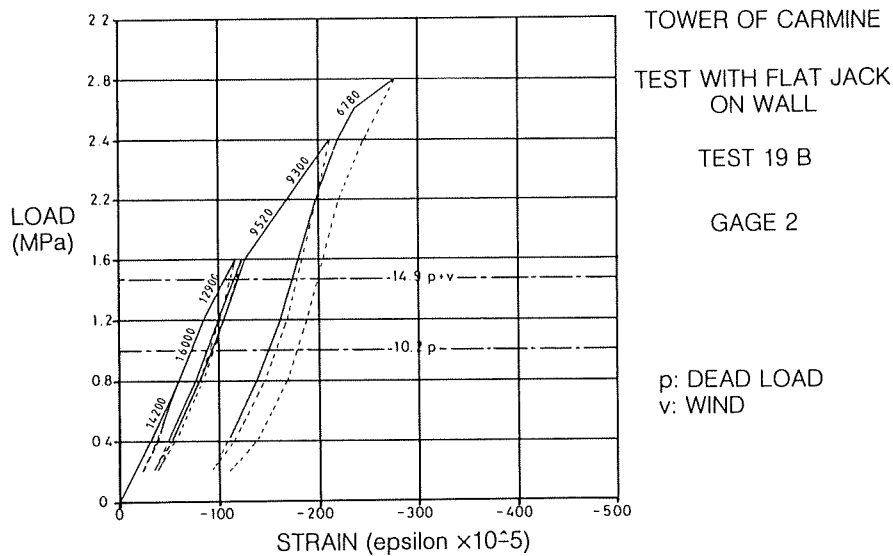


FIGURE 1

Campanile del Carmine. Stress-strain diagram obtained on site with double flat jacks. The levels represented by a discontinuous line show the state of stress for dead load (p) and wind (v). The test shows a good margin against permanent deformations.

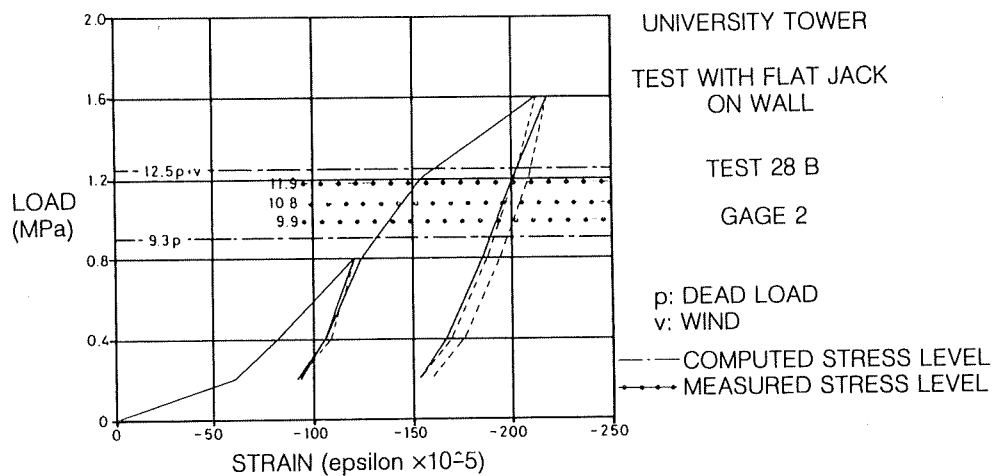


FIGURE 2

University Tower. Stress-strain diagram obtained by double flat jacks. The stress level (-o-o-) is higher than computed (-•-•-). The test shows accumulation of large permanent strains at every load application by wind.

Sin embargo, tales márgenes de seguridad pueden resultar falsos si se producen concentraciones de esfuerzos no esperados sobre algunos elementos estructurales, a causa de materiales no homogéneos, de la presencia de cavidades, de la separación de revestimientos o desenjarje de paredes, debido, como en el caso de la Torre Maino en Pavia, a restauraciones previas poco satisfactorias (Ver Foto 11).

6.3 Contraste experimental

El contraste experimental, empleando ensayos físicos in-situ, puede ser imprescindible, antes de llegar a una valoración final basada en los resultados del análisis.

Aquí los gatos planos pueden resultar útiles una vez más: su aplicación en el interior de un corte (que desafortunadamente no puede estar a más de 200 mm de la superficie) proporciona el estado tensional existente. Algunas aplicaciones muestran resultados muy homogéneos cuando la albañilería es uniforme y regular (como en el caso del Campanario de Carmine en Pavia); por otra parte se han localizado concentraciones peligrosas de esfuerzos. (Ver figs. 1, 2 y 3).

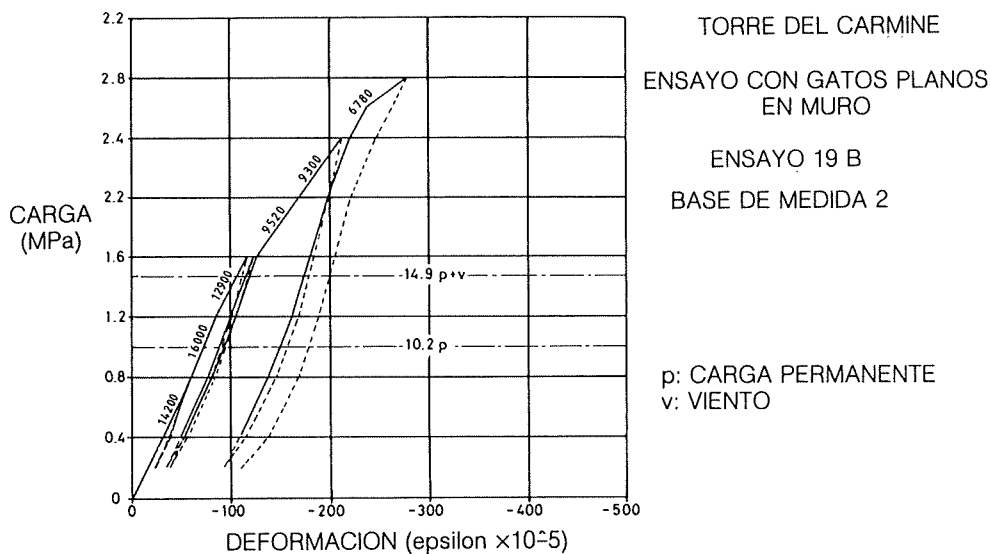


FIGURA 1

Torre del Carmine. Diagrama tensión-deformación obtenido in-situ con gatos planos dobles. Las líneas discontinuas indican el estado tensional para carga permanente (p) y viento (v). El ensayo muestra un margen suficiente frente a deformaciones permanentes.

