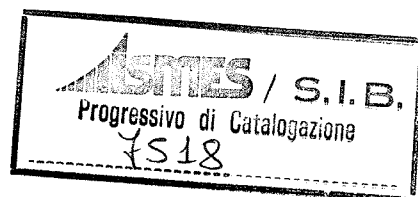


P.P. Rossi, M. Vavassori

***Il sistema di monitoraggio
delle torri e del Duomo di Pavia***

memoria presentata al SAIE 1992, Bologna, ottobre 1992

ristampa dal volume *Recupero Edilizio (consolidamento e recupero strutturale)*,
pubblicato a cura del centro studi OIKOS -Ente Fiere - SAIE - Bologna



Il monitoraggio di edifici monumentali. Le torri e il Duomo di Pavia

Premessa

Il 17 Marzo 1989 è crollata la Torre Civica di Pavia; tale crollo ha privato il patrimonio artistico italiano di uno dei suoi monumenti più rappresentativi. In seguito a tale evento il Ministero della Protezione Civile ha nominato una Commissione tecnico - scientifica presieduta dal Prof. G. Macchi, composta da rappresentanti del mondo accademico dell'Università di Pavia e da rappresentanti dell'amministrazione cittadina.

Il compito della Commissione, rifacendosi agli atti costitutivi, prevedeva "l'esame delle cause del crollo della torre civica di Pavia e indagini sullo stato di conservazione di altri monumenti cittadini circostanti".

L'attività della commissione, coadiuvata dal Provveditorato alle Opere Pubbliche della Lombardia nel ruolo di Direzione Lavori, è iniziata immediatamente dopo il crollo e si è protratta per più di due anni, a seguito della complessità e delle dimensioni delle problematiche.

La commissione, nello svolgere il compito affidatole, ha elaborato un progetto molto vasto ed articolato di indagini e di interventi. Con la collaborazione e il contributo dell'Ismes, tale progetto si è andato arricchendo e consolidando fino a rappresentare un modello esemplare di approccio metodologico integrato per l'effettuazione di studi e indagini volti alla conoscenza e alla conservazione del nostro patrimonio monumentale e architettonico.

Nell'ambito dei monumenti storici della città di Pavia sono stati identificati sette siti ritenuti significativi ai fini degli studi. La significatività dei siti prescelti, in alcuni casi, è legata alla vicinanza con la torre caduta (Duomo), in altri alla possibilità di identificare per analogia possibili cause di degrado (Torre S. Dalmazio, Campanile del Carmine, Torre del Maino, Torre Belcredi, Torre Fraccaro, Torre dell'Orologio). La conoscenza dello "stato di salute", nonché delle caratteristiche strutturali delle murature degli altri monumenti, avrebbe permesso di elaborare, per analogia, delle ipotesi sulle cause del crollo della Torre Civica.

Il progetto si è articolato in varie fasi a cui hanno concorso:

- L'Università di Pavia per le indagini storiche-artistiche e bibliografiche, il rilievo geometrico e topografico dei monumenti, le prove meccaniche sulle murature provenienti dalla Torre Civica, le prove fisiche e petrografiche sui materiali;

- *L'ENEL/CRIS* di Milano per le misure del comportamento dinamico delle torri;
- *L'ISMES* per il rilievo dello stato fessurativo dei monumenti, le indagini geotecniche sui terreni di fondazione e analisi di laboratorio sui campioni prelevati, la caratterizzazione meccanica delle murature, i calcoli strutturali mediante modellazione numerica, l'installazione di strumentazioni e sistemi di monitoraggio, la gestione della serie storica delle misure.

Nel seguito vengono descritte le singole attività svolte da ISMES nell'ambito del progetto generale.

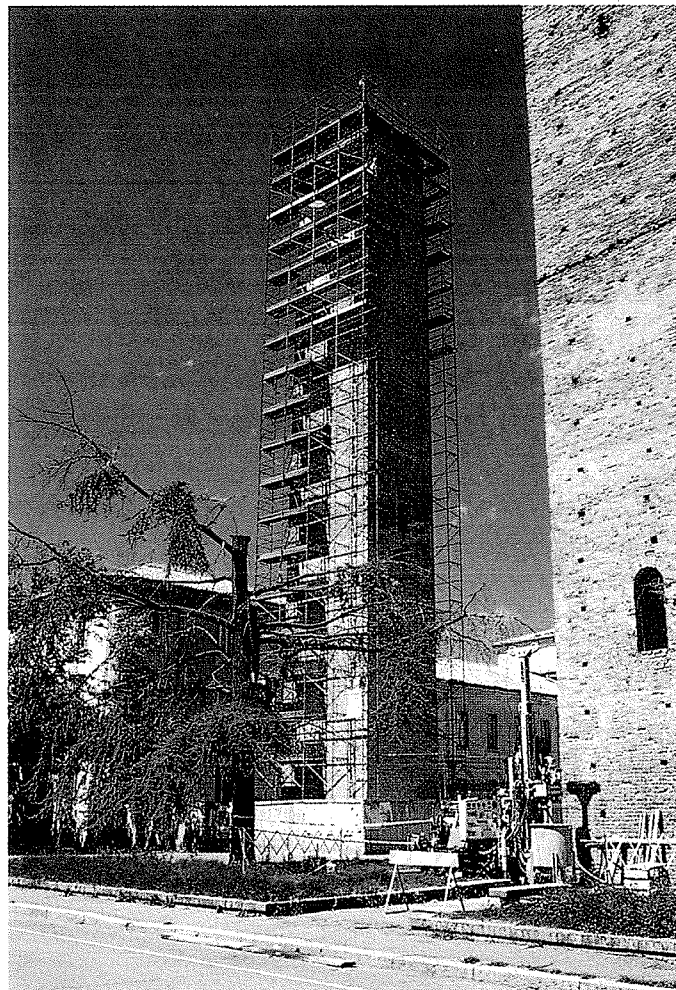
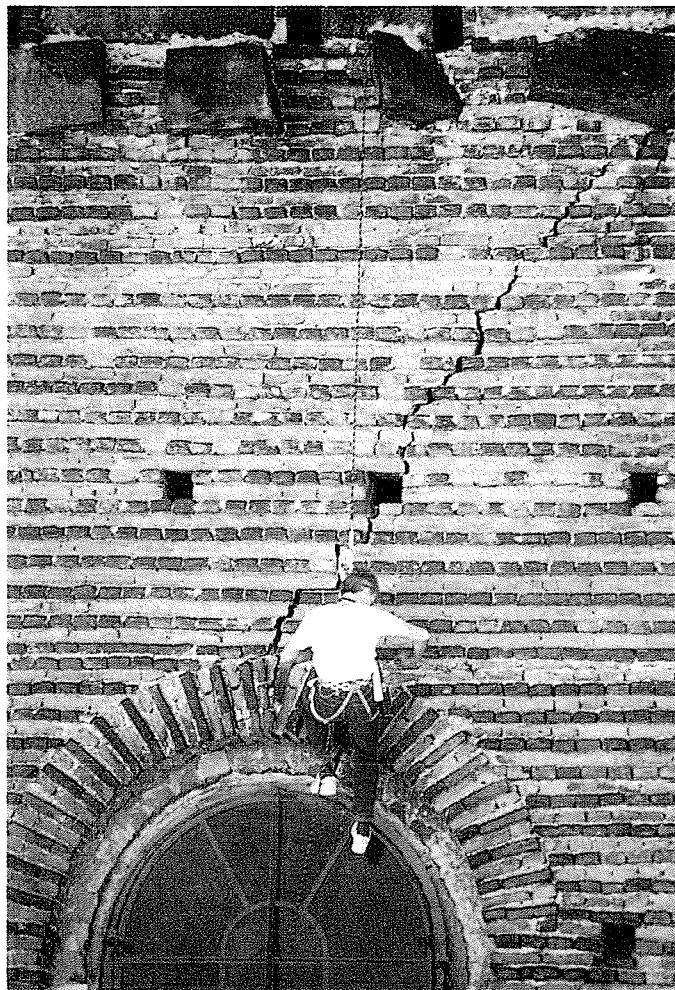
Rilievo dello stato fessurativo dei monumenti

Il rilievo del quadro fessurativo costituisce una premessa indispensabile per qualsiasi valutazione delle condizioni statiche di una struttura. Il rilievo comporta la localizzazione e la descrizione dei sistemi fessurativi visibili sui paramenti murari della struttura in esame e la loro riproduzione su piante e prospetti.

