

P.P. Rossi

369

*Analisi delle condizioni
statiche delle strutture
murarie: indagini
conoscitive e
monitoraggio*

ANALISI DELLE CONDIZIONI STATICHE DELLE STRUTTURE MURARIE INDAGINI CONOSCITIVE E MONITORAGGIO

Pier Paolo Rossi
Ismes S.p.A. - Bergamo

ABSTRACT

The most important testing techniques used for a non-destructive evaluation of static conditions of masonry structures are presented in this paper.

The preliminary phase of the investigation includes a geometric survey, crack pattern investigation and an historical analysis. Attention is then given to determining the mechanical parameters of the masonry structures by using non-destructive or slightly-destructive tests. Most non-destructive tests give only qualitative results which can then be used as "quality indexes" of the masonry. The information obtained by these tests are presented with critical remarks. A reliable evaluation of the mechanical parameters of the masonry structures can be achieved only by employing slightly-destructive tests; for this purpose, emphasis is given to flat-jack testing techniques for determining the state of stress, deformability and strength characteristics of the structures. The important role of dynamic analysis and monitoring for evaluating the static behavior of existing masonry structures is also discussed.

1. PREMESSA

L'analisi delle condizioni statiche di un edificio di interesse storico e monumentale può essere condotta in modo coerente e corretto solo attraverso una conoscenza approfondita delle caratteristiche fisiche e meccaniche degli elementi strutturali ai quali sono affidate le funzioni portanti dell'edificio. Queste strutture portanti (pilastri, muri, archi e volte) sono realizzate con materiali e tecniche costruttive molto variabili da un'area geografica all'altra e le loro caratteristiche strutturali devono essere valutate caso per caso attraverso una attenta campagna di indagini diagnostiche.

L'approccio metodologico di norma adottato per l'analisi delle condizioni statiche di una struttura muraria esistente prevede una prima serie di indagini preliminari di tipo conoscitivo che comprende: il rilievo geometrico e fotogrammetrico, il rilievo dettagliato del quadro fessurativo e dei danneggiamenti che la struttura ha subito nel corso del tempo e l'analisi della storia di costruzione e utilizzo dell'opera. A questa prima fase di indagine, che consente già di evidenziare le principali problematiche strutturali, fa seguito una serie di indagini di tipo specialistico che hanno lo scopo di determinare i parametri atti a definire il comportamento statico dell'edificio.

Molto spesso le indagini diagnostiche sono condotte utilizzando unicamente tecniche di prova di tipo non distruttivo le quali risultano di semplice e rapida esecuzione. È opportuno tuttavia rilevare che l'impiego di sole tecniche di prova di tipo non distruttivo non è sufficiente a risolvere il problema strutturale in modo soddisfacente. I risultati ottenuti mediante queste tecniche di prova sono in generale di tipo qualitativo e forniscono solo una valutazione preliminare delle caratteristiche meccaniche della muratura attraverso la definizione di "indici di qualità" di tipo meccanico. Anche se queste prove non possono fornire valutazioni quantitative dei parametri meccanici, il loro impiego è comunque molto interessante in quanto consentono di acquisire preziose informazioni in merito alle caratteristiche di omogeneità della muratura e alla eventuale presenza di locali anomalie strutturali.

L'unico mezzo affidabile per la determinazione dei parametri che condizionano il comportamento statico di una struttura è quello di far ricorso a tecniche di prova di tipo leggermente distruttivo, le quali richiedono però alcuni interventi, anche se di modesta entità, sulle strutture murarie. E' necessario che questi interventi (carotaggi e tagli) siano di dimensioni tali da non perturbare il comportamento strutturale e che siano studiati in modo tale che al termine dell'indagine non resti alcun segno sulla superficie muraria. La lieve alterazione della struttura muraria deve essere consentita solo in fase transitoria.

Alle indagini diagnostiche si accompagna sovente l'installazione di strumenti di misura per il controllo del comportamento deformativo della struttura in funzione del tempo. Questo monitoraggio strutturale, oltre a garantire la sicurezza della struttura nelle varie fasi degli interventi di consolidamento, può essere considerato un mezzo di indagine molto affidabile per valutare le condizioni statiche dell'opera.

2. INDAGINI CONOSCITIVE

Prima di procedere alla determinazione dei parametri meccanici di una struttura in muratura è necessaria una approfondita conoscenza delle caratteristiche geometriche e architettoniche dell'opera. Si deve procedere in primo luogo ad un accurato rilievo geometrico che può essere realizzato attraverso misure tradizionali oppure con tecniche fotogrammetriche. Esso rende possibile l'identificazione di eventuali irregolarità presenti (deviazioni della verticalità, ecc.) dovute sia al disegno originale che il progettista ha voluto introdurre per ottenere effetti architettonici, sia alla cattiva esecuzione durante la costruzione.

Di particolare importanza si rivela il rilievo del quadro fessurativo delle strutture portanti dell'edificio. Un dettagliato rilievo dell'estensione e dell'apertura delle lesioni presenti permette una prima valutazione delle condizioni statiche della struttura ed il riconoscimento delle possibili cause di instabilità. La fig. 1 mostra una fase del rilievo del quadro fessurativo su una parete della Cattedrale di Pavia e sulla Torre del "Campanone" di Bergamo.

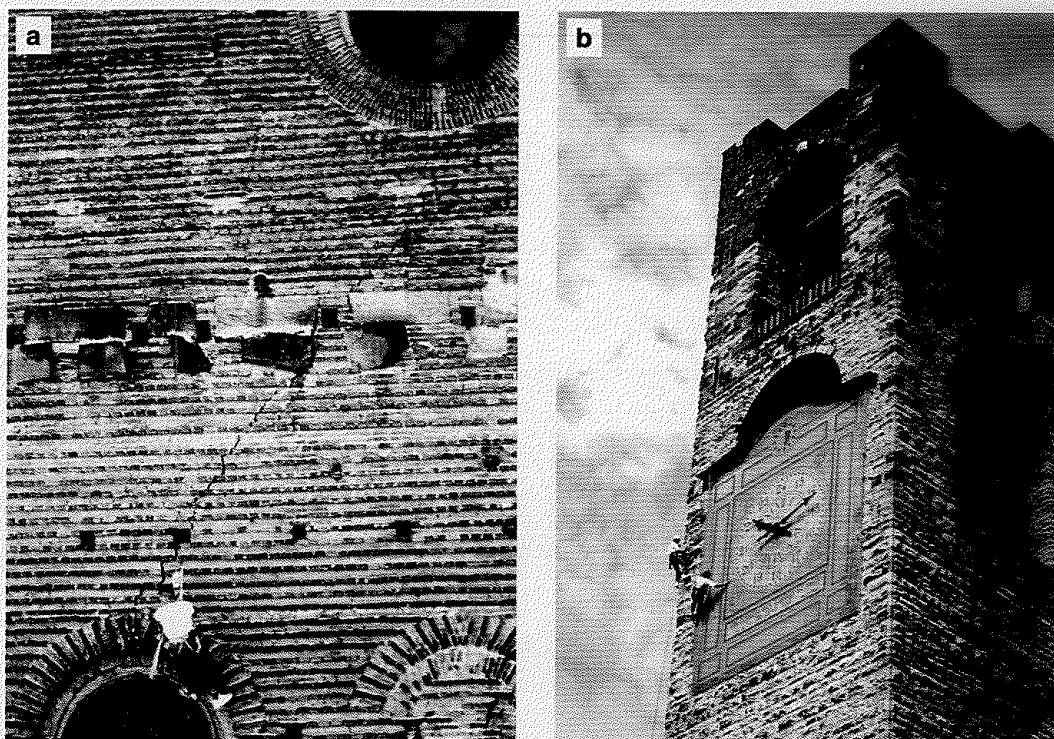


Fig. 1 - Rilievo del quadro fessurativo
a) Cattedrale di Pavia b) Torre del Campanone di Bergamo.

Di norma il rilievo geometrico viene esteso alle strutture di fondazione attraverso lo scavo di piccoli pozzetti esplorativi o mediante sondaggi a carotaggio continuo.

Non può infine essere dimenticata l'acquisizione di informazioni di carattere storico.

E' importante conoscere le fasi di costruzione dell'opera, le tecniche costruttive adottate, i materiali utilizzati e gli interventi subiti dalla struttura durante la sua vita. Le informazioni sulle fasi di costruzione e di utilizzo dell'opera possono rilevarsi di grande importanza per l'analisi del comportamento statico e per la definizione di ulteriori indagini da esperire.

3. PROVE NON DISTRUTTIVE

3.1 Misure soniche

Fra tutte le prove di tipo non distruttivo le misure soniche sono senza dubbio quelle utilizzate con maggior frequenza. La tecnica di prova è basata sulla generazione di impulsi sonici o ultrasonici in un punto della struttura per mezzo di un sistema a percussione o di un trasduttore elettrodinamico, collegato a sua volta ad un ricevitore.

L'elaborazione dei dati consiste nella misura del tempo che l'impulso impiega ad attraversare la sezione di materiale posta tra generatore e ricevitore e nell'analisi del segnale d'onda. Le onde ultrasoniche sono utilizzate preferibilmente per lo studio delle strutture continue, impiegando una metodologia di indagine già codificata nel caso di prove su strutture in calcestruzzo. Per le strutture murarie, che sono tipicamente disomogenee, è invece necessario utilizzare impulsi sonici, impiegando tecniche dello stesso tipo di quelle utilizzate su terreni e ammassi rocciosi.