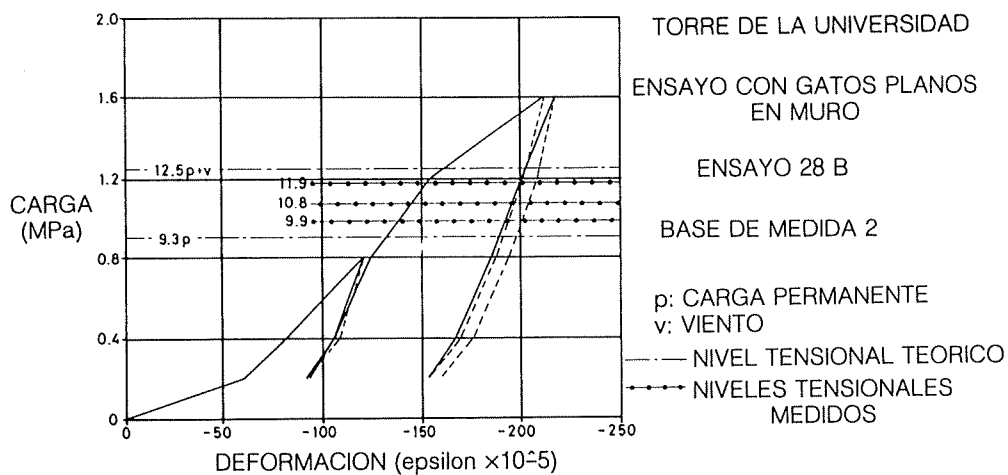


FIGURA 2

Torre de la Universidad. Diagrama tensión-deformación con gatos planos dobles. El nivel tensional (—○—○—) es mayor que el teórico (—•—•—). El ensayo muestra la acumulación de altas deformaciones permanentes en cada aplicación de la carga de viento.

Similar techniques for the measure on site of the state of stress inside thick walls have been implemented (overcoring, doorstopper), but at present the procedure is suggested only for homogeneous materials. Finally, a convincing check of the state of stress resulting from the analysis may be the detection of cracks where high tensile stresses exceed the tensile strength. Such a check has been possible in some cases (Brunelleschi Dome in Florence); then the complementarity of numerical analysis and of physical testing allows a satisfactory level of reliability in the diagnosis (See Photo 12).

7 DYNAMIC DIAGNOSIS

A new, challenging method of diagnosis is dynamic identification.

Natural frequencies and modes of vibration depend on the elastic properties of each part of a structure.

If the dynamic behaviour deviates from that of a homogeneous body, it means that some parts have different elastic properties; they may show the equivalent weak properties of a damaged material, of a zone weakened by cavities or cracks, etc.

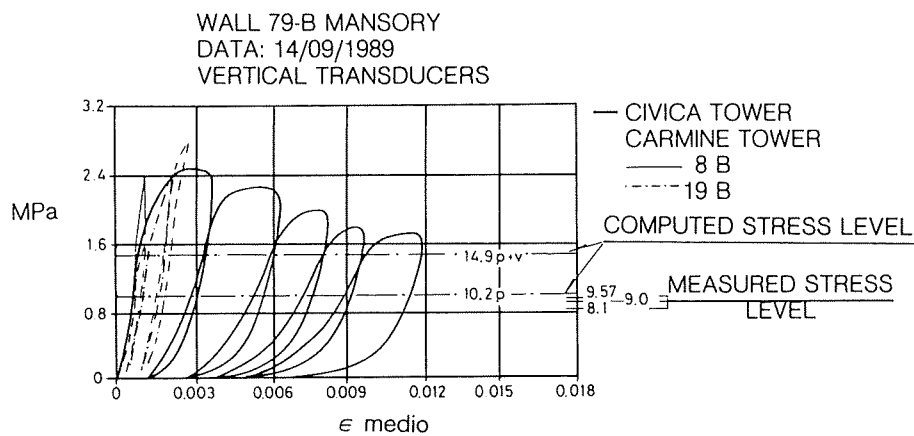


FIGURE 3

Campanile del Carmine. Computed stress Level and measured stress level (—•—•—; flat jacks) compared with the stress-strain diagram obtained by laboratory tests on the masonry of the collapsed Civic Tower.

The identification of such zones would be precious, and would allow a limitation of the strengthening interventions to the parts of the building which really need it.

Another challenging feature of the technique would be the possibility of a diagnosis without artificial dynamic excitation; in this direction are in fact oriented the present tests in progress on the Fraccaro Tower in Pavia (See Fig. 4 and 5).

The hope that the measurements may be accurate enough under simple noise (light traffic, light wind, etc.) would open the method to the preliminary diagnosis of unknown structures, before any other investigation requiring even a small amount of action on it.

Moreover, the procedure seems to be particularly promising for historical buildings, because in them the mechanical properties of the masonry may vary much more than those of the materials of a new structure.

The tests carried out so far in cooperation with CRIS-ENEL on the tower seem to show the following:

- Under simple noise five modes of vibration are recorded with an accuracy similar to that obtained with artificial excitation (vibrodyne).
- the first frequency is nearly insensitive to local weaknesses along the tower.
- the second and third flexural mode are sensitive to weaknesses located where they have the maximum curvature (as expected).
- the torsional mode is sensitive to weaknesses at every level.
- the complete knowledge of the experimental modes of vibration is sufficient for a first dynamic identification suitable for a preliminary diagnosis.
- favorable effects of strengthening may be recorded.

Técnicas similares han sido empleadas para medir in-situ los esfuerzos en el interior de muros de gran espesor (*Técnicas de "overcoring", y "doorstopper"*), pero por ahora el procedimiento se recomienda solamente para materiales homogéneos.

Por último, una comprobación adecuada del estado de los esfuerzos que surgen del análisis, puede ser la detección de fisuras donde los esfuerzos de tracción sobrepasan la resistencia a tracción. En algunos casos esta comprobación ha sido posible (La Cúpula Brunelleschi en Florencia); así la complementaridad del análisis numérico y los ensayos físicos permite conseguir un nivel satisfactorio de fiabilidad en la diagnosis (Ver Foto 12).

7 DIAGNOSIS DINAMICA

Un nuevo método de diagnosis es la identificación dinámica. Las frecuencias naturales y los modos de vibración son función de las propiedades elásticas de cada parte de la estructura.

Si el comportamiento dinámico se desvía del de un cuerpo homogéneo, esto quiere decir que algunas partes tienen distintas propiedades elásticas; y pueden mostrar la misma debilidad que un material dañado, o que una zona debilitada por cavidades o fisuras, etc.