Il rilievo dello stato fessurativo delle Torri e del Duomo di Pavia è stato eseguito con una tecnica innovativa che permette di indagare le strutture senza l'impiego di ponteggi metallici, il che consente di ridurre drasticamente i costi delle indagini e di non compromettere la valenza estetica delle strutture.

Fig. 1 Rilievo del quadro fessurativo eseguito senza ponteggi sul tiburio del Duomo

FIG. 2 Esecuzione di sondaggi geotecnici nei pressi della Torre del Maino.



Lo studio è stato effettuato da tecnici specializzati coadiuvati da esperti scalatori attraverso una ispezione visiva diretta delle strutture murarie. In una prima fase le murature sono state ispezionate da terra utilizzando un canocchiale ad alto potere di risoluzione e forte ingrandimento e in seguito sono state eseguite calate in cordata dalla sommità delle strutture per un esame di dettaglio delle zone ammalorate e delle principali lesioni presenti sulle strutture murarie; in particolare è stata misurata l'apertura e la continuità delle lesioni.

Il rilievo è stato eseguito sul Duomo, sulle tre Torri dell'Università, sulle Torri Belcredi e S. Dalmazio e sulla Torre campanaria della Chiesa del Carmine. Il rilievo dello stato fessurativo del Duomo è stato eseguito all'esterno, ponendo particolare attenzione alla zona del tiburio ottagonale e, all'interno, sui pilastri del corpo ottagonale centrale, sulle volte a crociera, sulle loggette, sul tamburo, sulla muratura perimetrale e sulla cupola. In figura 1 è illustrata una fase del rilievo eseguito sulla superficie esterna del tiburio del Duomo.

In generale tutte le Torri sono risultate interessate da locali fenomeni di degrado; in particolare si è rilevato che le murature in prossimità della base sono interessate da locali fenomeni di distacco di malta, con cavità tra i mattoni profonde fino a 5-6 centimetri. In diverse zone si sono rilevati inoltre fenomeni di distacco di alcune porzioni del paramento murario.

Questo rilievo dettagliato del quadro fessurativo ha consentito di ottenere importanti informazioni per la valutazione delle condizioni statiche delle strutture e ha permesso inoltre di definire la corretta ubicazione degli strumenti di misura per il controllo nel tempo dell'apertura delle lesioni.

Indagini geotecniche sui terreni di fondazione e analisi di laboratorio sui campioni prelevati

Nei siti oggetto dell'intervento globale sono state svolte estese campagne di indagini geognostiche allo scopo di pervenire alla caratterizzazione fisica e meccanica dei terreni di fondazione. Sondaggi geognostici sono stati eseguiti anche sulle murature di fondazione.

In sintesi, le indagini si sono articolate in:

- Esecuzione di sondaggi, rilievi stratigrafici e prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per successive prove di laboratorio. I sondaggi, di cui alcuni a distruzione di nucleo, sono stati eseguiti nelle immediate vicinanze di ciascuna delle sei Torri e nell'area circostante il Duomo; nelle murature di fondazione sono stati realizzati sondaggi inclinati al fine di identificarne la geometria e le caratteristiche meccaniche (figura 2).

- Prove in sito nei fori di sondaggio:

- prove dinamiche di resistenza alla penetrazione (SPT);
- prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU);
- prova *downhole* con cono sismico;
- prove in foro di tipo *cross-hole*;
- prove pressiometriche con pressimetro autoperforante.

- Installazione di piezometri e di assestimetri a punto singolo nei fori di sondaggio per il controllo del livello della falda e degli assestamenti del terreno.

- Prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica dei campioni di terreno prelevati. Le prove hanno compreso:

- prove di classificazione (massa volumica, contenuto d'acqua, limiti di Atterberg, granulometria, densità dei grani, carbonato di calcio);
- prove meccaniche statiche (consolidazione edometrica e prove triassiali);
- prove meccaniche dinamiche (velocità onde elastiche, colonna risonante).

Caratterizzazione meccanica delle murature

Carotaggi meccanici e ispezioni con sonda televisiva

In alcuni pilastri del Duomo e nelle Torri oggetto dell'indagine sono stati eseguiti carotaggi meccanici orizzontali mediante uno speciale carotiere a parete sottile provvisto di corona diamantata. Scopo dei carotaggi meccanici era la determinazione delle caratteristiche strutturali delle murature e il prelievo di campioni da sottoporre a prove di laboratorio.

Per migliorare le conoscenze delle caratteristiche strutturali della muratura, in parte già fornita dall'analisi stratigrafica delle carote prelevate, e per individuare e dimensionare le discontinuità eventualmente presenti nella muratura tutti i fori di sondaggio sono stati ispezionati mediante sonda televisiva a colori. L'analisi dei risultati di queste tecniche di indagine ha così permesso la misurazione precisa dello spessore dei paramenti murari, lo studio delle tipologie e delle caratteristiche dei riempimenti, nonché la verifica dello stato fessurativo delle porzioni interne delle murature. Le prospezioni con sonda televisiva costituisce un potente strumento di indagine che consente di indagare e completare le informazioni fornite dal carotaggio.

Le registrazioni dei rilievi entrano nell'archivio storico della struttura e sono quindi a disposizione dei tecnici per ogni approfondimento anche dopo che i fori di carotaggio saranno stati richiusi.

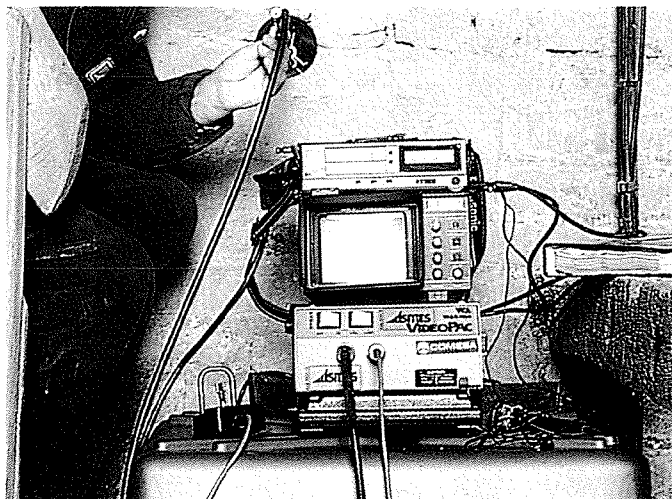
In figura 3 è illustrata l'attrezzatura impiegata per i rilievi televisivi con un particolare di un rilievo eseguito nella parte interna delle murature ove si nota la presenza di una cavità di piccole dimensioni.

Prove con martinetto piatto in parete

Sulle strutture oggetto di indagine si è poi proceduto alla determinazione delle caratteristiche meccaniche di deformabilità e resistenza e alla misura dello stato di sollecitazione al fine di valutare i margini di sicurezza delle strutture. A tale scopo si è fatto uso di una interessante tecnica di prova di tipo non distruttivo basata sull'impiego di speciali martinetti piatti.

Questa tecnica di prova, messa a punto dall'ISMES, ha permesso di individuare con grande affidabilità lo stato tensionale presente sulle principali

Fig. 3 Rilievo con sonda televisiva a colori all'interno di un foro di carotaggio e particolare di una cavità di piccole dimensioni rilevata sulla superficie del foro



torri (Torre dell'Orologio, del Maino, dell' Università, Belcredi, Campanile della Chiesa del Carmine) e di valutare le caratteristiche di deformabilità e resistenza sia della parte corticale della muratura che di quella interna.

a) 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. Due punti di riferimento sono applicati sulla superficie della muratura e si misura la distanza tra i due punti. Viene quindi eseguito un taglio perpendicolare alla superficie 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 con un coefficiente che dipende dal rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio e dall'influenza del bordo di saldatura.

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

$$\alpha = p \cdot K_m \cdot K_a$$

dove: p = pressione dell'olio; K_m = costante del martinetto che deve essere determinata mediante prove di taratura in laboratorio; $K_a = A_j/A_c$ (rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio).

La misura dello stato tensionale è stata in genere eseguita in corrispondenza della sezione di basi della Torre ove le sollecitazioni sono più elevate. In figura 4 è illustrata l'esecuzione di una prova con martinetto piatto alla base della Torre del Maino. Le prove sono state eseguite su tutti i lati delle torri allo scopo di evidenziare eventuali eccentricità di carico.