Le prove soniche possono essere eseguite mediante l'applicazione di una massa battente su una superficie e la recezione del segnale sulla superficie opposta, oppure sulla stessa superficie. Posizionando i sensori a differenti altezze sullo stesso muro è possibile (ricorrendo al principio della riflessione

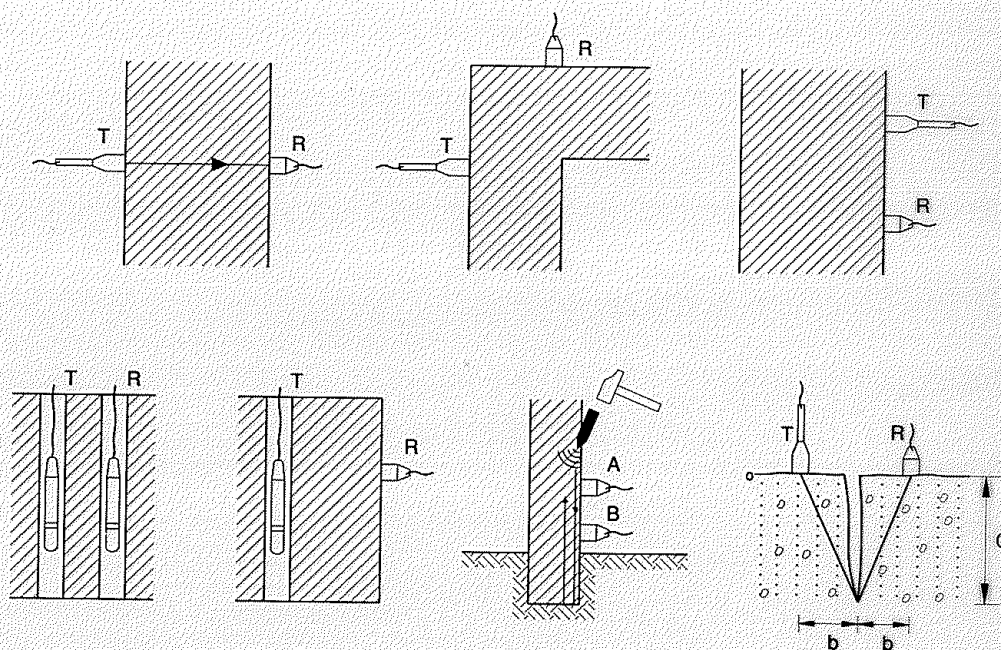


Fig. 2 - Misure soniche ed ultrasoniche: schemi di prova.

delle onde su superfici a contatto) stimare la profondità delle fondazioni. Se nella struttura da esaminare sono presenti fori di sondaggio, è possibile eseguire prove di down-hole (che ispezionano le muratura lungo il singolo foro) o cross-hole (che analizzano il tratto di muratura compresa tra due fori contigui). In Fig. 2 sono illustrati i possibili schemi di prova.

3.2 Tomografia sonora

Di maggiore interesse per lo studio delle caratteristiche strutturali degli edifici in muratura risulta la tomografia sonora, la quale fornisce un rilievo dettagliato della distribuzione della velocità sonora in una sezione piana della struttura oggetto di indagine. Il metodo consiste nella misura del tempo impiegato dagli impulsi sonici lungo varie direzioni che coprono uniformemente la sezione oggetto di indagine. La sezione della muratura viene schematizzata secondo una rete a maglia rettangolare e l'elaborazione dei dati viene eseguita nell'ipotesi che, in un campo di velocità non uniforme, gli impulsi sonici non si propagano in linea retta ma seguendo una linea curva a causa dei fenomeni di rifrazione.

La tomografia sonora, già ampiamente sperimentata nel campo delle grandi strutture in calcestruzzo, sta fornendo risultati molto interessanti anche nelle sue applicazioni alle strutture murarie. Questa tecnica è stata utilizzata con successo per lo studio delle caratteristiche strutturali dei pilastri della Basilica di S. Marco nell'ambito del programma di indagini che l'ISMES sta svolgendo per l'incarico del Magistrato alle Acque di Venezia (Ministero dei Lavori Pubblici). A titolo di esempio si riportano in Fig. 3 i risultati di una indagine tomografica eseguite su due pilastri della Basilica.

Si può chiaramente osservare che il pilastro 1, sul quale sono stati eseguiti interventi di consolidamento mediante iniezioni circa 30 anni fa, mostra alti valori di velocità sonora nella parte interna che è stata interessata dagli interventi di iniezione.

Le velocità rilevate sul pilastro 2, che non ha subito alcun intervento di consolidamento, sono invece molto più basse e sono un chiaro indice che le caratteristiche meccaniche di questa muratura sono più scadenti.

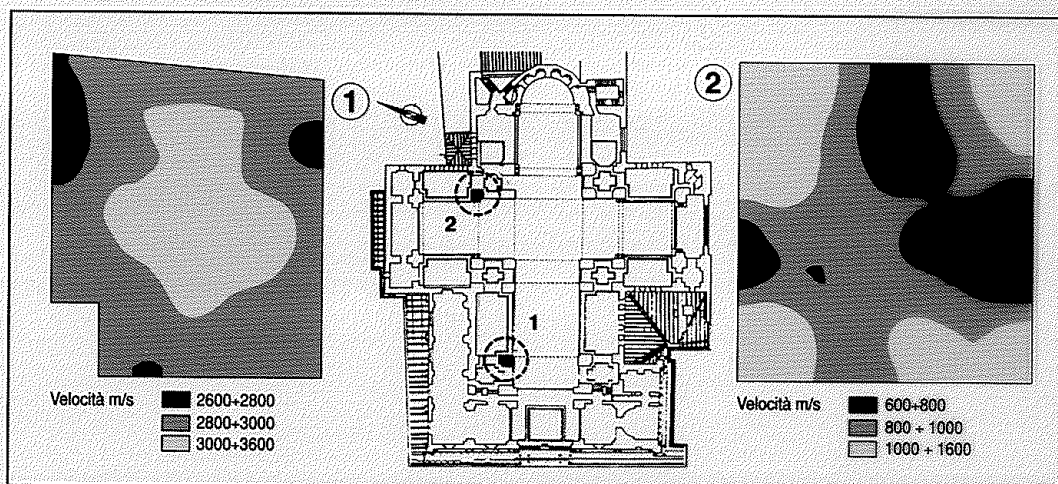


Fig. 3 - Risultati di una indagine tomografica su due pilastri della Basilica di S. Marco in Venezia.

3.3 Indagine radar

Altra importante tecnica di indagine di tipo non distruttivo per lo studio

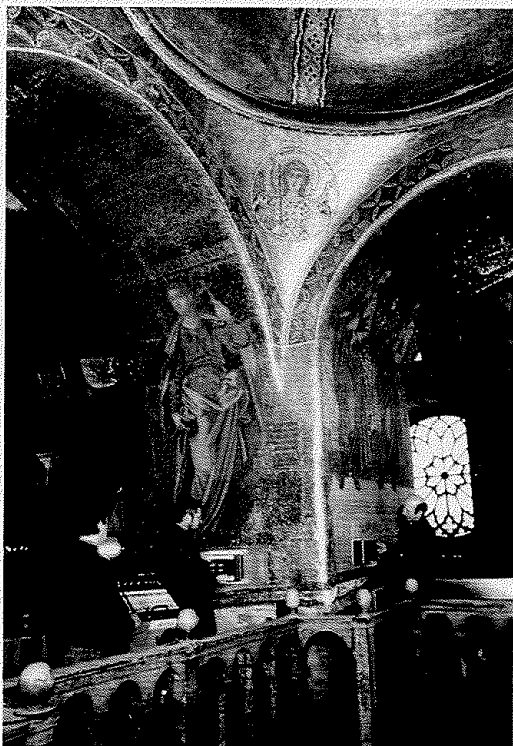


Fig. 4 - Indagine eseguita con tecnica radar su un pilastro della Basilica di S. Marco in Venezia.

delle caratteristiche strutturali delle murature si basa sull'impiego del radar. Questa tecnica utilizza onde elettromagnetiche di alta frequenza emesse attraverso un'antenna con impulsi di breve durata. Le onde vengono riflesse dalla superficie di contatto tra materiali di differenti costanti dielettriche e possono essere ricevute mediante un'antenna e trasformate in segnali elettrici.

E' possibile, con questa tecnica, determinare l'ubicazione delle superfici di separazione di materiali con costanti dielettriche diverse e quindi individuare la presenza di umidità, di cavità, di strutture metalliche, di tubazioni e di canne fumarie. Questa tecnica viene inoltre utilizzata per determinare la profondità del piano di imposta delle fondazioni di un edificio. In Fig. 4 è illustrata una fase dell'indagine con tecnica radar su uno dei pilastri della Basilica di San Marco.

3.4 Analisi termografiche

L'analisi termografica analizza la radiazione emessa durante un transitorio termico dovuto a fenomeni naturali oppure indotto sulla struttura da riscaldamento forzato. La radiazione termica è raccolta da apparati sensibili alle radiazioni infrarosse e trasformata in segnali elettrici, a loro volta convertiti successivamente in immagini a differenti tonalità di colore.

La termovisione è utilizzata per identificare, negli elementi strutturali ricoperti da intonaci, la presenza di anomalie costruttive.

Si rivela particolarmente interessante per lo studio di pareti affrescate, dove non è possibile recuperare campioni o utilizzare tecniche di prova che prevedano il contatto con le superfici delle strutture murarie.

Questa tecnica viene spesso impiegata per il rilievo della presenza di cavità, canne fumarie, tubazioni degli impianti idraulici e di riscaldamento e presenza di umidità.

È opportuno rilevare che la profondità di penetrazione di questa tecnica è solo di pochi centimetri per cui non rende possibile la ricerca di anomalie ubicate nella parte centrale della muratura.

4. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE STRUTTURE MURARIE

4.1 Carotaggi meccanici e rilievi con sonda televisiva

Le tecniche di prova di tipo non distruttivo descritte nel paragrafo precedente non sono sufficienti a determinare i parametri necessari per valutare le condizioni statiche di una struttura e per consentire la progettazione degli interventi di consolidamento. Una valutazione di questi parametri è possibile solo attraverso l'utilizzo di speciali prove meccaniche di tipo leggermente distruttivo le quali richiedono alcuni interventi sulle strutture murarie. Le prove devono essere di semplice e rapida esecuzione per ridurre il più possibile il costo delle indagini e per consentire un rapido ripristino delle condizioni originarie della muratura.

Per conoscere le caratteristiche strutturali dei differenti tipi di murature di cui è costituito un edificio è necessario eseguire carotaggi meccanici di piccolo diametro prelevando campioni nei punti più rappresentativi delle strutture portanti. Questa operazione diventa indispensabile nei casi molto frequenti in cui l'apparecchiatura muraria è composta da due paramenti esterni regolari e da un riempimento interno. Il carotaggio deve essere eseguito a rotazione utilizzando corone diamantate a parete sottile di diametro inferiore a 60 mm. Impiegando una attrezzatura di perforazione leggera e maneggevole, i carotaggi possono essere eseguiti anche in zone difficilmente accessibili.

L'operazione di carotaggio consente di estrarre campioni di materiale su cui possono essere eseguite prove di laboratorio; questo è particolarmente impor-

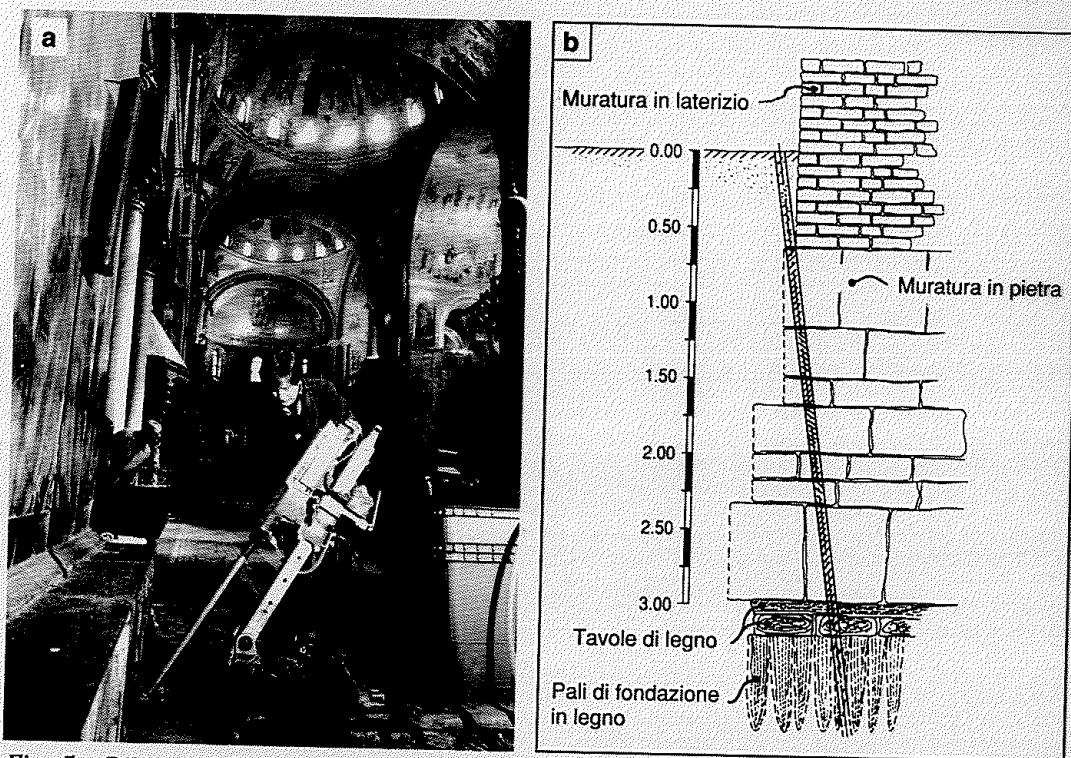


Fig. 5 - Rilievo delle strutture di fondazione dei pilastri della Basilica di S. Marco in Venezia mediante carotaggi meccanici a) Attrezzatura di perforazione b) Schema strutturale delle strutture di fondazione.

tante quando si vogliano identificare le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche dei materiali che compongono la muratura.

Con l'aiuto dei carotaggi meccanici è anche possibile eseguire un dettagliato rilievo geometrico e strutturale delle murature di fondazione dell'edificio. In Fig. 5 è visibile lo schema strutturale delle opere di fondazione dei muri perimetrali della Basilica di S. Marco in Venezia ricavato mediante l'impiego di carotaggi meccanici.

Le informazioni ottenute mediante il carotaggio meccanico vengono di norma integrate mediante l'esecuzione di una indagine eseguita con sonda televisiva a colori in grado di ispezionare con grande dettaglio tutta la superficie laterale del foro. Ciò permette di acquisire informazioni più dettagliate sulle caratteristiche delle murature, di localizzare e dimensionare i vuoti presenti e di analizzare la propagazione delle principali lesioni all'interno del corpo murario.

Le riprese realizzate possono anche esser registrate e archiviate in modo da consentire ulteriori analisi dopo avere effettuato la chiusura dei fori. In fig. 6 è visibile l'attrezzatura di indagine con sonda televisiva durante una fase delle prospezioni eseguite alla base di un pilastro della Basilica di S. Marco.

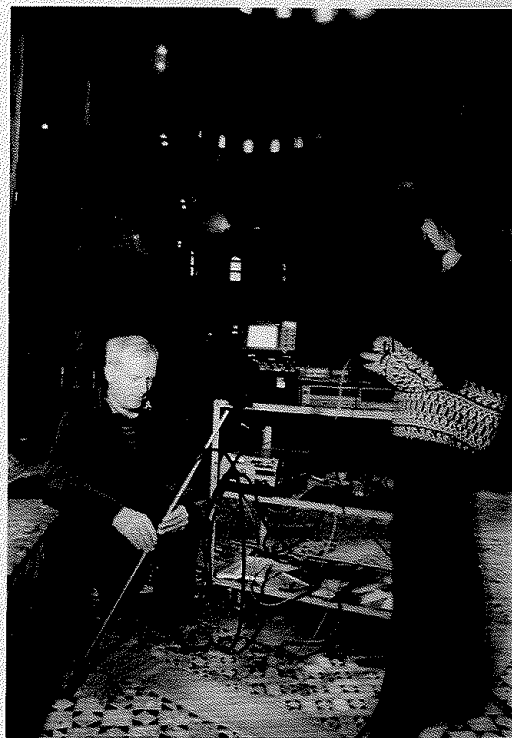


Fig. 6 - Prospezioni con sonda televisiva eseguite alla base di un pilastro della Basilica di S. Marco in Venezia.

4.2 Tecnica di prova con martinetto piatto

Dopo aver analizzato le caratteristiche strutturali dell'apparecchiatura muraria è indispensabile determinare i parametri che governano il comportamento meccanico della muratura. Le prove meccaniche di laboratorio eseguite sui campioni prelevati mediante i carotaggi meccanici possono fornire unicamente informazioni sulle caratteristiche dei materiali che compongono la muratura, ma non sono assolutamente in grado di fornire i parametri di deformabilità e resistenza della muratura nel suo complesso. Il problema della caratterizzazione meccanica delle murature può quindi essere risolto unicamente facendo ricorso a speciali prove meccaniche di tipo non-distruttivo. Un decisivo contributo in questo senso è stato fornito dall'ISMES attraverso la messa a punto di una interessante tecnica di prova basata sull'impiego di speciali martinetti piatti.

La prima applicazione di questa tecnica di prova per lo studio delle strutture murarie venne proposta dallo scrivente nel 1979 in occasione della campagna di indagini eseguita sul Palazzo della Ragione di Milano. Da quella prima

esperienza la tecnica ha subito continui sviluppi e miglioramenti e oggi può senza dubbio essere considerata il mezzo di indagine più affidabile per una analisi quantitativa delle caratteristiche meccaniche di qualunque tipo di muratura in laterizio o pietra anche molto irregolare.

Con l'ausilio di questa tecnica di prova è possibile acquisire preziose informazioni sul comportamento statico di una muratura, attraverso l'analisi dei seguenti parametri:

- misura dello stato di sollecitazione esistente nelle strutture murarie;
- determinazione delle caratteristiche di deformabilità;
- valutazione delle caratteristiche di resistenza a compressione.