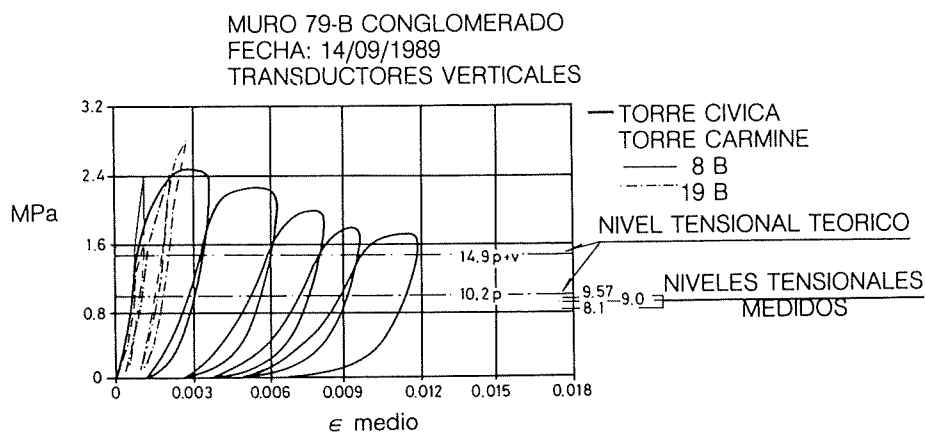


FIGURA 3

Torre de Carmine. Nivel tensional teórico y nivel tensional medio (—•—•—; gatos planos) comparado con el diagrama de tensión-deformación obtenido mediante ensayos de laboratorio sobre la fábrica de la Torre Civica colapsada.

La identificación de tales zonas sería de suma importancia, y permitiría restringir la disposición de refuerzos a las partes del edificio que realmente lo necesitan.

Otro aspecto importante de esta técnica sería la posibilidad de una diagnosis sin excitación dinámica artificial; en esta línea están orientados los ensayos que actualmente se están llevando a cabo en la Torre Fraccaro en Pavia. (Ver fig. 4 y 5)

La esperanza de que las medidas sean lo suficientemente precisas bajo ruido blanco (tráfico ligero, viento débil, etc.) abriría este método a la diagnosis preliminar de estructuras desconocidas, y se situará por delante de cualquier otro tipo de investigación.

Además, el procedimiento parece ser particularmente prometedor para los edificios históricos, ya que las propiedades mecánicas de la obra de fábrica pueden variar mucho más que las de una estructura nueva.

Los ensayos que se están llevando a cabo junto con CRIS-ENEL sobre las torres indican lo siguiente:

- Bajo ruido blanco, pueden ser registrados cinco modos de vibración con una precisión similar a la obtenida con excitación artificial (Vibrodyne).
- La primera frecuencia es casi insensible a las debilidades locales en toda la torre.
- El segundo y tercer modo flexional son sensibles a debilidades localizadas donde existe una curvatura máxima (como era de esperar).
- El modo de torsión es sensible a debilidades en todos los niveles.
- El conocimiento completo de los modos experimentales de vibración es suficiente para la primera identificación dinámica, y adecuado para una diagnosis preliminar.
- Pueden ser registrados los efectos favorables del refuerzo.

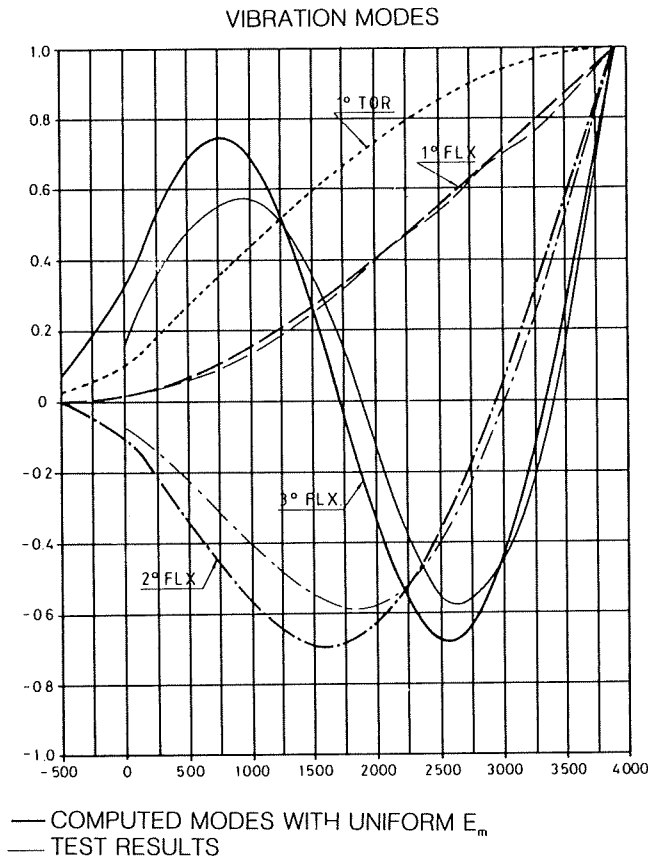


FIGURE 4

Dynamic diagnosis. Comparison between the theoretical (1st, 2nd, 3rd flexural, 1st torsional) and experimental modes of vibration (3 flexural modes) of the Fraccaro Tower. The 2nd and 3rd mode show considerable differences from theory.

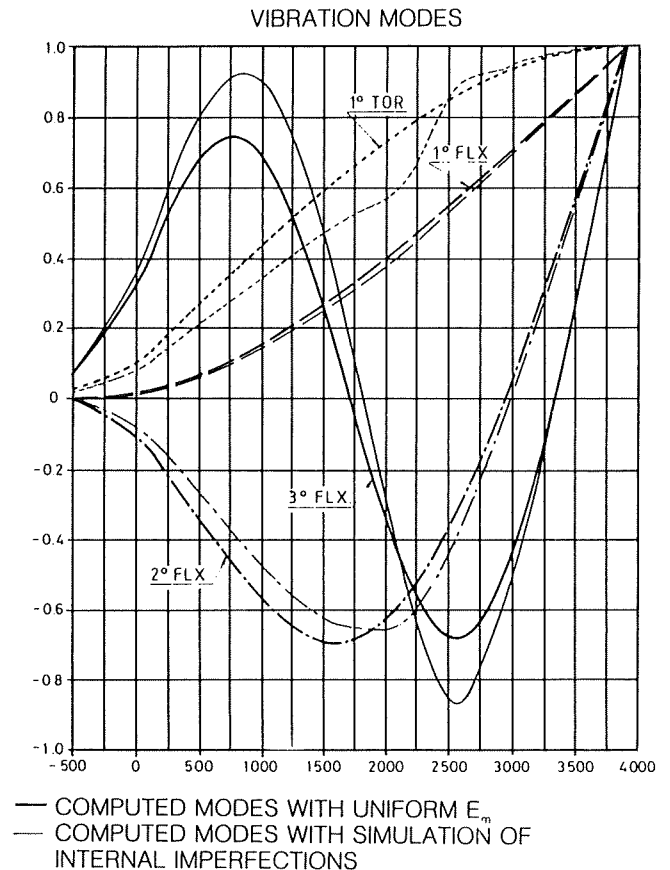


FIGURE 5

Sensitivity analysis. Effects of an increase of deformability (e.g. cavities, at the level 22 to 25 m) on the first 4 modes of the Fraccaro Tower, in comparison with the theoretical modes of vibration.