A titolo di esempio si riportano in figura 5 i valori di sollecitazione misurati in corrispondenza di una sezione della torre del Maino. Si osservano stati di sollecitazione diversi nei quattro lati della torre con valore massimo pari a 1.96 MPa e valore minimo 0.90 MPa.

La tecnica di prova del martinetto piatto può essere utilizzata per misurare lo stato tensionale anche a quote più elevate rispetto alle basi della torre. Con l'ausilio di tecnici specializzati coadiuvati da esperti rocciatori la prova può essere eseguita in pareti senza l'impiego di ponteggi. In figura 6 è illustrata

Fig. 4 Misura dello stato di sollecitazione mediante la tecnica del martinetto piatto alle basi della Torre del Maino

Fig. 5 Stati di sollecitazione misurati in corrispondenza di una sezione della Torre del Maino mediante prova con martinetto piatto

Fig. 6 Prova con martinetto piatto eseguita in parete con l'ausilio di esperti rocciatori per le misure delle sollecitazioni nel paramento esterno della Torre S. Dalmazio

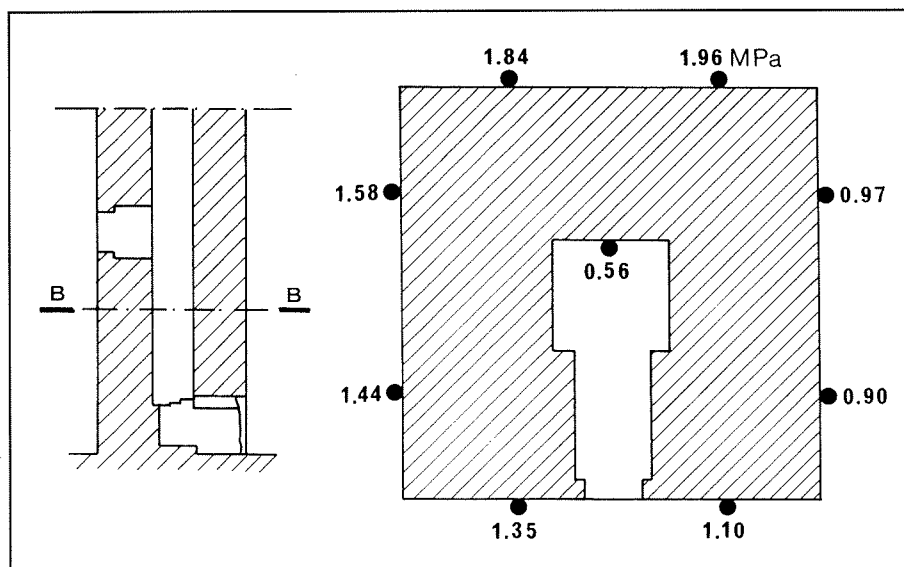
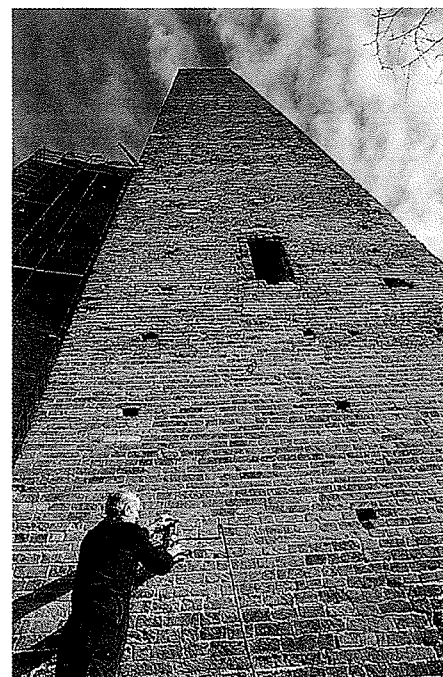




Fig. 7 Determinazione delle caratteristiche di deformabilità mediante prova con doppio martinetto piatto alla base del Campanile della Chiesa del Carmine

l'esecuzione di una prova sulla torre S. Dalmazio mediante l'utilizzo di questa speciale tecnica.

b) Determinazione delle caratteristiche di deformabilità

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

Nel caso di strutture murarie, che sono mezzi anisotropi, è necessario introdurre una tecnica diversa. A questo scopo viene eseguito, parallelamente al primo, un secondo taglio entro il quale viene inserito un secondo martinetto ad una distanza di circa 50 cm dal primo. 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.

Alcune basi di misura per comparatore meccanico rimovibile, installati sulle 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 grosse 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 sia in fase di carico che di scarico.

La prova di carico con il doppio martinetto piatto può essere inoltre utilizzata per valutare la resistenza a compressione delle murature. A tale scopo il carico viene incrementato fino all'insorgere delle prime fessure 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.

E' importante sottolineare che, quando il campione è prossimo alle condizioni di rottura, appaiono solo alcune fratture in alcuni dei 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.

Le prove sono state ubicate in modo da indagare le tipologie murarie più rappresentative. Anche in questo caso si è scelto di indagare i paramenti murari esterni ed interni per confrontarne le caratteristiche meccaniche. Tutte le prove inoltre sono state eseguite ripetendo diversi cicli di carico e scarico a livelli di sollecitazione gradualmente crescenti per analizzare il comportamento deformativo in fase di carico e quello reversibile in fase di scarico.

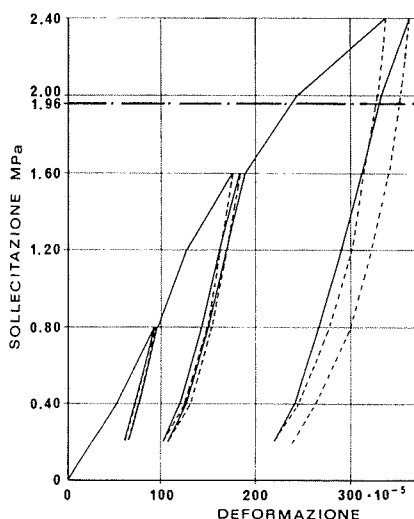
La sollecitazione di prova è stata infine incrementata fino all'insorgere di locali stati di microfessurazione in alcuni mattoni in modo da valutare il carico limite sopportato dalla muratura e quindi i suoi limiti di resistenza.

In figura 7 è illustrata una prova con martinetto doppio eseguita alla base della Torre Campanaria della Chiesa del Carmine.

In figura 8 è riportato a titolo di esempio un diagramma tipo sforzi - deformazioni ottenuto mediante la prova con doppio martinetto alla base della torre del Maino. In questo diagramma è pure evidenziato il valore massimo di sollecitazione (1.96 MPa) misurato in corrispondenza della sezione riportata in figura 5. Si può osservare che questo valore di sollecitazione si colloca in un ramo della curva ove il comportamento deformativo si discosta dalla linearità e denuncia la presenza di deformazioni di tipo plastico.

I risultati presentati nelle figure 5 e 8 permettono di evidenziare le grandi potenzialità della tecnica di prova del martinetto piatto che consente di analizzare con grande affidabilità le condizioni di funzionamento statico di una struttura e di prendere rapide decisioni nei casi in cui i margini di sicurezza risultino non soddisfacenti. Ciò è avvenuto in alcune torri di Pavia ove sono stati posti in opera in tempi molto rapidi interventi provvisori di cerchiatura.

Fig. 8 Curva carichi - deformazioni della muratura della Torre del Maino ottenuta mediante prova con doppio martinetto piatto.



Calcoli strutturali mediante modellazione numerica

Sul Campanile del Carmine e sulla Torre S. Dalmazio sono state effettuate analisi strutturali con modellazione numerica. L'analisi, mediante modelli ad elementi finiti, è stata finalizzata alla valutazione dettagliata e al calcolo della distribuzione dello stato tensionale nelle strutture sottoposte ai carichi statici. Per la discretizzazione di entrambe le torri, sono stati utilizzati elementi finiti tridimensionali a 10 nodi di tipo gerarchico.

Nella modellazione delle Torri sono state rispettate al massimo le reali geometrie delle strutture, al fine di non alterare l'attendibilità dei risultati, soprattutto nelle zone di maggior interesse.