Prima fase - Misura dello stato di sollecitazione

La prova per la determinazione dello stato di sollecitazione è basata sul rilascio tensionale causato da un taglio piano, normale alla superficie della muratura. In Fig. 7 sono illustrati le differenti fasi di prova. Due punti di riferimento sono applicati sulla superficie della muratura e si misura la distanza iniziale tra i due punti. Viene quindi eseguito un taglio perpendicolare alla superficie

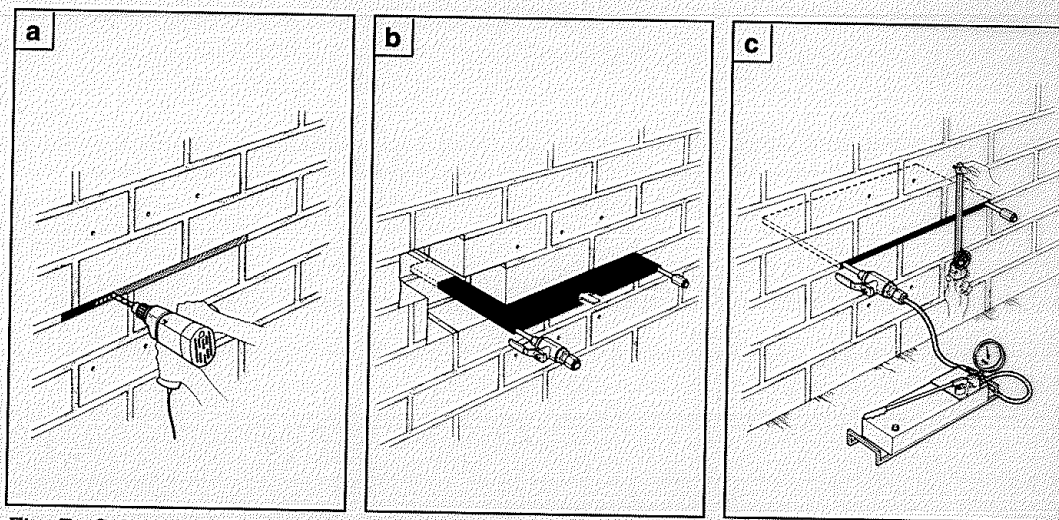


Fig. 7 - Schema delle fasi di prova con martinetto piatto per la misura dello stato di sollecitazione nelle murature in laterizio.

della muratura il quale provoca un rilascio delle tensioni con conseguente parziale chiusura del taglio. Viene inserito nel taglio un sottile martinetto piatto e la pressione all'interno viene gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata durante la fase di taglio. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto è uguale alla sollecitazione preesistente nella muratura in direzione normale al piano del martinetto. Il valore ottenuto deve essere corretto mediante un coefficiente che tiene conto del rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio e dell'influenza del bordo di saldatura.

Il valore dello stato di sollecitazione nel punto di prova è dato da:

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot K_a$$

dove:

p = pressione dell'olio all'interno del martinetto piatto

K_m = costante del martinetto che deve essere determinata mediante prova di taratura in laboratorio

K_a = A_j/A_c (rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio)

I martinetti piatti utilizzati hanno forme e dimensioni diverse per potersi adattare ad ogni tipo di muratura, come illustrato in Fig. 8.

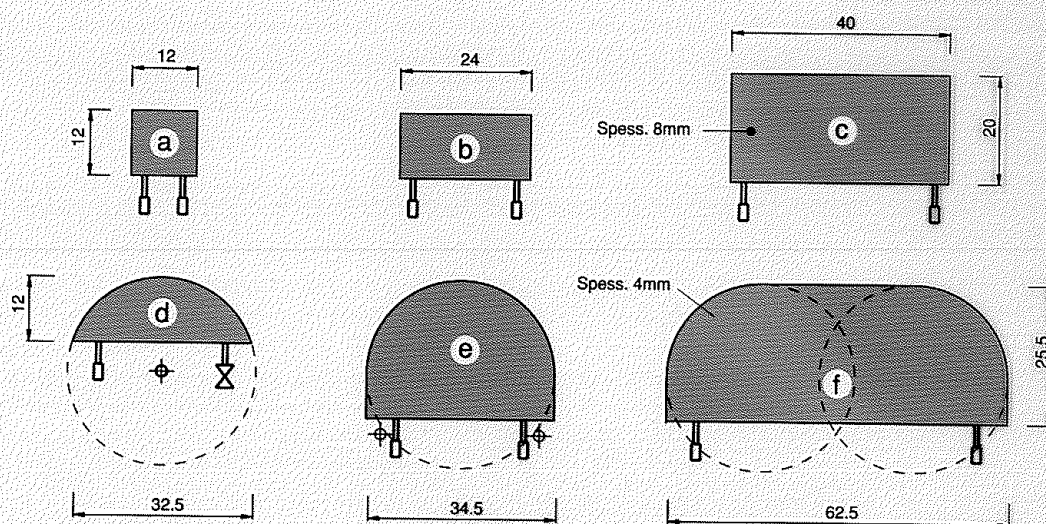


Fig. 8 - Forma e dimensioni dei martinetti piatti utilizzati per la misura dello stato di sollecitazione nelle murature: a), b), c) murature in laterizi d), e), f) murature in pietra.

Nelle murature in laterizio la prova viene eseguita con modalità illustrate in Fig. 7 utilizzando di norma martinetti di tipo (c) di dimensioni 40x20 cm. In fig. 9 è illustrato un esempio di applicazione di questo martinetto. Su elementi strutturali di dimensioni limitate, quali pilastri, archi e volte, vengono utilizzati martinetti di dimensioni più ridotte del tipo (a) e (b).

Nelle murature in laterizio il taglio viene di norma realizzato nello spessore dei giunti di malta, mediante una serie di fori paralleli, e viene completato con utensili manuali allo scopo di arrecare il minor danno possibile alla muratura stessa. La misura delle deformazioni viene eseguita mediante l'impiego di estensimetri meccanici rimovibili che rilevano gli spostamenti fra tre coppie di basi di misura disposte secondo lo schema rappresentato in Fig. 10. Questo schema di disposizione delle basi di misura rappresenta il risultato ottimale al quale si è pervenuti dopo diversi anni di sperimentazione.

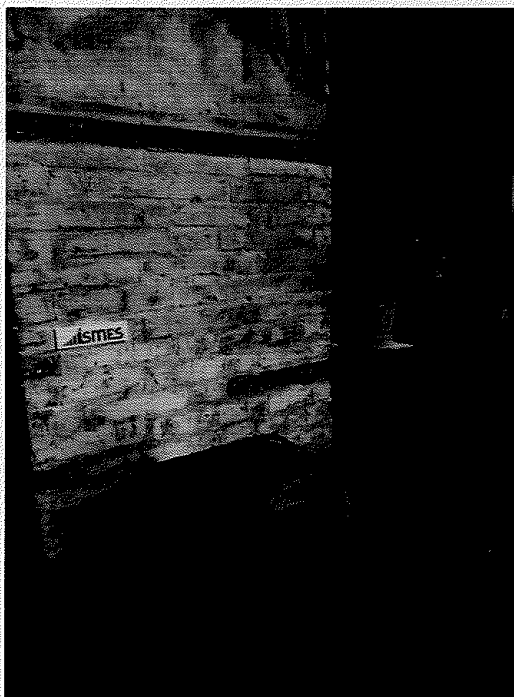


Fig. 9 - Misura dello stato di sollecitazione su un pilastro del Duomo di Atri mediante l'impiego di un martinetto piatto di dimensioni 40x20 cm.

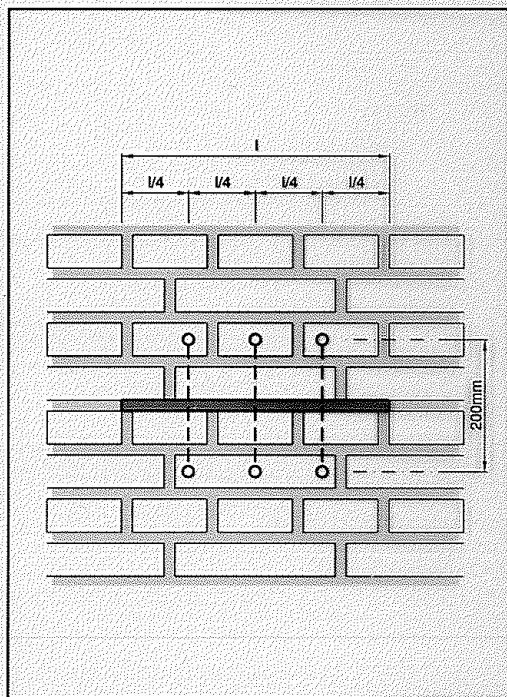


Fig. 10 - Schema ottimale di disposizione delle basi estensimetriche per la misura dello stato di sollecitazione.

Nelle murature in pietra con blocchi regolari e corsi di malta molto sottili, la prova viene eseguita con le modalità illustrate in Fig. 11 utilizzando martinetti a segmento circolare del tipo (d) di Fig. 8. Il taglio viene eseguito mediante disco metallico provvisto di utensili diamantati.



Fig. 11 - Fasi di esecuzione di una prova con martinetto piatto a segmento circolare su una muratura in blocchi di pietra (paramento esterno della Torre di Pisa).

Nel caso di murature molto irregolari o disomogenee è opportuno incrementare la profondità del taglio e utilizzare martinetti del tipo (e) che presentano una superficie decisamente superiore a quelli di tipo (d). In Fig. 12 è illustrato l'inserimento di un martinetto di tipo (e) entro una muratura in pietra molto irregolare. Operando una traslazione orizzontale del disco metallico utilizzato per il taglio è possibile aumentare sensibilmente le dimensioni del martinetto in modo da renderlo idoneo a studiare murature in pietra realizzate con blocchi di grandi dimensioni (tipo f).

È opportuno rilevare che i martinetti di tipo (d), (e), (f) presentano spessore molto limitato (3 mm) e ciò comporta la soluzione di non facili problemi di tipo costruttivo.

Lo schema di disposizione delle basi di misura adottato per le murature in pietra è del tutto simile a quello indicato in Fig. 10.



Fig. 12 - Utilizzo di un martinetto piatto di tipo (e) per la misura dello stato di sollecitazione in una muratura in pietra molto irregolare.

Seconda fase - Determinazione delle caratteristiche di deformabilità

In materiali omogenei ed isotropi la prova descritta al punto precedente può anche essere impiegata per determinare le caratteristiche di deformabilità.

Nel caso di strutture murarie, che sono mezzi anisotropi, è necessario seguire un diverso approccio. A questo scopo viene inserito nella muratura un secondo martinetto piatto parallelo al primo alla distanza di circa 50 cm. I due martinetti delimitano in tal modo un campione di muratura di apprezzabili dimensioni sul quale i martinetti stessi applicano uno stato di compressione monoassiale (Fig. 13).