8 MONITORING

The deviation of some measured quantities during a continuous monitoring may be a matter of warning about the structural behaviour.

Very complex buildings, having however an expected ductile behaviour, may live under long term control, provided that the «physiological» behaviour has been recorded and warning functions have been accordingly established (See Photo 13).

8.1 Preliminary survey

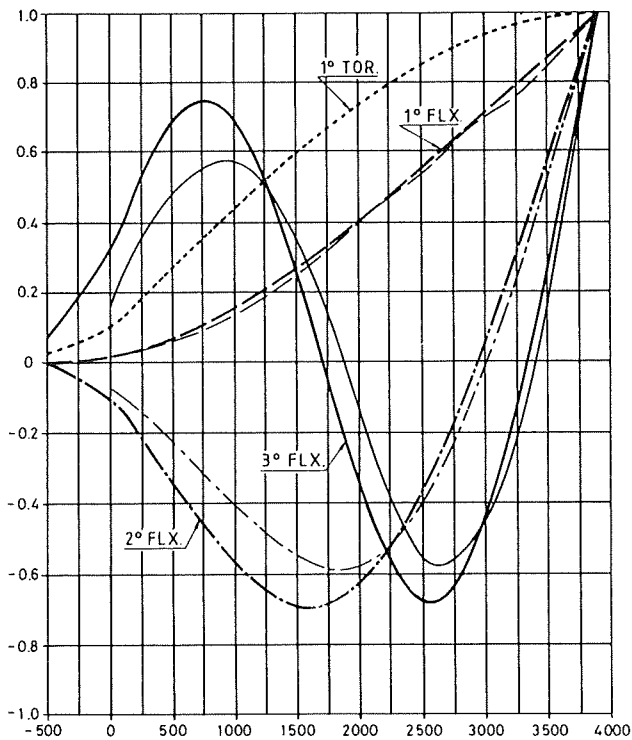
A monitoring project shall follow a preliminary investigation of the actual pathology of the structure (leaning, cracks, etc.); the investigations detects points and quantites to be monitored.

A preliminary numerical analysis may also be useful in calling the attention on highly stressed points, where cracks or spalling may appear.

8.2 Instruments

The instruments shall measure not only the expected effects of the actions (displacements, deformations, velocities, accelerations, etc.), but also the original actions (temperatures, radiation, wind, vibrations, earthquakes, water table, etc.).

MODOS DE VIBRACION

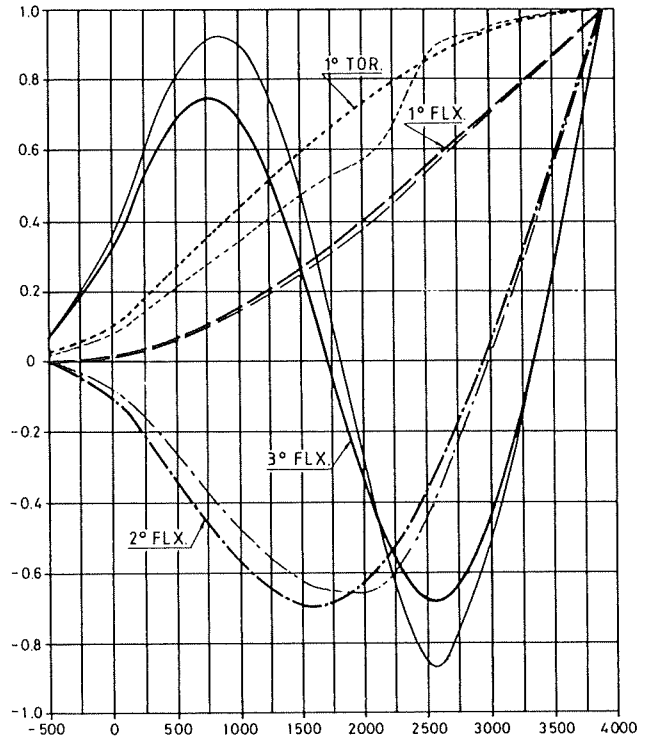


— MODOS TEORICOS CON E_m UNIFORME
 - - - RESULTADOS DE ENSAYO

FIGURA 4

Diagnóstico dinámico. Comparación entre los modos teóricos (1º, 2º, 3º flexión, 1º torsión) y modos experimentales de vibración (3 modos en flexión) de la Torre Fraccaro. El 2º y el 3º modo muestran diferencias considerables con respecto a la teoría.

MODOS DE VIBRACION



— MODOS TEORICOS CON E_m UNIFORME
 - - - MODOS TEORICOS CON SIMULACION DE IMPERFECCIONES INTERNAS

FIGURA 5

Análisis de sensibilidad. Efectos de un aumento de deformabilidad (p.e. cavidades, al nivel 22 a 25 m.) sobre los 4 primeros modos de la Torre Fraccaro, en comparación con los modos teóricos de vibración.

8 SEGUIMIENTO

La desviación de algunas medidas durante el seguimiento continuo puede proporcionar un aviso sobre el comportamiento estructural.

Edificios muy complejos, en los que se prevee un comportamiento dúctil, pueden permanecer bajo control a largo plazo, siempre que el comportamiento "fisiológico" haya sido registrado y se hayan establecido las funciones de alarma (Ver Foto 13).

8.1 Inspección preliminar

Un proyecto de seguimiento debe comenzar después de una inspección preliminar sobre la patología actual de la estructura (inclinación, fisuras, etc.); la investigación detecta los puntos y magnitudes a controlar.

Un análisis numérico preliminar puede ser útil también, para llamar la atención sobre puntos sometidos a grandes esfuerzos, en los que podrían producirse fisuras y desprendimientos.

8.2 Instrumentos

Los instrumentos deben medir tanto los efectos esperados de las acciones (desplazamientos, deformaciones, velocidades, aceleraciones, etc.) como las acciones originales (temperaturas, radiación, viento, vibraciones, terremotos, nivel freático, etc.).

The instruments should use different physical phenomena, in order to provide a certain amount of redundancy.

Levellers may measure differential settlements with a sensitivity of 1/100 mm; (See Photo 14).

Telecoordinometers may measure horizontal displacements of points with reference to a pendulum, with a sensitivity of 1/100 mm; they are based on the use of photocells; (See Photo 15).

Electrooptical sensors of position may measure the coordinates of a target at a distance of more than 30m with an accuracy of 1 mm;

Deformeters (potenciometric) may measure relative displacements or crack openings of 1/100 mm; (See Photo 16).

Accelerometers and seismometers may measure accelerations and velocities due to normal use (noise) and be triggered for the record of strong winds or earthquakes when they occur.