Per entrambe le torri sono stati predisposti due modelli numerici ad elementi finiti rispettivamente:

- modello monolitico e fessurato (Torre S. Dalmazio)
- modello con e senza la schematizzazione dei muri d'ala di controvento (figura 9) (Campanile del Carmine)

I calcoli sono stati sviluppati nell'ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali costituenti le strutture, le fondazioni ed il terreno interagente circostante.

Le analisi statiche sono state sviluppate considerando come agenti sia l'effetto dovuto al solo peso proprio della struttura che l'effetto concomitante del vento in diverse direzioni.

Le analisi effettuate sui diversi modelli hanno permesso di determinare il quadro tensionale a cui risultano sottoposte le due strutture in diversi regimi di carico.

Sono stati realizzati anche utili confronti con i calcoli effettuati manualmente con modelli semplificati sulle stesse torri, con il risultato di poter confermare, a meno di scostamenti dell'ordine del 10 - 15 %, i calcoli manuali effettuati sulle altre torri non oggetto di modellazione numerica.

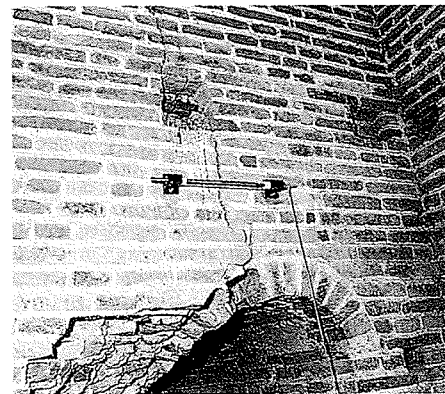


Fig. 10 Torre S. Dalmazio: deformometro a cavallo di una lesione.

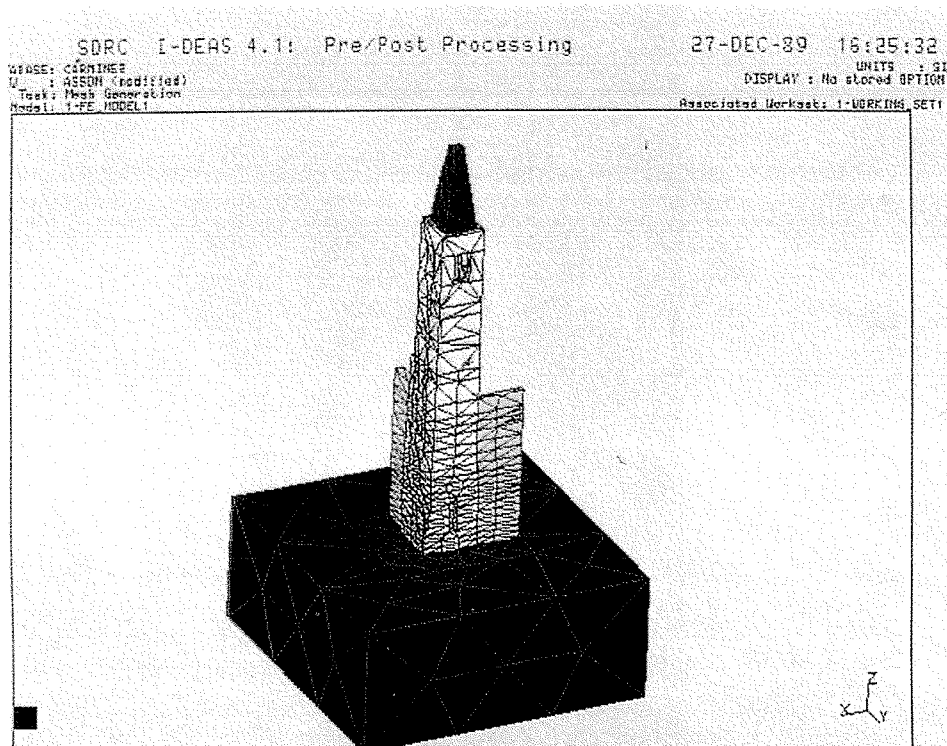


Fig. 9 Campanile del Carmine: modello ad elementi finiti.

Installazione di strumentazione e sistemi di monitoraggio

Il piano di strumentazione è stato elaborato con il seguente obiettivo: misurare il maggior numero possibile di grandezze al fine di acquisire elementi per diagnosticare degradi e costituire una base di dati per interpretare e correlare i fenomeni strutturali.

In particolare sono state identificate e classificate come possibili grandezze "causa": la temperatura dell'aria; la temperatura all'interno delle murature; la radiazione solare; la direzione e la velocità del vento; il livello idrico del fiume Ticino e (ad esso parzialmente correlato) il livello delle falde nelle zone prossime ai monumenti; il peso proprio delle strutture.

Sono state invece identificate come grandezze "effetto": l'apertura e la chiusura di lesioni; lo sfaldamento di rivestimenti superficiali (rivestimenti marmorei dei pilastri del Duomo); la fessurazione in piani verticali alla base delle murature a sacco delle torri; gli spostamenti globali delle strutture sia sul piano orizzontale che verticale; i cedimenti delle fondazioni.

Il piano si è pertanto sviluppato prevedendo le seguenti aree di misura:

Misura delle lesioni

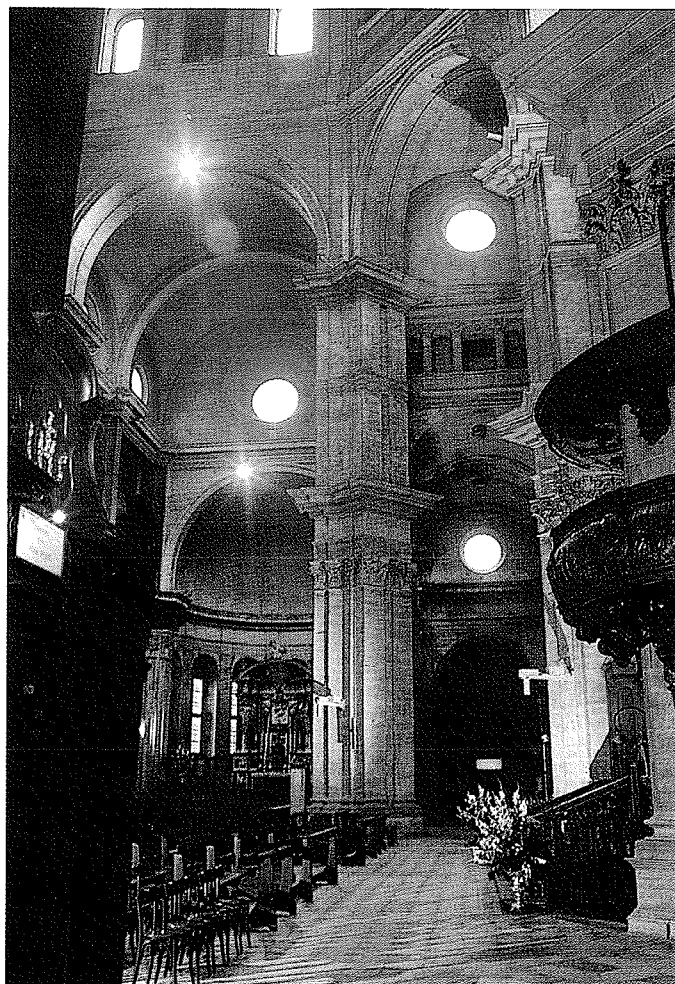
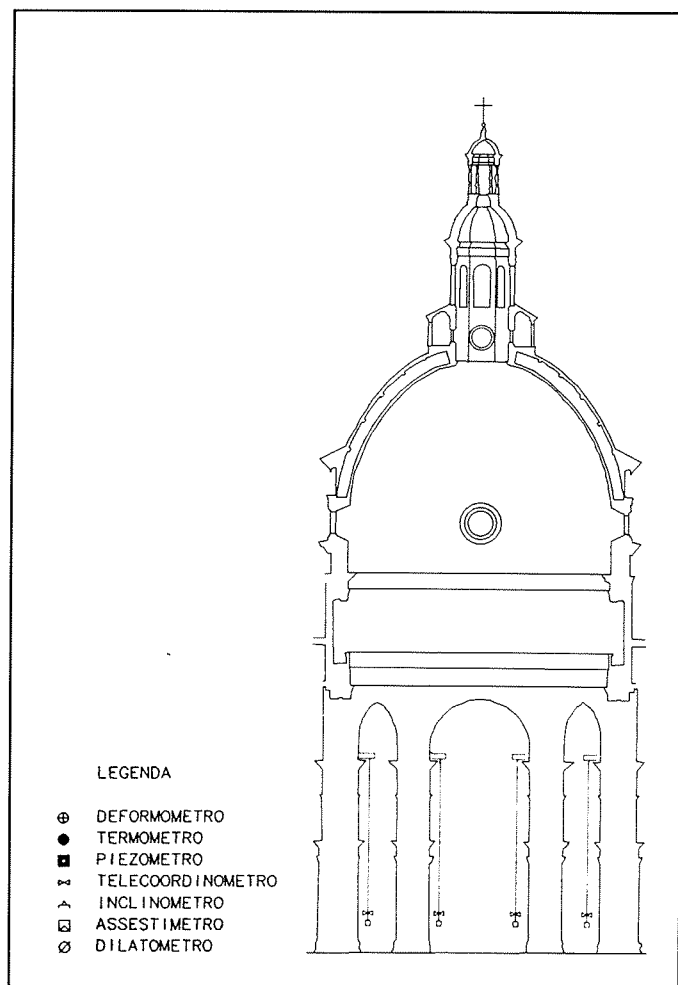
Sono state strumentate le lesioni che sono risultate di rilevante significatività all'esame del quadro fessurativo effettuato sulle sei Torri e sul Duomo. In particolare sono stati installati 29 deformometri sul Duomo ed 11 sulle torri. Sono state previste misure unidirezionali, intendendo cogliere solamente i movimenti di apertura/chiusura delle lesioni secondo la direzione perpendicolare all'andamento delle lesioni stesse e non gli eventuali scorrimenti o allontanamenti dal piano (figura 10).