Alcune basi di misura per comparatore meccanico rimovibile, installati sulla superficie libera del campione, permettono di misurare le deformazioni assiali e trasversali del campione di muratura. In questo modo viene eseguita una prova di compressione monoassiale su un campione indisturbato di grandi dimensioni, certamente molto rappresentativo del comportamento globale della struttura. Vengono eseguiti alcuni cicli di carico incrementando gradualmente il livello di sollecitazione allo scopo di determinare i moduli di deformabilità della muratura per diversi livelli di sollecitazione. Lo schema ottimale della basi estensimetriche per la misura delle deformazioni assiali e trasversali è indicato in Fig. 14.

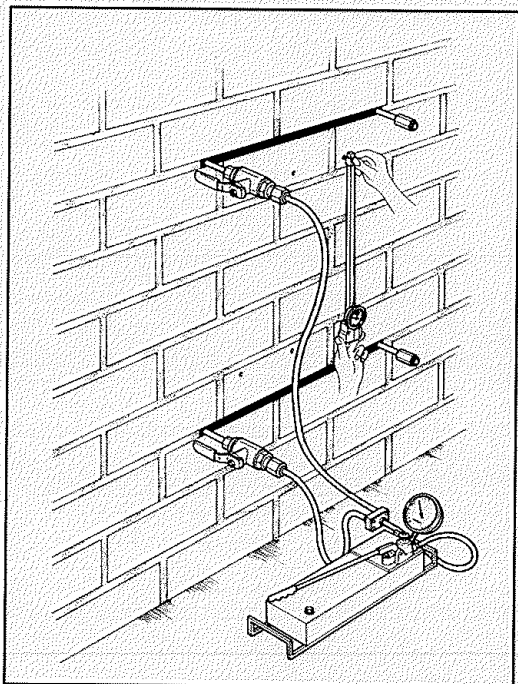


Fig. 13 - Schema della prova con doppio martinetto piatto per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità.

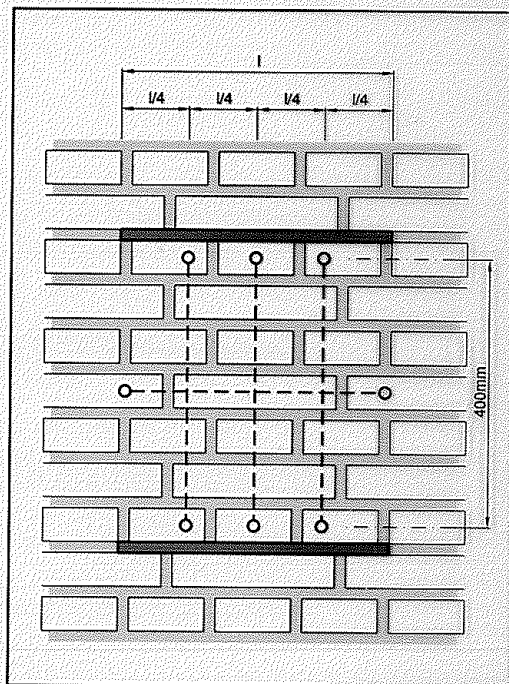


Fig. 14 - Schema ottimale delle basi estensimetriche per la misura delle deformazioni assiali e trasversali durante la prova con doppio martinetto piatto.

La misura delle deformazioni può essere eseguita anche con l'ausilio di un estensimetro rimovibile di tipo elettronico il quale consente di ottenere in tempo reale il diagramma sforzi-deformazioni relativo al campione in prova.

Per l'esecuzione della prova di deformabilità è opportuno utilizzare unicamente i martinetti di dimensioni maggiori. Per le murature in laterizio si consiglia l'impiego dei soli martinetti di tipo (c) di dimensioni 40x20 cm mentre per le murature in pietra è opportuno adottare martinetti a forma circolare dei tipi (e) ed (f). Martinetti di dimensioni inferiori forniscono valori scarsamente affidabili in quanto sovrastimano sensibilmente il valore del modulo elastico.

Di recente sono stati adottati alcuni accorgimenti di carattere tecnologico che rendono possibile l'esecuzione delle prove con martinetti piatti anche nei punti di difficile accesso e in particolare sui paramenti murari delle strutture di grandi altezze (torri, campanili). Vengono utilizzati allo scopo tecnici specializzati coadiuvati da esperti rocciatori i quali sono in grado di eseguire la prova senza l'ausilio di ponteggi metallici (Fig. 15).

Ciò consente di ridurre fortemente il costo delle indagini diagnostiche evitando il gravoso onere dell'installazione di ponteggi e salvaguardando inoltre la valenza estetica del monumento.



Fig. 15 - Esecuzione di prove con martinetto piatto su strutture alte senza l'ausilio di ponteggi metallici. a) Campanile di S. Stefano in Venezia b) Torre Fraccaro - Pavia.

Valutazione delle caratteristiche di resistenza

La prova di carico con doppio martinetto piatto può essere anche utilizzata per valutare la resistenza a compressione delle murature. A tale scopo il carico viene incrementato fino all'insorgere delle prime lesioni nei mattoni e il valore della resistenza a compressione della muratura può essere stimato con buona approssimazione mediante estrapolazione della curva sforzi-deformazioni. L'effetto del contenimento laterale del campione può essere valutato mediante prove di taratura eseguite in laboratorio.

È importante osservare che, quando il campione è prossimo alle condizioni di rottura, appaiono solo locali stati fessurativi in alcuni mattoni che compongono la muratura per cui il danno apportato alla muratura stessa si può ritenere trascurabile e il ripristino delle condizioni iniziali della muratura risulta molto agevole.

In Fig. 16 è riportato a titolo di esempio il risultato di una prova eseguita sulla muratura perimetrale di un chiostro della Chiesa di S. Eustorgio (Milano). È riportata la curva completa sforzi-deformazioni con l'indicazione del valore della sollecitazione misurata nel punto di prova. Nella stessa figura viene pure mostrato il campione di muratura al termine della prova; si può osservare che il danneggiamento subito dalla muratura nel corso della prova è poco rilevante.

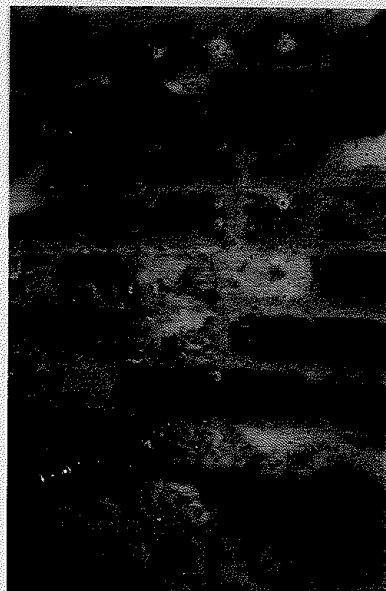
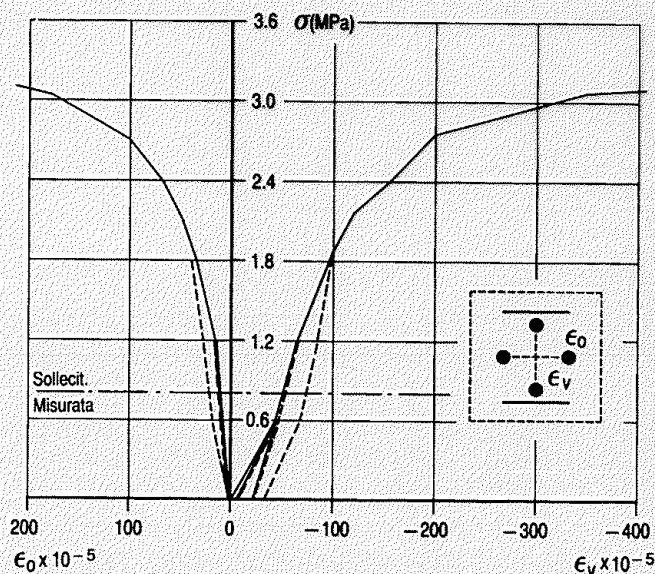


Fig. 16 - Curva tipo sforzi-deformazioni ottenuta mediante prova con doppio martinetto e vista del campione di muratura al termine della prova.

5. VALIDAZIONE DELLE TECNICHE DI PROVA

L'ISMES, in collaborazione con la Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL, ha realizzato un vasto programma di sperimentazioni per la validazione delle tecniche di prova con martinetti piatti operando sia su murature in laterizio che in pietra con differenti tipologie costruttive. Le prove di taratura sono state eseguite su campioni di grandi dimensioni 150x150x50 cm, approntati in laboratorio. Allo scopo di ottenere murature con caratteristiche di resistenza differenti, è stata variata la composizione delle malte di allettamento.

L'attrezzatura di carico (Fig. 17) è stata realizzata mediante un telaio di contrasto e una batteria di martinetti idraulici in grado di applicare al campione di muratura una componente di sollecitazione assiale.

Le prove di taratura sono state eseguite applicando al campione di muratura uno stato di sollecitazione noto e confrontando questo valore con quello determinato mediante la prova con martinetto piatto eseguita nel centro del campione con modalità identiche a quelle utilizzate per le prove in sito.

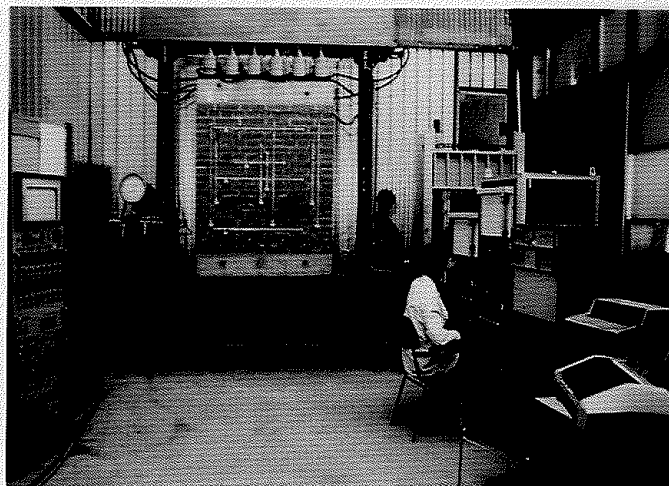


Fig. 17 - Attrezzature di carico e di misura utilizzate per la taratura delle tecniche di prova con martinetti piatti.