8.3 Choice of the system

Great importance should be given to the choice of the acquisition system, of the transmission system and to the processing system and data base. Only highly efficient systems may ensure an appropriate processing of the extremely large number of data obtained by long term monitoring, and provide a rapid decision process in case of alarming behaviour.

Los instrumentos deben utilizar fenómenos físicos distintos, para suministrar un cierto grado de redundancia.

Niveles: pueden medir asentamientos diferenciales con una sensibilidad de 1/100 mm. (Ver Foto 14).

Telecoordinómetros: pueden medir los desplazamientos horizontales de puntos con referencia a un péndulo, con una sensibilidad de 1/100 mm; se basan en un sistema fotoeléctrico. (Ver Foto 15).

Sensores electroópticos de posición: pueden medir las coordenadas de un objeto a una distancia mayor de 30 m con una precisión de 1 mm.

Medidores de deformación: (transductores potenciométricos) pueden medir desplazamientos relativos o aberturas de fisuras de 1/100 mm. (Ver Foto 16).

Acelerómetros y geófonos: pueden medir aceleraciones y velocidades debidas al uso normal (ruido) y ser accionados para registrar vientos fuertes y terremotos en caso de que ocurran.

8.3 Elección del sistema

Hay que dar mucha importancia a la selección del equipo a comprar, del sistema de transmisión y del proceso de datos. Unicamente los sistemas altamente eficaces pueden asegurar un proceso adecuado de la gran cantidad de datos obtenidos a través de un seguimiento a largo plazo, y así proporcionar un sistema que permita la toma de decisiones rápidas en el caso de un comportamiento alarmante.

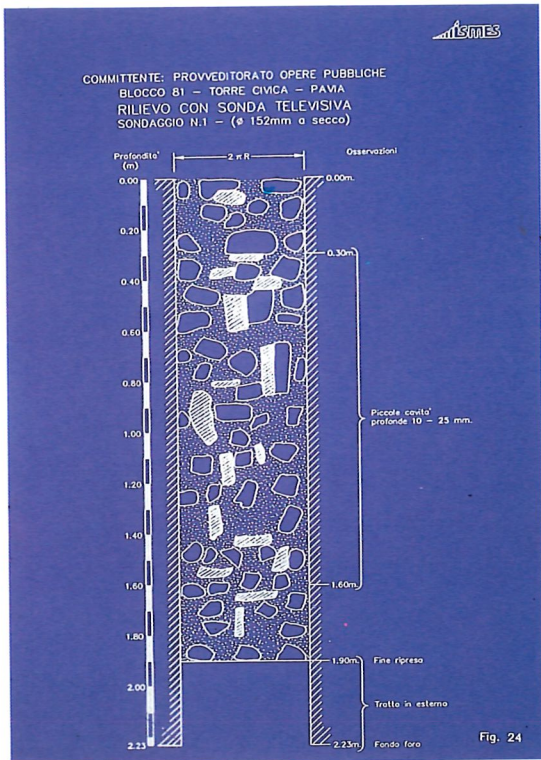


Foto 5. Procesado de la superficie del hueco después de la endoscopia.
 Photo 5. Processing of the surface of the core after endoscopy.

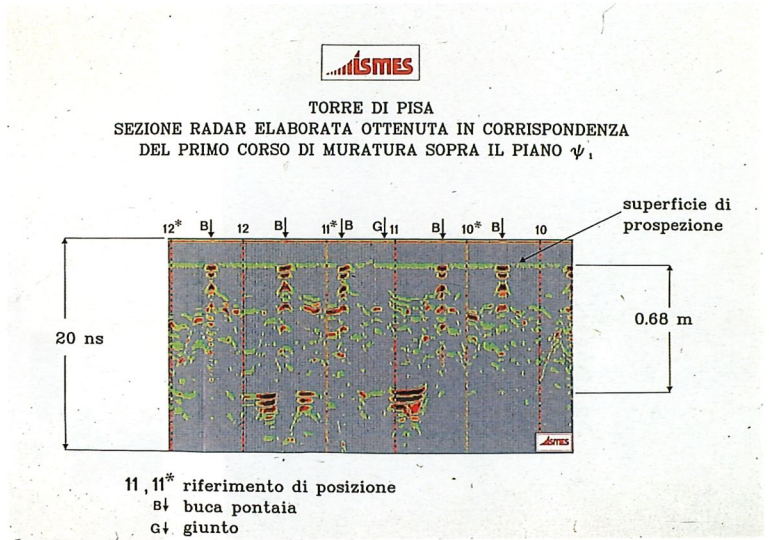


Foto 6. Torre inclinata de Pisa. Investigación en radar; las cavidades (buche pontaie) se identifican claramente.
 Photo 6. Leaning Tower of Pisa. Radar investigation; cavities (buche pontaie) are clearly identified.

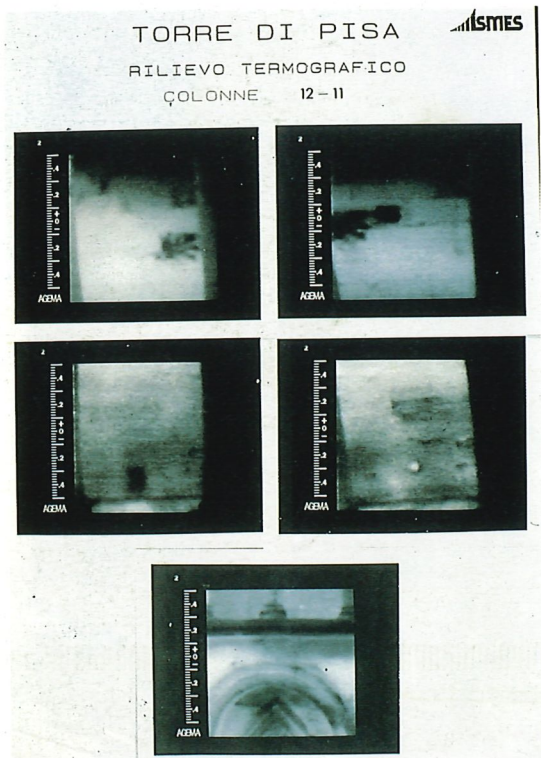


Foto 7. Pisa. Termografía; las cavidades (buche pontaie) se identifican claramente.
 Photo 7. Pisa. Thermography; the cavities (buche pontaie) are clearly identified.