Misura degli spostamenti globali delle strutture

Si è ritenuto particolarmente significativo rilevare gli eventuali movimenti del tamburo di imposta della Cupola del Duomo ed i movimenti sulla verticale di ciascuna delle sei Torri.

Fig. 11 Duomo: schema di installazione dei telecoordinometri.

Fig. 12 Duomo: telecoordinometri sulle colonne.



A tale scopo nel *Duomo*, per raccogliere informazioni riguardo eventuali spostamenti nel piano orizzontale delle estremità di ciascun lato dell'ottagono, si è prevista una strumentazione in grado di misurare le componenti radiali e tangenziali di tali spostamenti in corrispondenza di ogni pilastro dell'ottagono. La misura è stata realizzata attraverso un sistema di 8 fili a piombo, con lettura automatica delle coordinate, installati uno su ciascun pilastro. Il punto di attacco di ciascuno dei fili a piombo è realizzato

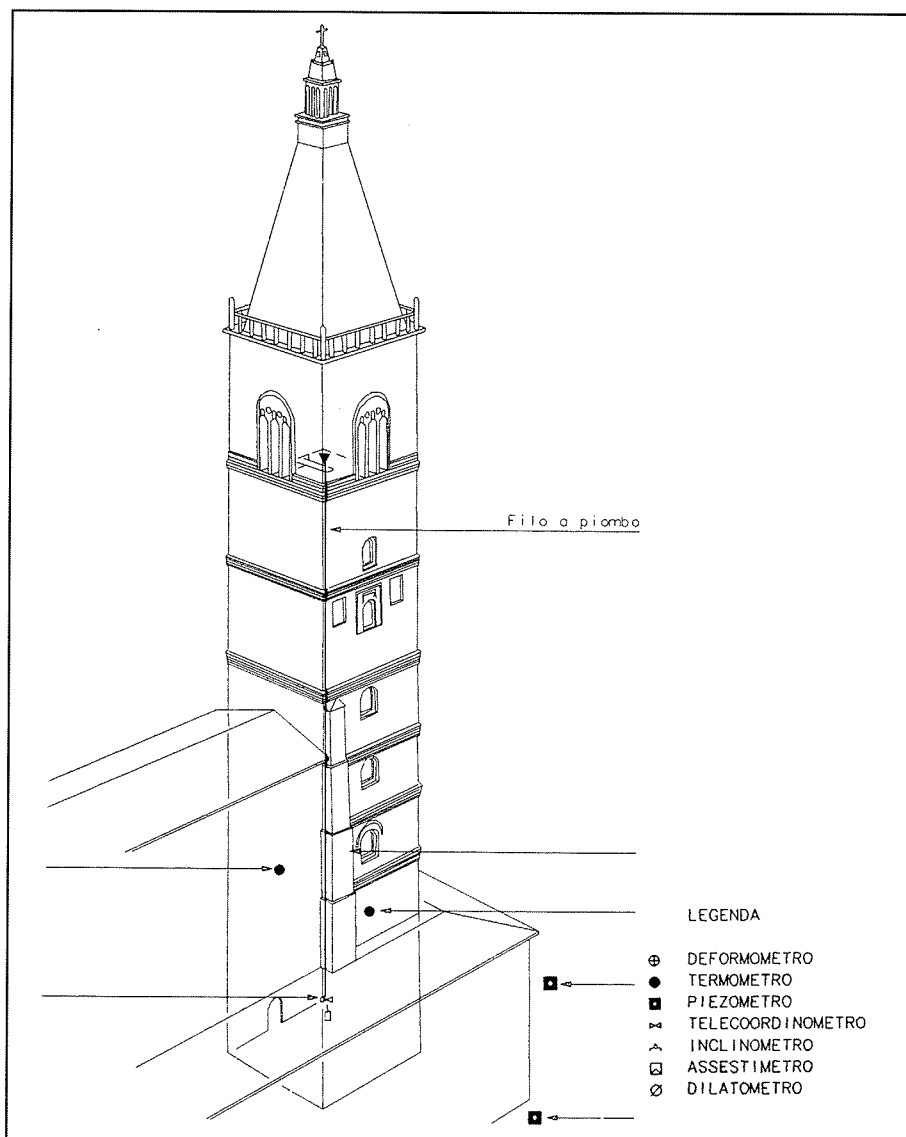


Fig. 14 Campanile del Carmine: telecoordinometro.

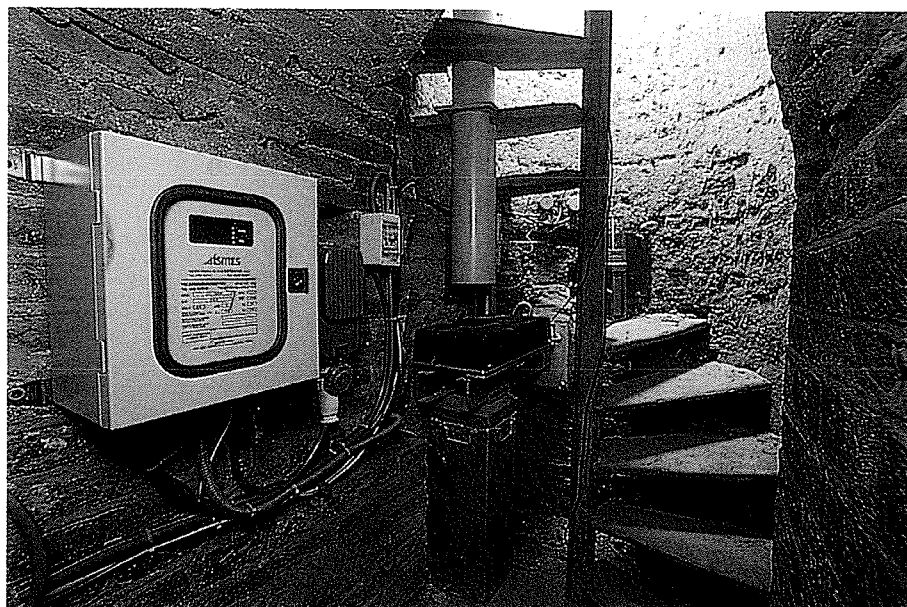


Fig. 13 Campanile del Carmine: schema di installazione della strumentazione.

in corrispondenza del primo ballatoio a quota circa 30 m. Le otto postazioni di misura, realizzate con Telecoordinometri ISMES TEL300, sono posizionate a circa 4 m dal piano terra alla base di ciascun pilastro (vedi schema della strumentazione installata in figura 11 e 12).