Le esperienze sono state eseguite sia nelle condizioni di carico uniformemente distribuito che in quelle di carico eccentrico.

Una vasta campagna di prove di taratura è stata inoltre eseguita per la validazione della prova con due martinetti piatti paralleli per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità e resistenza delle murature.

6. DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA AL TAGLIO LUNGO I CORSI DI MALTA

La conoscenza della resistenza di una muratura a sollecitazioni di taglio è di grande interesse per la caratterizzazione statico-strutturale di edifici in muratura.

Un parametro di grande importanza per questo tipo di analisi è costituito dalla resistenza al taglio lungo i corsi di malta. Con l'ausilio di due martinetti piatti e di un martinetto idraulico è possibile pervenire alla determinazione di questo importante parametro operando con tecniche di tipo non distruttivo.

Lo schema di questa prova è illustrato in Fig. 18b. Si procede in primo luogo all'estrazione di un mattone che viene sostituito da un martinetto idraulico. Questo martinetto applica una sollecitazione di taglio al mattone adiacente che viene isolato mediante la tecnica illustrata in Fig. 18a.

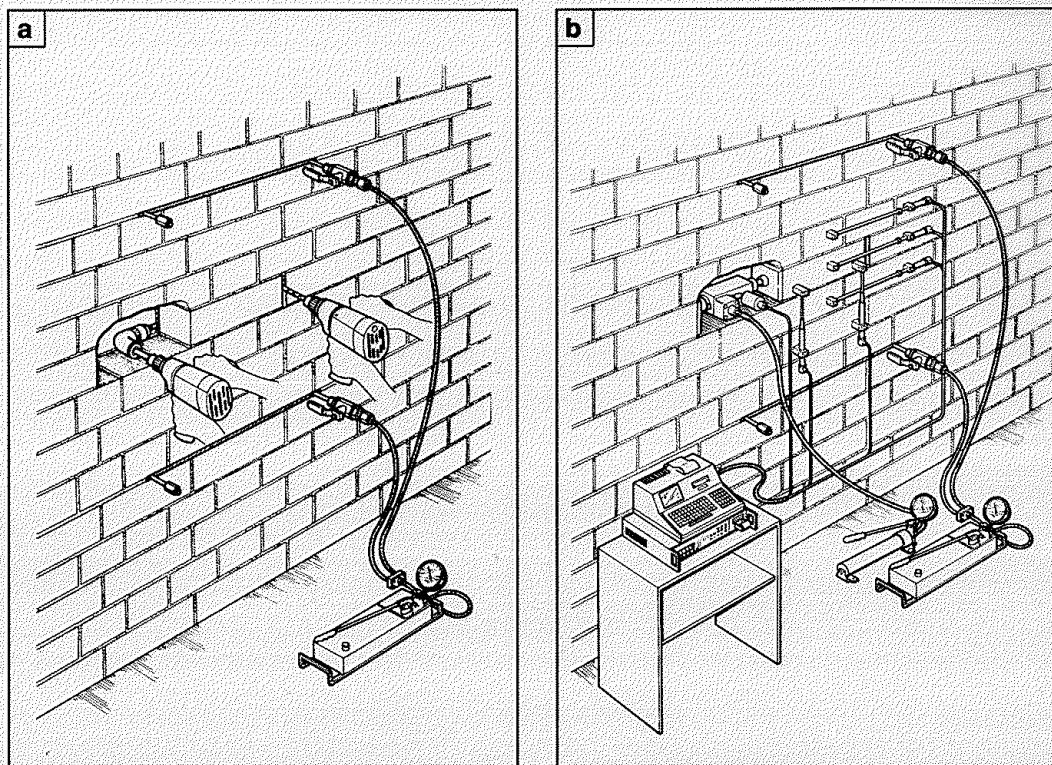


Fig. 18 - Prova di taglio lungo i corsi di malta: a) tecnica utilizzata per l'isolamento del mattone interessato dalla prova b) schema della prova per la determinazione della resistenza al taglio lungo i corsi di malta.

La componente di sollecitazione normale ai corsi di malta viene applicata mediante due martinetti piatti paralleli. Una serie di trasduttori elettrici permette di misurare gli scorrimenti relativi del mattone sottoposto a prova rispetto ai corsi di mattoni adiacenti nonché le deformazioni in direzione normale ai corsi di malta. Lo schema delle basi di misura è illustrato in Fig. 19.

Eseguendo alcune prove con diversi valori di sollecitazione normale è possibile determinare il valore dell'angolo di attrito interno e quello della coesione della malta.

In Fig. 20 sono riportati, a titolo di esempio, i risultati di una serie di prove eseguite su una muratura esistente per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio. Nel diagramma sono indicate le rette che interpolano i valori di resistenza di picco e quelli residui

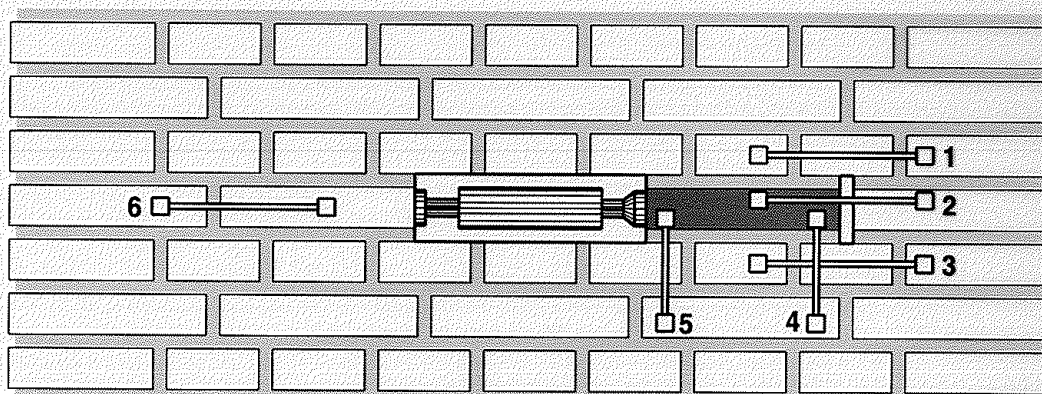


Fig. 19 - Schema delle basi di misura per l'esecuzione della prova di taglio lungo i corsi di malta.

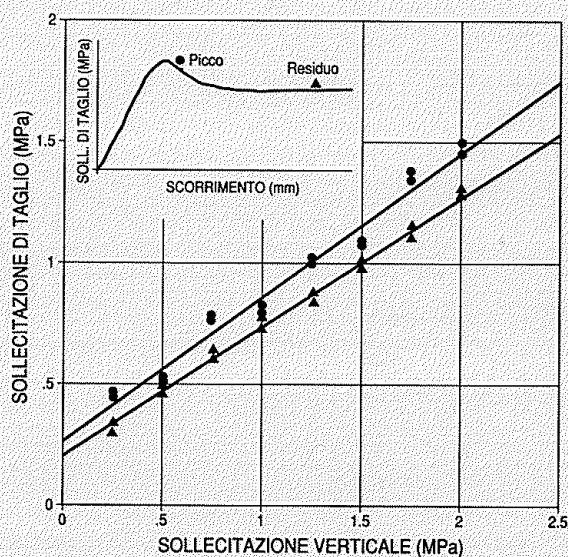


Fig. 20 - Valori di resistenza al taglio di picco e residui ottenuti su una muratura esistente.

7. ANALISI DELLE CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ DI UNA MURATURA A SACCO

Nei paragrafi precedenti si è osservato come la tecnica del martinetto piatto consenta di determinare le caratteristiche di deformabilità e lo stato di sollecitazione in corrispondenza dei paramenti esterni delle murature. Purtroppo

questa tecnica non può darci alcuna informazione sulle caratteristiche meccaniche della parte interna compresa fra i due paramenti.

Nel caso di murature realizzate con tecnica a sacco risulta quindi impossibile determinare con la tecnica del martinetto piatto le caratteristiche del materiale di riempimento a meno che non sia consentita la rimozione del paramento esterno del corpo murario per poter accedere alla muratura interna.

Per risolvere questo difficile problema si propone di utilizzare una diversa tecnica di prova che consenta di analizzare separatamente le caratteristiche di deformabilità della parte interna del corpo murario e quelle della parte corticale. Una serie di sperimenta-

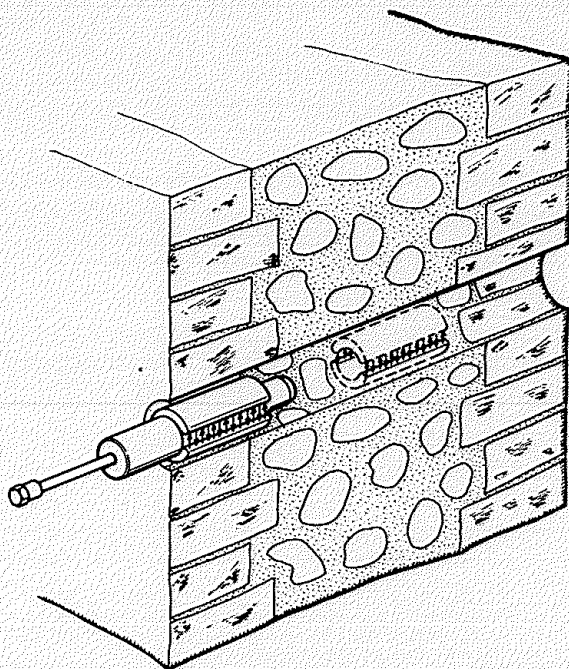


Fig. 21 - Schema della prova dilatometrica per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità della parte interna di una muratura a sacco.

zioni condotte di recente dall'ISMES hanno permesso di mettere a punto una tecnica di prova interessante e speditiva da eseguire entro fori di diametro 75 mm ricavati nelle strutture murarie. Si tratta della prova dilatometrica il cui schema è illustrato in Fig. 21.