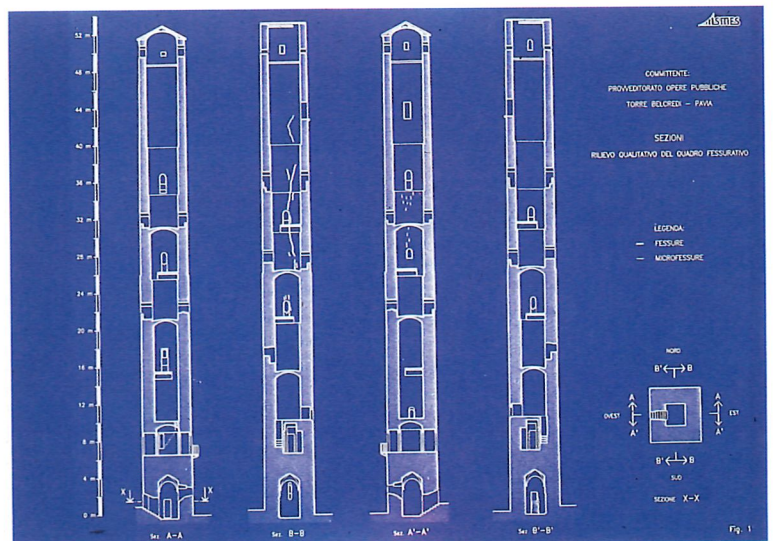


Foto 8. Pavia. Inspección cuantitativa de una Torre medieval.
 Photo 8. Pavia. Quantitative survey of a medieval tower.



Foto 1. Pavia. Las Torres Medievales de la Universidad (Maino y Fraccaro).

Photo 1. Pavia. The medieval Towers of the University (Maino and Fraccaro).



Foto 2. La Catedral y la Torre Civica colapsada en Pavia en 1989.

Photo 2. The Cathedral and the Civic Tower collapsed in Pavia in 1989.



Foto 3. Sección que muestra la fábrica de la Torre colapsada: capa de ladrillo y relleno de cascotes.

Photo 3. Section showing the masonry of the collapsed Tower: brick facing and rubble masonry infill.



Foto 4. Ensayo a compresión a escala real de la fábrica de la Torre colapsada (Departamento de Mecánica Estructural, Pavia).

Photo 4. Full scale compression test of the masonry of the collapsed Tower. (Structural Mechanics Department-Pavia).

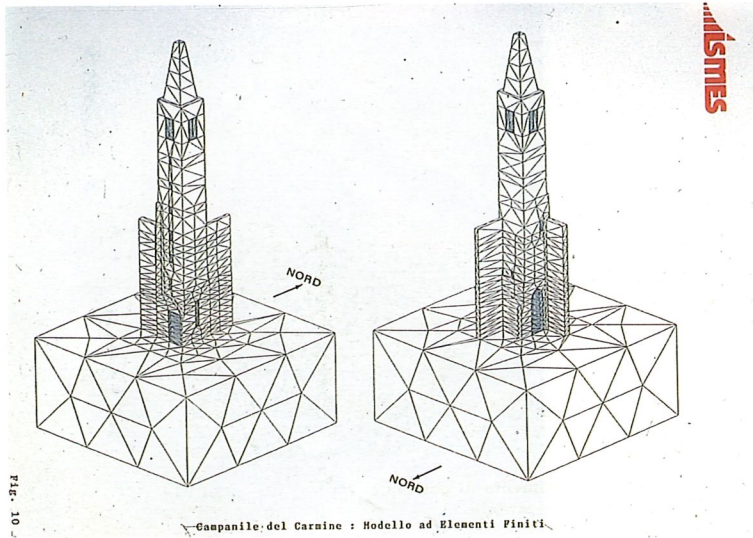


Foto 9. Pavia. Modelo numérico (FEM) de la Torre del Carmine con cimentación y terreno.
 Photo 9. Pavia. Numerical model (FEM) of the Campanile del Carmine with foundation and soil.

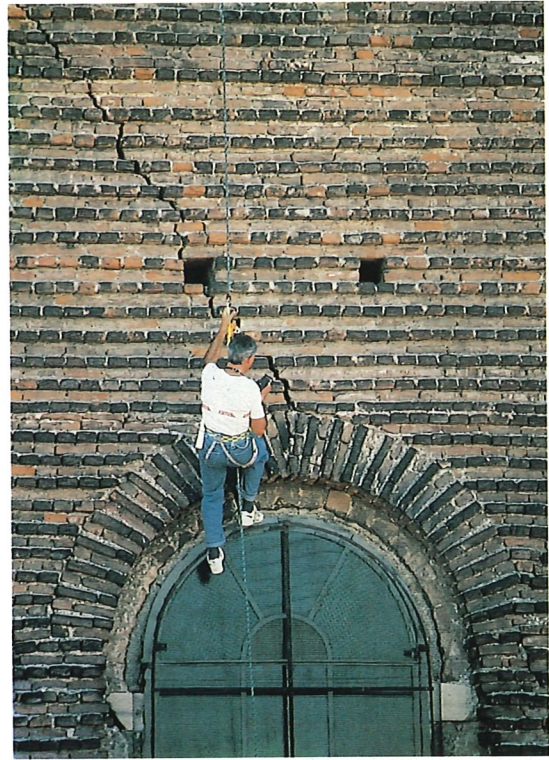


Foto 11. Pavia, Catedral. Reconocimiento de la patología de la cúpula.
 Photo 11. Pavia, Cathedral. Survey of the pathology of the dome.

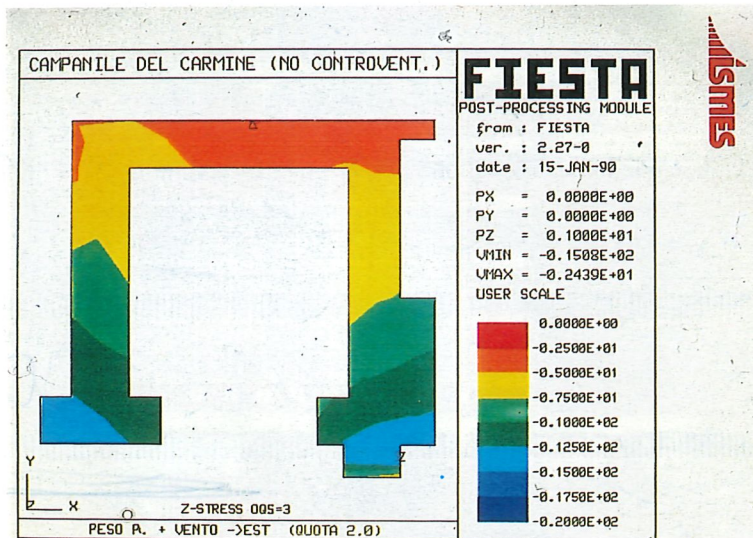


Foto 10. Pavia. Torre del Carmine; curvas de nivel del estado tensional de la sección horizontal.
 Photo 10. Pavia. Campanile del Carmine; contours of the state of stress of a horizontal section.