Per contro in *ciascuna delle sei Torri* si è prevista una strumentazione in grado di controllare la verticalità delle stesse mediante misura delle coordinate di un filo a piombo intercettato su un piano orizzontale a quota terra.

All'interno di ogni Torre è stato installato un filo a piombo con punto di attacco in sommità della Torre, su mensola a sbalzo e postazione di misura realizzata a quota terra o di poco superiore. Ogni postazione di misura è realizzata con telecoordinometro ISMES TEL 1000, montato su mensola a sbalzo (vedi schema della strumentazione installata sul campanile del Carmine in figura 13 e 14).

Misura dei cedimenti delle fondazioni

Al fine di ottenere informazioni sugli eventuali cedimenti differenziali delle strutture di fondazione, si è prevista l'installazione nel Duomo di un sistema livellometrico. La misura è effettuata attraverso un circuito livellometrico a vasi comunicanti costituito da 8 vasi mod. ISMES LCM3 installati alla base di ciascuno dei pilastri, collegati da un circuito idraulico (figura 15).

Per l'installazione dei livellometri sono stati realizzati otto pozzetti alla base dei pilastri; il vaso livellometrico è stato installato su mensola all'interno del pozzetto, solidale con le strutture di fondazione del singolo pilastro. Il circuito idraulico di collegamento degli otto vasi è stato posato all'interno di tracce a pavimento, ottenute mediante fresatura.

In una Torre campione (Torre S. Dalmazio), al fine di misurare eventuali rotazioni di base della struttura di fondazione, si è invece installato, sulla parete Nord, un inclinometro biassiale, montato su mensola a sbalzo.

Fig. 15 Duomo: schema di installazione del circuito livellometrico.

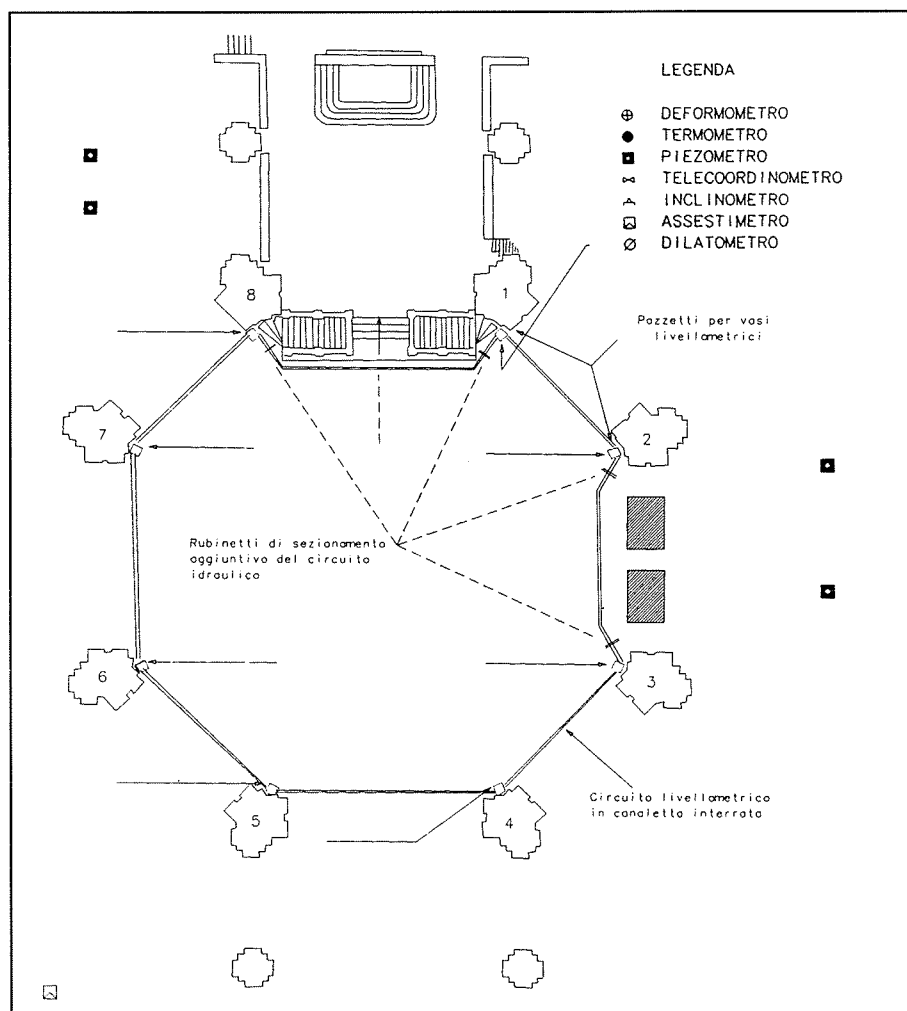
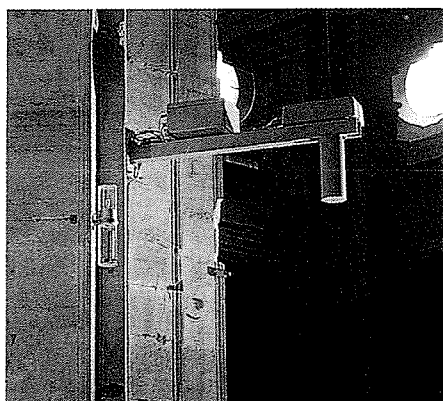


Fig. 16 Duomo: deformometro a filo e telecoordinometro su una colonna.



Misura degli sforzi sulle catene installate fra i pilastri 4 e 5 del Duomo

Per la misura dello stato di sollecitazione delle 2 catene di rinforzo applicate all'arco fra i pilastri 4 e 5, sono stati installati 6 estensimetri tipo strain gauge a mezzo ponte, uno per ognuna delle 3 barre costituenti una catena.

Misura delle deformazioni trasversali

Alla base della Torre dell'Università (Fraccaro), per misurare le eventuali deformazioni trasversali nello spessore dei muri, sono stati installati, all'interno di fori di carotaggio, due dilatometri a filo, perpendicolarmente alla muratura.

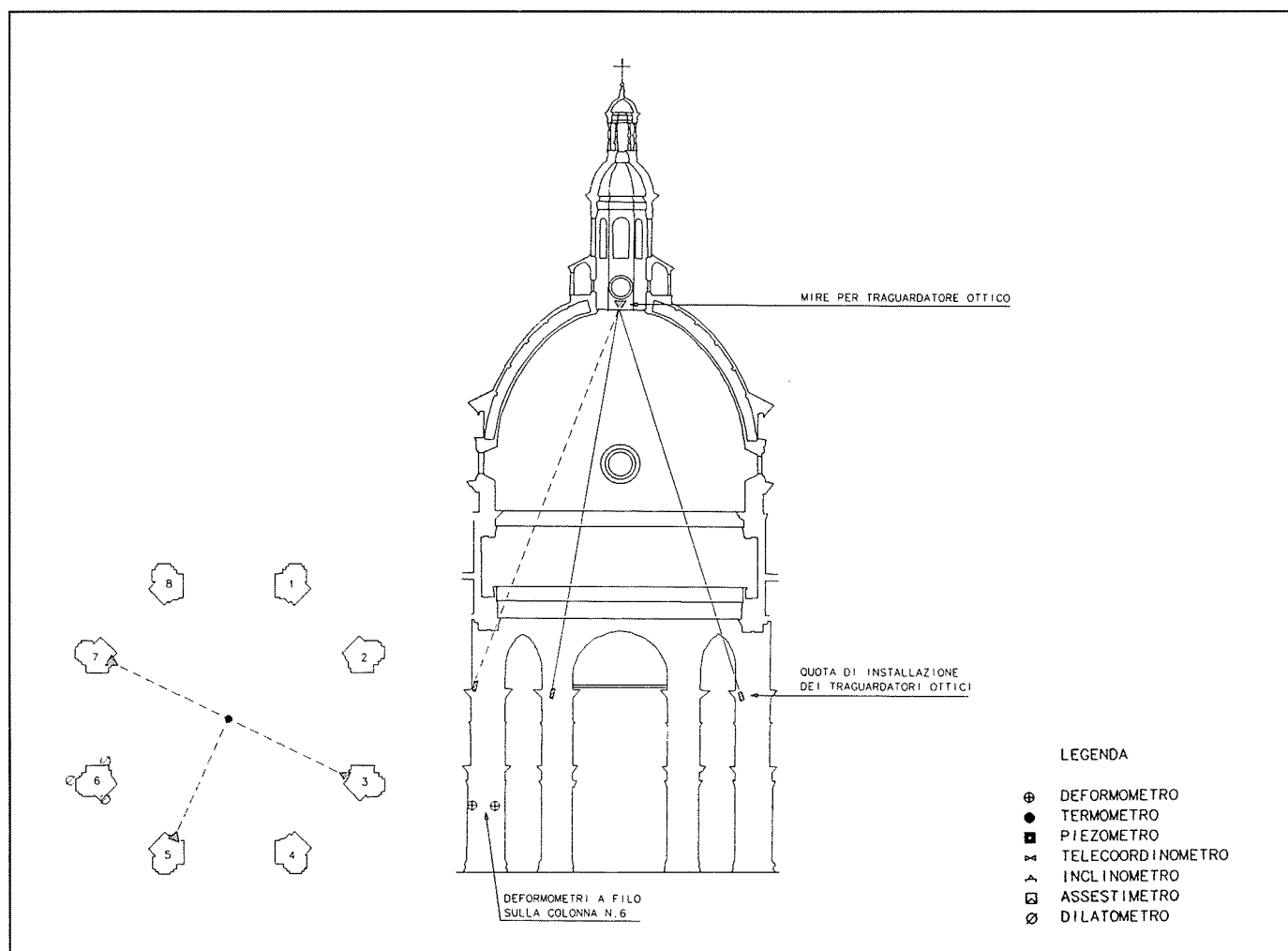
Analoghi strumenti, collegati in catena, sono stati installati sul pilastro n. 6 del Duomo, per misurare le deformazioni trasversali del pilastro (figura 16).