Una speciale sonda dilatometrica della lunghezza di 20 cm, provvista di apparecchiature per l'applicazione di una sollecitazione sulla parete del foro e di una strumentazione per la misura delle deformazioni, viene inserita all'interno del foro in modo tale da eseguire prove di carico sui diversi materiali che compongono la muratura. È possibile determinare in questo modo il rapporto fra il modulo elastico della parte corticale e quello della parte interna. Anche se la prova dilatometrica è meno affidabile rispetto alla prova con martinetti piatti, (a causa delle limitate dimensioni del campione interessato dalla prova), il metodo proposto si presenta molto interessante poichè si può determinare in tal modo il rapporto fra i moduli di elasticità della parte corticale e di quella interna ottenuti nelle stesse condizioni di prova. I valori assoluti dei moduli elastici verranno poi valutati facendo riferimento ai risultati forniti dalle prove con martinetti piatti eseguite sullo strato corticale.

8. MODELLO MATEMATICO

Un significativo contributo alla conoscenza delle condizioni statiche di una struttura è fornito dal modello matematico il quale utilizza i dati ottenuti mediante le indagini in sito e in laboratorio e le informazioni fornite dalla strumentazione di controllo. I dati di input per il modello matematico sono desunti dalle prove di deformabilità in sito con martinetti piatti e la validazione del modello viene eseguita attraverso il confronto fra le sollecitazioni calcolate sul modello e quelle misurate in sito mediante la tecnica del martinetto piatto. Nel modello vengono analizzate diverse condizioni di carico (peso proprio, carico termico e cedimenti differenziali delle strutture di fondazione) e il comportamento deformativo viene analizzato con particolare attenzione al fine di meglio comprendere i risultati forniti dal sistema di monitoraggio. In fig. 22 si riporta a titolo di esempio il modello matematico della Basilica di S. Marco in Venezia.

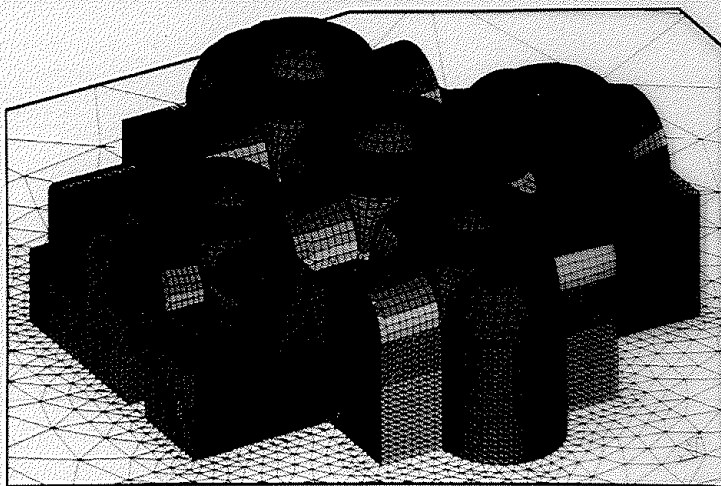


Fig.22 - Modello matematico della Basilica di S. Marco in Venezia.

L'elevata complessità della Basilica ha suggerito l'opportunità di suddividere l'intera struttura in 9 sottostrutture tali da considerare separatamente: la copertura con le cupole, i pilastri e le pareti laterali. La complessità del modello è ampiamente dimostrata dall'elevatissimo numero di gradi di libertà (circa 210.000).

L'elevata complessità della Basilica ha suggerito l'opportunità di suddividere l'intera struttura in 9 sottostrutture tali da considerare separatamente: la copertura con le cupole, i pilastri e le pareti laterali. La complessità del modello è ampiamente dimostrata dall'elevatissimo numero di gradi di libertà (circa 210.000).

9. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO

Le prove in sito che utilizzano metodi dinamici possono essere considerate prove di tipo non distruttivo, in grado di verificare il comportamento strutturale e l'integrità di un edificio.

Le indagini dinamiche possono essere eseguite in accordo con le seguenti procedure:

- a) attraverso l'analisi dei dati ottenuti dalla risposta ai carichi dinamici naturali o pseudo-naturali a cui è sottoposta solitamente la struttura (traffico urbano o ferroviario, azione del vento, campane che suonano, ecc.). I parametri dinamici vengono poi ricavati attraverso la tecnica di analisi spettrale. Come esempio viene proposta la fig. 23, che mostra i sismometri installati sulla muratura perimetrale delle Terme di Caracalla in Roma, per valutare il

comportamento della struttura in relazione al traffico urbano.

- b) assoggettando la costruzione a prove di vibrazione di bassa intensità (tale da produrre livelli vibrazionali che non intaccano l'integrità strutturale) e registrando le risposte del sistema in termini di spostamento, velocità e accelerazione. Le vibrazioni forzate sono indotte da vibrodine e la risposta misurata da sensori sismometrici.



Fig.23 - Analisi dinamica eseguita su un angolo delle Terme di Caracalla in Roma per verificare la risposta della struttura alle sollecitazioni indotte dal traffico stradale.

Queste indagini permettono di identificare il comportamento dinamico della struttura attraverso la valutazione dei suoi parametri modali (frequenze naturali, forme modali, indici di smorzamento). La conoscenza di tali parametri consente il calcolo della risposta strutturale a qualsiasi tipo di carico dinamico di caratteristiche note e in particolare la valutazione della vulnerabilità sismica della costruzione in muratura.

Ripetendo le prove di vibrazione forzata dopo un intervallo di tempo è possibile valutare eventuali variazioni dei parametri modali. Queste variazioni possono essere associate a modifiche dell'integrità strutturale. Le informazioni raccolte non solo quantificano il degrado strutturale dell'edificio o di parte di esso, ma sono pure importanti nella pianificazione di qualsiasi intervento, di consolidamento strutturale.

La tecnica della vibrazione forzata, mediante l'impiego della vibrodina è stata recentemente sviluppata dall'ISMES per analizzare le condizioni strutturali delle principali torri

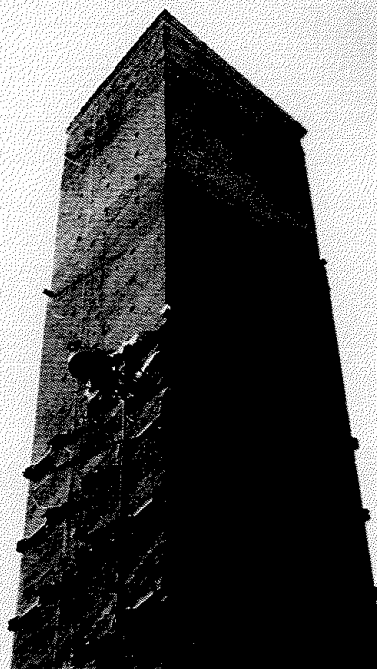


Fig.24 - Analisi dinamica eseguita mediante vibrazioni forzate sulla Torre Fraccaro (Pavia) per la verifica dell'efficacia degli interventi di consolidamento strutturale. È visibile la vibrodina installata su una parete della torre.

della città di Pavia. I risultati ottenuti da queste prove, alcune delle quali suggerite dopo l'analisi dei risultati forniti dalle prove con martinetto piatto, hanno permesso di individuare anomalie nel comportamento strutturale in alcune delle torri esaminate.

La fig. 24 mostra le prove di vibrazione forzata condotta in collaborazione con la Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL sulla torre Fraccaro in Pavia. La prova è stata eseguita prima e dopo gli interventi di consolidamento strutturale consentendo quindi di valutare l'efficacia delle strutture di rinforzo.

10. MONITORAGGIO STRUTTURALE

L'installazione di una strumentazione di misura per il controllo del comportamento strutturale di un edificio assume importanza rilevante nello studio delle condizioni statiche della struttura. Questa tecnica di indagine sta avendo applicazioni sempre crescenti in quanto, oltre a fornire informazioni sulle condizioni statiche dell'edificio, è considerata l'unico mezzo in grado di garantire la sicurezza della struttura durante i lavori di consolidamento.

Le principali grandezze che vengono tenute sotto controllo sono le seguenti:

- apertura delle principali lesione nelle strutture murarie;
- movimenti assoluti e relativi di strutture verticali;
- rotazioni di strutture verticali e orizzontali;
- temperature interne ed esterne;
- cedimenti differenziali delle strutture di fondazione;
- comportamento deformativo dei terreni di fondazione.

L'analisi dei processi deformativi in funzione del tempo e della temperatura permette di separare gli effetti termici dagli altri fattori (cedimenti di fondazioni, modifiche strutturali, nuove forze indotte sulla struttura, invecchiamento dei materiali).