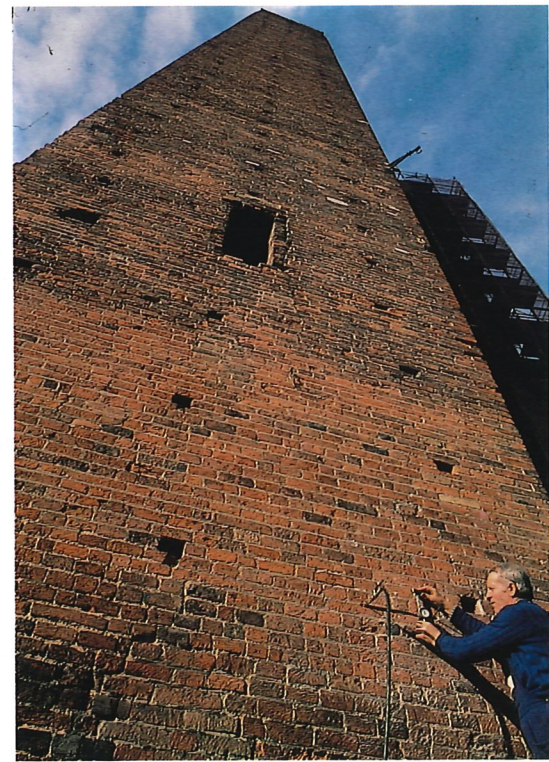


Foto 12. Pavia, Torre medieval. Gatos planos aplicados para la medida del estado tensional.
 Photo 12. Pavia, medieval towers. Flat jacks applied to the measurement of the state of stress.

ISMES

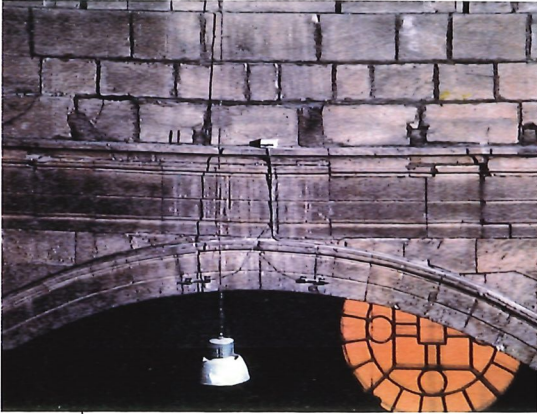


FOTO 15 - DUOMO DI PAVIA : Deformometri DEF015/A e DEF016/A

Foto 13. Seguimiento de fisuras mediante transductores inductivos de deformación inductivos (Catedral de Pavia).

Photo 13. Monitoring of cracks by inductive deformometers (Pavia's Cathedral).

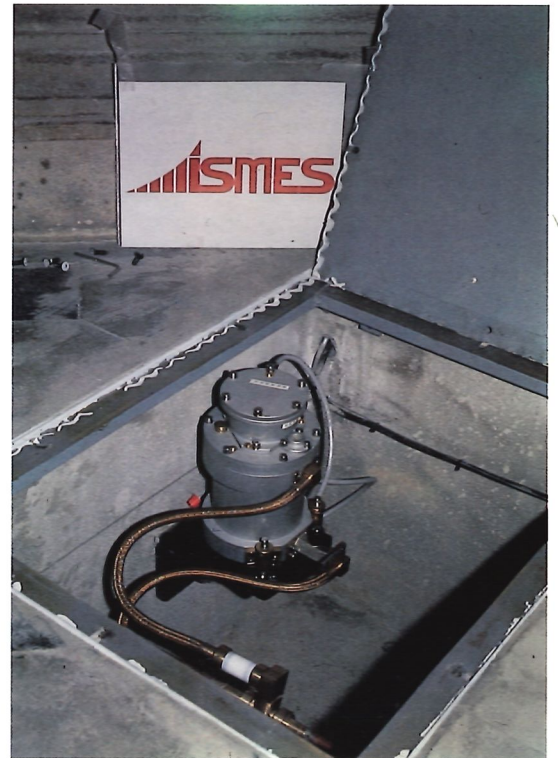


Foto 14. Medidores de nivel aplicados en la base de la cúpula.

Photo 14. Capacitive levelmeters applied at the basis of the dome (Pavia's Cathedral).

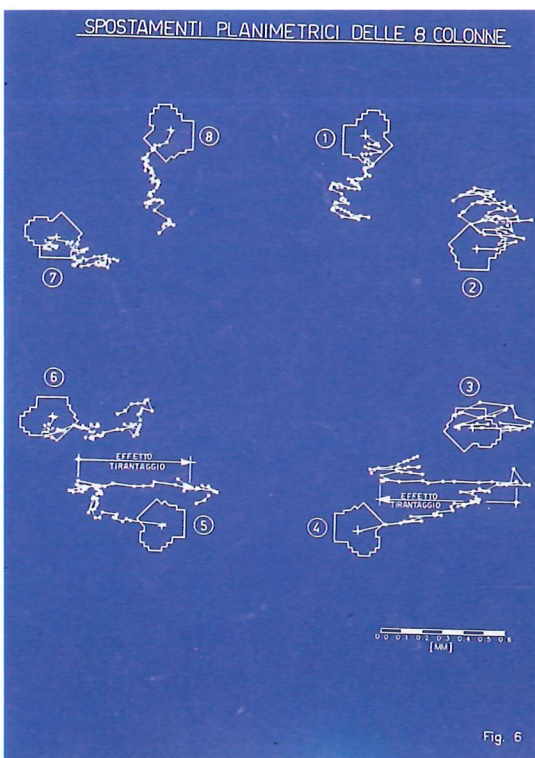


Foto 15. Registro de los telecoordinómetros aplicados a la medida de los movimientos horizontales de las 8 columnas de la cúpula. (Pavia).

Photo 15. Records of telecoordinometers applied to measure the horizontal movements of the 8 piers of the dome. (Pavia).



Foto 16. Sistema de seguimiento (Pavia). Diagrama de las lecturas registradas automáticamente durante 24 horas.

Photo 16. Monitoring system (Pavia). A 24 hours diagram of readings automatically plotted on the display.

Relación de personal titulado

Arquitectos

Jalvo García, Jaime
Luzón Canovas, Jose M.^a

Ingeniero Aeronáutico

Cerdó Alonso-Misol, Gonzalo

Ingeniero Agrónomo

Valdés Tamames, Begoña

Ingenieros de Caminos

Acón Robleda, Miguel Angel
Arroyo Pérez, José Alberto
Avalos Brunetti, Hugo Eduardo
Calavera Ruíz, José
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
Delibes Liniers, Adolfo
Díaz Lozano, Justo
Espinosa Espinos, José
Fernández Gómez, Jaime Antonio
Ferrer Serafi, Carles
Ferrerías Eleta, Román
Gómez Álvarez, Mercedes
González González, Juan José
González Valle, Enrique
Hostalet Alba, Francisco
Izquierdo Bernaldo de Quiros, Jose M.^a
Jordan de Urries de la Riva, Jorge
Ley Urzaiz, Jorge
Penón Molins, Eduardo
Rodríguez Moragón, Julio
Sirvent Sirvent, Enrique
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen

Ingenieros Civiles

Arias Brostella, Carlos Alfredo
Jai, Jamaledine
Pulgar Allendes, Jorge Osvaldo

Ingeniero I.C.A.I

Marín Estevez, Gonzalo

Ingenieros Industriales

Alvárez Cabal, Ramón Amado
Aparicio Puig, José Antonio
Bueno Bueno, Jorge
Durán Boldova, José Miguel
Pi Saenz de Heredia, Cristobal
Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Ingeniero de Montes

Martínez Lorente, José Alberto

Ingeniero Naval

Vázquez Domínguez, Juan Manuel

Licenciados en Ciencias Físicas

Díaz Paniagua, Carlos
Rueda Colina, Gonzalo María

Licenciados en Ciencias Geológicas

Blanco Zorroza, Alberto
Massana Mila, Joan
Serrano Martín, Luis

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María
López Sánchez, Pedro
Morgado Sánchez, Jose Carlos
Rodríguez-Maribona Gálvez, Isabel Ana
Vaz Pardal, María Rosario

Licenciada en Geografía e Historia

Calavera Vaya, Ana María

Arquitectos técnicos

Amigot Fernández, Eduardo
Cervera García, Eduardo
Fernández de Caleyá Molina, Alberto J.
Fuente Rivera, Jesús de la
García González, Antonio
Montejano Jiménez, María del Carmen
Muñoz Mesto, Angel
Oros Rey, Ana Isabel
Seisdedos Domínguez, Lucia
Vicente García, José Manuel

Ingenieros Técnicos Industriales

Alonso Miguel, Felix Benito
Díaz-Trechuelo Laffon, Antonio
Gómez-Gómez, Angel Manuel
González Carmona, Manuel
Madueño Morano, Antonio
Rodríguez Delgado, José Manuel
Sánchez Orgaz, Miguel Angel

Ingeniero Técnico Industrial Químico

Fernández París, José Manuel

Ingenieros Técnicos de Minas

Ballesteros Peinado, Luis Alberto
Santacoloma Cabero, Juan Ignacio
Sillero Arroyo, Andrés

Ingenieros Técnicos de Obras Públicas

Alañón Juárez, Alejandro
Aranda Cabezas, Luis
Blanco García, Fernando
Carrero Crespo, Rafael
Estebán García, Juan José
Fernández Corredera, Carlos
González Isabel, Germán
González Nuño, Luis
Mata Soriano, Juan Carlos
Montiel Sánchez, Ernesto
Muñoz Jiménez, José Luis
Muñoz Mesto, Angel
Pardo de Agueda, Juan Luis
Rosa Moreno, José Andrés
Rozas Hernando, José Juan
Sánchez Vicente, Andrés

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Barragán Bermejo, M.^a Vicenta
Carreras Ruíz, Francisco
López-Canti Casas, Elisa
Vinagre Saenz de Tejada, Hilario

Profesores Mercantiles

González Álvarez, Vicente
Sampedro Portas, Arturo

Perito Mercantil

Cartiel Valverde, Antonio

Técnico en Informática

García Rodríguez, Juan Tomás

Topógrafo

Alquezar Falcetto, Ricardo

SERVICIO DE PUBLICACIONES

2.^a EDICION 1991

3.^a EDICION 1991



* De acuerdo con las Instrucciones EH-91 y EF-88, con referencia al EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990, ACI 318-89

ULTIMOS CUADERNOS PUBLICADOS

Cuaderno N.º 6 «Construcción y seguimiento de una gran obra de tierra».
Autores: C. CORRAL FOLGADO y J. ESPINOS ESPINOS.
Ingenieros de Caminos.

Cuaderno N.º 7 «Diagnóstico estructural y Rehabilitación de Edificios Históricos».
Autor: G. MACCHI.
Dr. Ingeniero Civil.

PROXIMOS CUADERNOS

Cuaderno N.º 8 «Estabilidad Estática de los Cerramientos de Fachadas de Fábrica».
Autor: J. M.º LUZON CANOVAS.
Arquitecto.

Cuaderno N.º 9 «Estructuras de Hormigón para el Año 2000».
Autor: T. TASSIOS.
Dr. Ingeniero Civil.

Cuaderno N.º 10 «Comportamiento de la Armadura Comprimida en Piezas Flectadas».
Autor: J. M. CORTES BRETON.
Dr. Ingeniero de Caminos.

"PROYECTO Y CALCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO PARA EDIFICIOS"

- Autor: J. CALAVERA.
- 2.ª Edición, 1991, de acuerdo con las Instrucciones EH-91 y EF-88, con referencia a EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990, ACI 318-89.

TOMO I CALCULO DE ESFUERZOS

- 568 páginas. • Encuadernación en gualflex. • 373 figuras. • 90 gráficos y tablas auxiliares.

TOMO II DIMENSIONAMIENTO Y DETALLES CONSTRUCTIVOS

- 871 páginas. • Encuadernación en gualflex. • 611 figuras. • 142 gráficos y tablas auxiliares.

Precio de la obra completa: 15.000 Ptas.

"CALCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACION"

- Autor: J. CALAVERA.
- 3.ª Edición, 1991, de acuerdo con la Instrucción EH-91, con referencia al EUROCODIGO EC-2, Model Code CEB-FIP 1990 y ACI 318-89. • 418 páginas. • Encuadernación en gualflex. • 40 tablas para el dimensionamiento directo de zapatas corridas y aisladas. • Precio: 7.000 Ptas.

"CALCULO, CONSTRUCCION Y PATOLOGIA DE FORJADOS DE EDIFICACION"

- Autor: J. CALAVERA.
- 4.ª Edición. • 678 páginas. • Encuadernación en gualflex. • 344 figuras. • 93 tablas y ábacos. • 16 ejemplos resueltos. • 159 referencias bibliográficas. • 188 detalles constructivos. • Precio: 6.770 Ptas.

"MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SOTANO"

- Autor: J. CALAVERA.
- 2.ª Edición. • 308 páginas. • Encuadernación en gualflex. • 26 gráficos y tablas auxiliares. • 22 tablas para el dimensionamiento directo. • Precio: 5.900 Ptas.

"TECNOLOGIA Y PROPIEDADES MECANICAS DEL HORMIGON"

- Autor: A. DELIBES.
- 266 páginas. • Encuadernación en gualflex. • AGOTADO. (Próxima edición 1992).

TRABAJOS PUBLICADOS EN REVISTAS

Nuestro INSTITUTO dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestros técnicos en diferentes revistas que por su número no pueden reproducirse aquí. Solicite relación de títulos si está interesado.

Precio de suscripción: 2.000 Ptas.

Los precios indicados son para entregas dentro del territorio español



INTEMAC

Monte Esquinza, 30, 4.º D. 28010 MADRID

Tels.: (91) 310 51 66. Télex: 49987 INTEM E - Fax: (91) 410 25 80