Misura degli spostamenti planimetrici della Cupola del Duomo

Per il controllo dei movimenti planimetrici dell'area della cupola, è stato installato un sistema costituito da 3 traguardatori ottici ISMES mod. MODOT. Tali traguardatori sono collocati sul primo ballatoio all'altezza dell'imposta degli archi, a quota di circa 30 m, in corrispondenza del punto di partenza dei pendoli (figura 17). Ciascun traguardatore inquadra un bersaglio illuminato (target) posto al centro della lanterna, assunta a vertice della cupola, in posizione perpendicolare all'asse ottico dello strumento. Ciascun strumento rileva gli spostamenti del suo bersaglio in una direzione perpendicolare relativamente al punto di installazione del traguardatore stesso (orizzontale, verticale, trasversale). Il sistema nel suo complesso fornisce quindi, dopo aver elaborato i dati, misure circa il movimento della cupola secondo le tre direzioni principali.

Le misure così rilevate sono rese assolute tenendo in considerazione i movimenti dei punti di appoggio dei traguardatori, riconducibili ai movimenti misurati sui singoli pilastri rispettivamente dai telecoordinometri per le direzioni X ed Y e dai livellometri per la direzione Z.

Fig. 17 Duomo: schema di installazione dei traguardatori ottici.



Misura delle grandezze causa

In prossimità della sommità della Cupola del Duomo è stata installata una stazione di misura meteorologica costituita da un sensore per la misura della temperatura dell'aria, da un sensore per la misura della direzione e velocità del vento e da un sensore per la misura della radiazione solare. Tali grandezze vengono ritenute comuni a tutti i siti di monitoraggio e costituiscono il riferimento per le analisi di correlazione fra cause ed effetti.

Per il ruolo fondamentale che rivestono le variazioni termiche sulla possibile evoluzione delle lesioni e sui movimenti delle strutture, risulta importante anche la conoscenza della distribuzione di temperatura nelle strutture. A tale scopo sono state previste due misure di temperatura all'interno di ciascuna Torre, rispettivamente all'interno della muratura della parete Nord e Sud e tre misure di temperatura nel Duomo, rispettivamente nella parete Nord e Sud-Ovest della Cupola ed, in aria, all'interno della Cupola stessa.

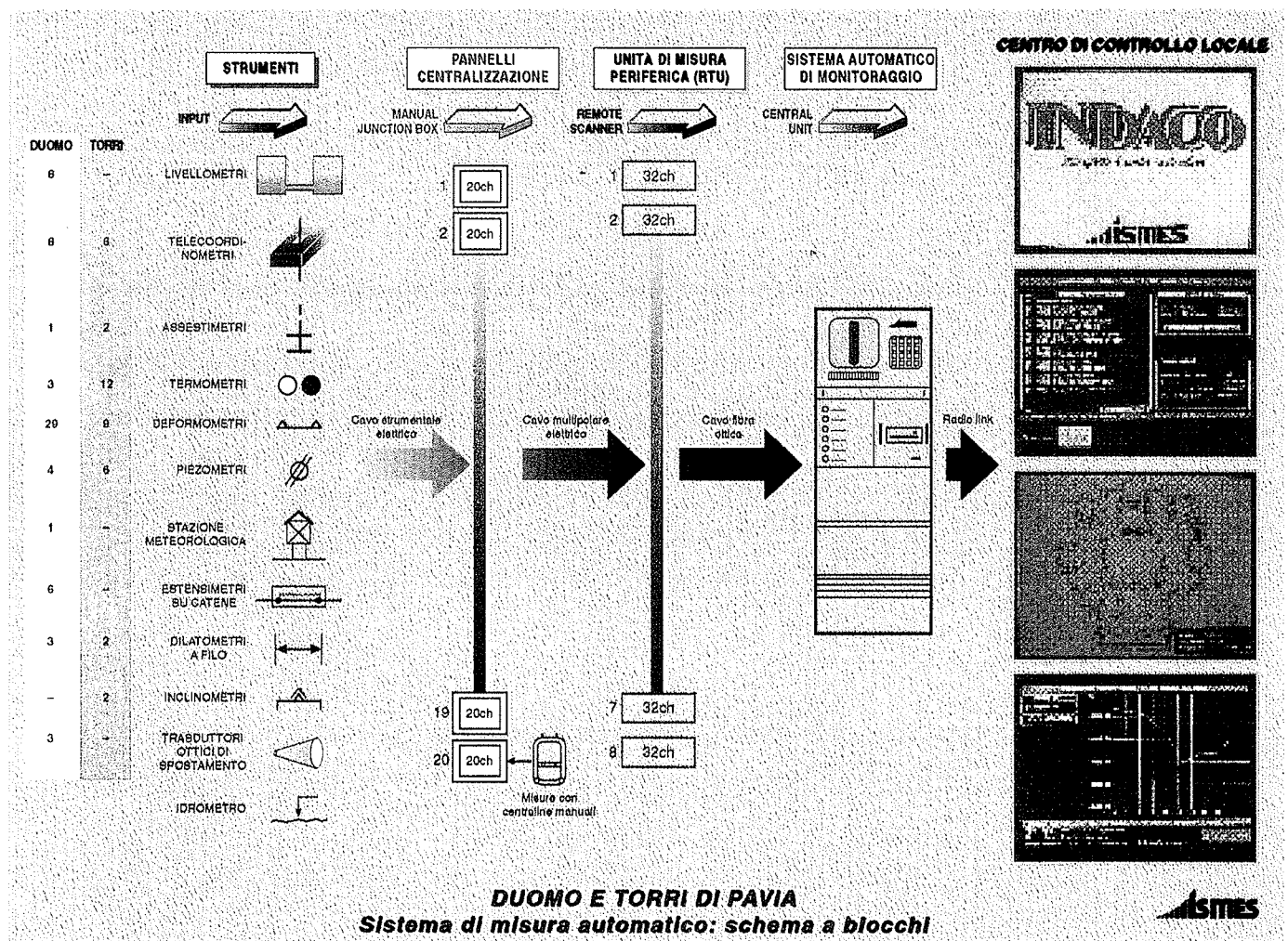
A completamento delle rilevazioni delle grandezze "causa" sono pure stati installati 10 piezometri nelle immediate vicinanze dei monumenti ed un misuratore di livello idrico sotto il ponte coperto sul fiume Ticino.