Tutte le misure sopra citate possono essere eseguite utilizzando sia tecniche di tipo manuale, che prevedono l'impiego di strumenti rimovibili, sia tecniche di misura di tipo automatico che prevedono l'impiego di strumenti fissi di tipo elettronico collegati ad una apparecchiatura di acquisizione automatica. Questa

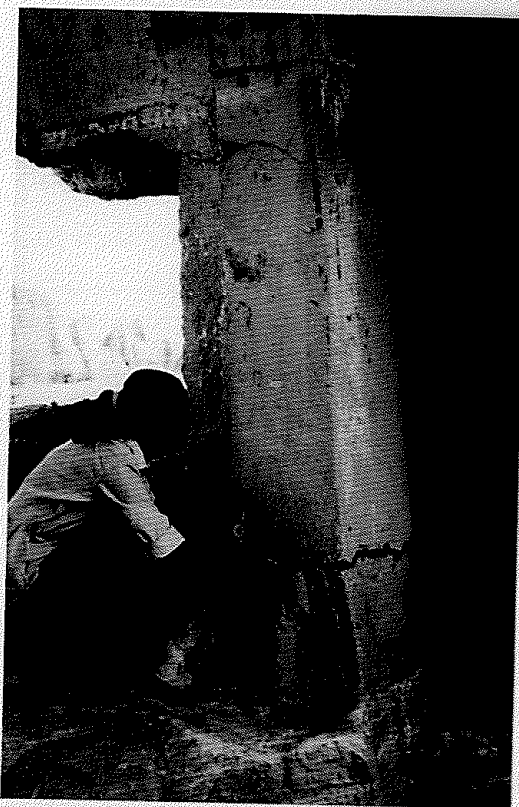


Fig. 25a - Controllo dell'apertura delle principali lesioni presenti nella chiesa di El Nazor (Cappadocia) mediante l'impiego di un estensimetro meccanico rimovibile.

seconda alternativa, che prevede costi più elevati rispetto alla tecnica di misura di tipo manuale, consente un efficace controllo in tempo reale del comportamento strutturale però richiede nel contempo un rigoroso programma di manutenzione dell'attrezzatura e di gestione dei dati.

L'apertura delle lesioni nelle strutture murarie può essere rilevata mediante estensimetro meccanico rimovibile (Fig. 25a) oppure mediante estensimetro provvisto di trasduttore elettrico (Fig. 25b).

Per la misura degli spostamenti relativi fra le strutture verticali la Fig. 26a mostra un esempio di impiego di un estensimetro rimovibile a lunga base e la fig. 26b mostra alcuni estensimetri a lunga base di tipo fisso provvisti di trasduttori di spostamento predisposti per il controllo auto-



Fig. 25b - Estensimetro provvisto di trasduttore elettrico installato su una lesione presente nell'abside della Chiesa di S. Francesco di Arezzo.

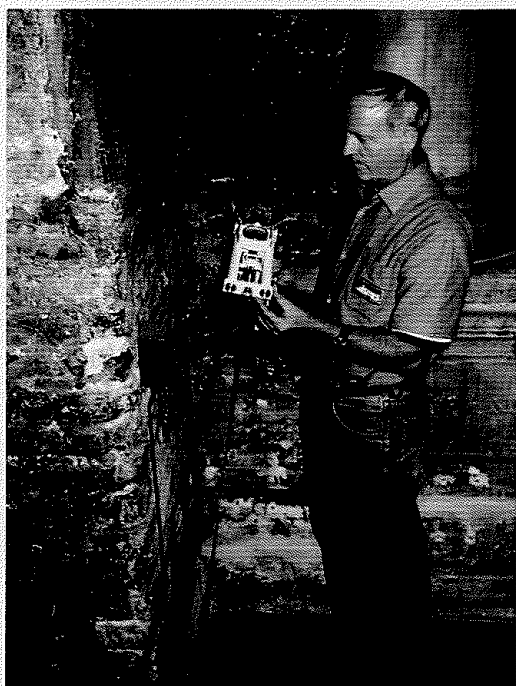


Fig. 26a - Misura degli spostamenti relativi mediante estensimetro rimovibile a lunga base (Basilica di S. Marco in Venezia).

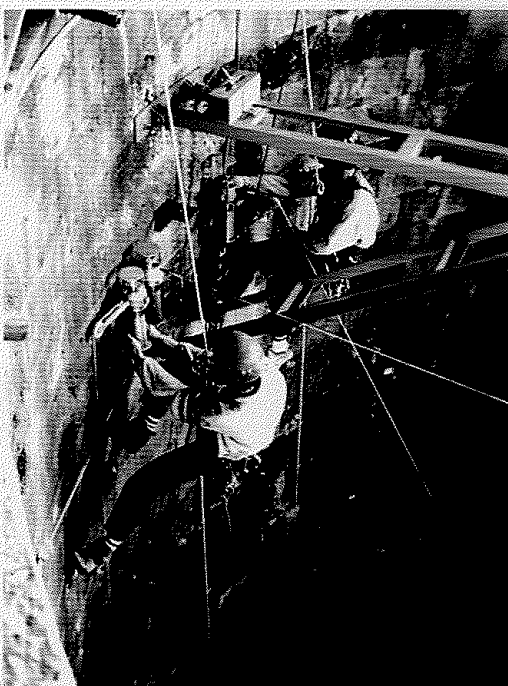


Fig. 26b - Estensimetri fissi a lunga base per il controllo del comportamento deformativo della Torre di Pisa.

matico del comportamento deformativo della Torre di Pisa.

La misura degli spostamenti assoluti delle strutture verticali viene di norma eseguita mediante l'impiego di pendoli che possono essere di tipo rimovibile a lettura ottica (ved. Fig. 27a) o di tipo fisso a lettura automatica mediante telecoordinometro come indicato in Fig. 27b.

Anche per le misure inclinometriche, livellometriche e termiche nonché per il controllo dei terreni di fondazione si possono impiegare sia tecniche di misura di tipo manuale che automatico.

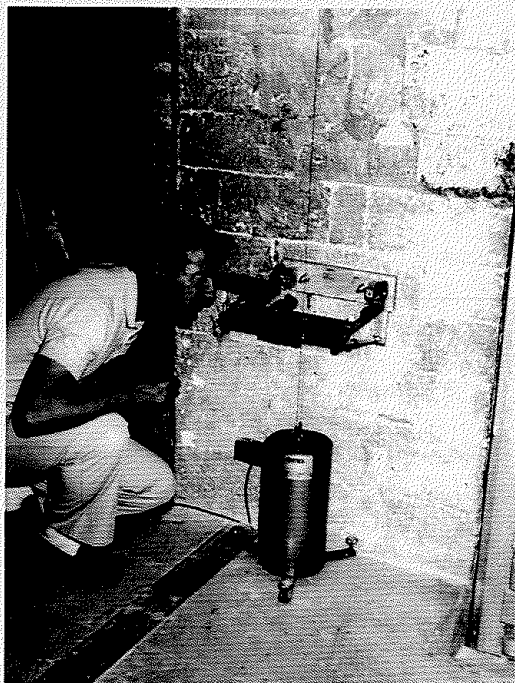


Fig. 27a - Pendolo rimovibile con lettura di tipo ottico installato sulla cattedrale di Bitonto.



Fig. 27b - Pendolo fisso con telecoordinometro installato su un pilastro del Duomo di Pavia.

BIBLIOGRAFIA

BONALDI P., JURINA L., ROSSI P.P., *"Indagini sperimentali e numeriche sui dissesti del Palazzo della Regione di Milano"*, Comunicazione presentata al Congresso Nazionale di Geotecnica, Firenze, Ottobre 1980, Ismes Bull. n. 156.

SACCHI LANDRIANI G., RICCIONI R., *"Comportamento statico e sismico delle strutture murarie"*, Clup, Milano (1982).

ROSSI, P.P. *"Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in situ tests"*. 6th Int. Brick Masonry Conference - Rome 1982.

ROSSI P.P. *"Determination experimental des caractéristique mecanique des maçonnerie"* Restauration des Ouvrages et des Structures - Pont et Chaussees - Paris 1983.

BINDA, L., ROSSI, P.P., SACCHI, G. *"Diagnostic analysis of masonry buildings"* IABSE Symposium - Venice 1983.

BARLA, G., ROSSI, P.P. *"Stress measurement in tunnel lining"* Int. Symp. Field Measurement in Geomechanics - Zurich 1983.

ROSSI, P.P. *"Flat jack test for the analysis of mechanical behaviour of brick masonry structures"* 7th Int. Brick Masonry Conference - Melbourne 1985.

ROSSI, P.P. *"Recent development of the flat-jack test on masonry structures"* U.S.A. - ITALY workshop on evaluation and retrofit of masonry structure, August 1987.

BLASI, C., ROSSI, P.P. *"Indagini sulle strutture murarie del tempio cosiddetto di Romolo nel Foro Romano"* Int. Confer. Non Destructive tests. Perugia, April, 1988.

GANI, G.P., DEL GRECO, O., ASTORI, B. - ROSSI, P.P. *"Analysis and control of the static behaviour of the Consolazione Church in Todi, Italy"* Int. Symposium *"The Engineering Geology of Ancient Works, Monumental and Historical Sites"*, Athens, September 1988.

ASTORI, B. - GIANI, G.P. - ROSSI, P.P. *"Control measurement and stability analysis of the Cathedral of Orvieto, Italy"* Int. Symposium *"The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites"* Athens September 1988.

RICCIONI, R., ROSSI P.P. *"Restauro edilizio e monumentale. Diagnosi e consolidamento"* Editrice il Cigno, Galileo Galilei, Roma 1989.

ROSSI, P.P. *"Non destructive evaluation of mechanical characteristics of masonry buildings, Conference on "Non Destructive Evaluation of Civil Structures and Materials"*, University of Colorado, Boulder, USA October 1989.

BLASI C., CONFORTO M.L. - ROSSI P.P. *"Analysis of the statical behaviour of the Costantino's arch in Rome"* Int. Techn. Conference Structural *"Conservation of Stone Masonry"* Athens 1989.

MODENA, C., ROSSI, P.P. *"In situ investigations, structural analysis and strengthening of a stone masonry bell tower,"* I Int. Congress on Restoration of the Architectural Heritage and Building, Canarias, July 1992.

ROSSI P.P., VENTRUCCI F., VIO E., *"Structural Assessment of St. Mark's Basilica, Venice"*, IABSE Symposium *"Structural Preservation of the Architectural Heritage"* Roma 1993.