Rete automatica di acquisizione e trasmissione dati

Le esigenze che hanno giustificato la realizzazione di una rete di acquisizione e teletrasmissione possono così essere riassunte:

- Necessità di controllo continuo dei fenomeni in atto con acquisizione delle misure in qualsiasi condizione operativa. Le operazioni di lettura

Fig. 18 Schema a blocchi del sistema di monitoraggio.



manuale sarebbero infatti vincolate alla necessità di accedere alle numerose postazioni di misura sparse in vari siti rendendo discontinua ed onerosa l'operazione di rilevazione;

- Necessità di concentrare le informazioni ed i risultati delle misure in un unico centro dotato degli opportuni strumenti hardware e software per elaborare ed archiviare i dati raccolti attivando, sulla base di modelli predeterminati, eventuali segnalazioni di allertamento.

La rete è stata progettata in funzione della specifica distribuzione spaziale dei siti di monitoraggio e della tipologia e quantità dei sensori facenti capo ad ogni sito.

I principi guida alla base del progetto sono stati i seguenti:

- Le aree di monitoraggio sono cinque dislocate all'interno dell'area urbana; pertanto la rete si configura come una rete distribuita di acquisizione dati con una o più unità periferiche di acquisizione per ogni sito specifico. Vengono raccolti a livello di unità periferica i sensori facenti capo allo stesso edificio od a edifici vicini collegabili senza interferire con infrastrutture pubbliche.

- All'interno del sito di monitoraggio "Duomo", data la quantità e la distribuzione dei sensori, sarebbe risultato troppo oneroso, in termini di quantità e lunghezza dei cavi, concentrare a terra tutte le misure; pertanto sono state previste quattro unità periferiche di acquisizione dati dislocate a varie quote della cattedrale.

- E' stato previsto un collegamento via radio fra le unità periferiche di acquisizione ed il centro per la maggior flessibilità ed economicità della soluzione rispetto all'utilizzo di tratte dedicate di linee telefoniche pubbliche colleganti ciascun sito di monitoraggio con il centro di raccolta dislocato alla periferia della Città di Pavia.

La rete risulta pertanto costituita da 8 unità di misura periferiche collegate via radio al centro di raccolta installato presso il Dipartimento di Meccanica Strutturale della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia (vedi schema in Fig. 18).

Gestione, interpretazione delle misure ed elaborazione di procedure di controllo in linea

Le misure raccolte sono state periodicamente trasferite, per l'archiviazione storica, al sistema di gestione dati installato presso la Sede ISMES. La raccolta e l'archiviazione sistematica delle misure per circa tre anni hanno consentito di costituire una base di dati utilizzabile non solo per produrre tavole illustrative contenenti la diagrammazione delle misure nel tempo o il risultato di elaborazioni e correlazioni ma, soprattutto, per elaborare limiti e soglie da implementare nel sistema automatico ai fini del controllo in linea.

La lettura critica delle tavole contenenti le serie storiche delle misure ha permesso di evidenziare i comportamenti strutturali tipici e di depurarli delle anomalie strumentali. Le elaborazioni eseguite sulle serie storiche come combinazioni di grandezze causa e effetto hanno permesso di evidenziare, da un lato i movimenti planimetrici tipici delle strutture (in particolare dell'ottagono del Duomo e di ciascuna delle sei torri) e dall'altro di convalidare le presunte correlazioni esistenti fra la temperatura nelle sue escursioni giornaliere e stagionali e i movimenti delle strutture nonché delle fessure. Interessante, a tal proposito, è il risultato illustrativo dei movimenti planimetrici dell'ottagono del Duomo (Vedi Fig. 19) da cui si rileva che tutte le colonne tendano a spostarsi verso l'esterno dell'ottagono nei mesi caldi e verso l'interno nei mesi freddi coerentemente con le deformazioni della cupola legate alla temperatura ambiente.

Tutti i dati raccolti durante i tre anni di osservazione sono stati sottoposti ad analisi automatica di tipo statistico, al fine di identificare le soglie di sorveglianza da utilizzare quali indicatori sia di misure non attendibili dal punto di vista strumentale, sia di comportamenti strutturali "anomali". Le elaborazioni hanno permesso di definire sia per le grandezze classificate "

causa “ che per quelle classificate “effetto” i livelli di controllo e le fasce di tolleranza. In aggiunta ai controlli di validità strumentale della misura utilizzati per definire il campo caratteristico di funzionamento di ogni strumento sono stati identificati i seguenti controlli:

- controllo di soglia fisica, consistente nel verificare che la misura sia contenuta all'interno di un campo di variazione di tipo fisso o periodico, definito sulla base delle caratteristiche fisiche della grandezza e della evoluzione passata delle misure;
- controllo sulla velocità oraria di variazione della misura definito in valore assoluto sulla base dei valori registrati nel passato.

I valori di “soglia” sono stati determinati per essere implementati nel sistema di monitoraggio per un loro utilizzo “in linea “. Le soglie si configurano pertanto come uno strumento a disposizione dei tecnici incaricati della “sorveglianza” per uno svolgimento più efficace e tempestivo della loro attività.

Dato il metodo “statistico” (funzione della deviazione standard) utilizzato per la loro determinazione è lecito aspettarsi che il sistema evidenzierà:

- saltuariamente, delle segnalazioni di fuori soglia per misure rappresentative di situazioni regolari, ma ricorrenti con sufficiente bassa frequenza;
- eventuali nuovi comportamenti delle strutture discostantesi dalla tendenza manifestata nel passato.

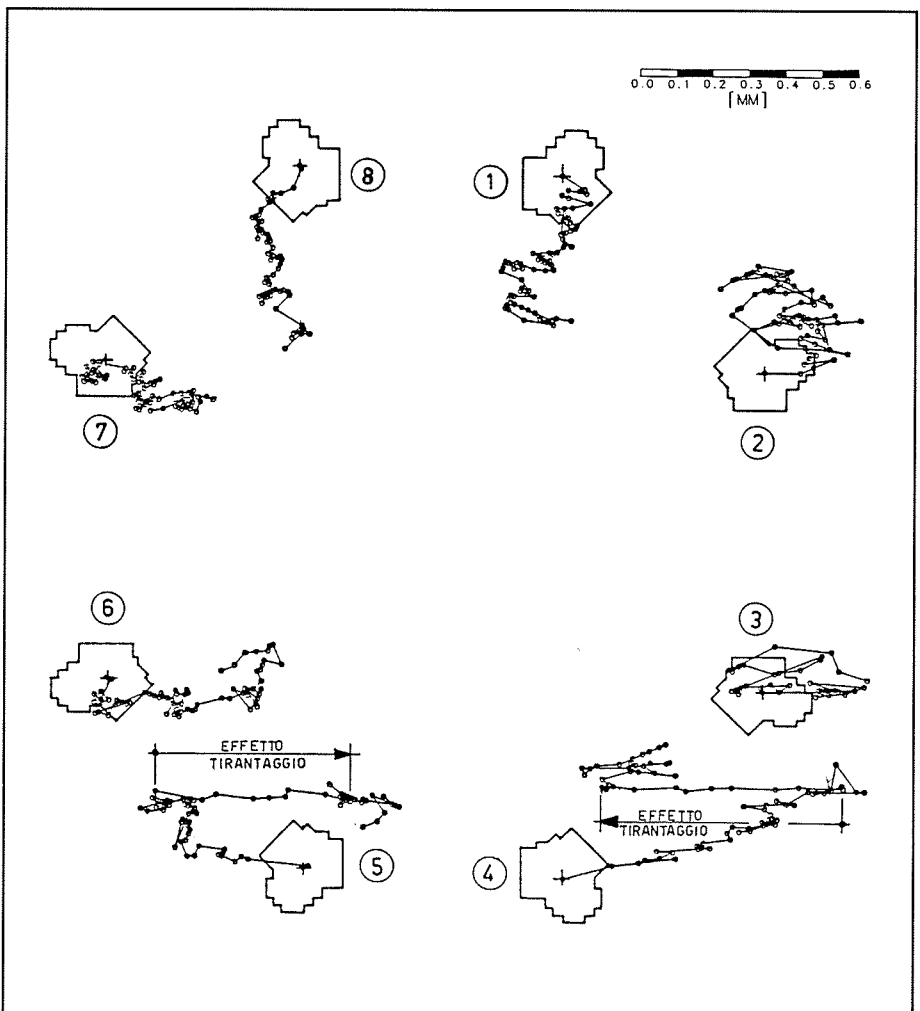


Fig. 19 Duomo: spostamenti planimetrici delle colonne dell'ottagono.