



In collaborazione con:
Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali
Dipartimento Scienze della Terra – Università della Calabria

“Conferenza Nazionale”
ARCHEOMETRIA DEL COSTRUITO
L’Edificato storico: Materiali, Strutture e Rischio sismico

6-7 Febbraio 2003

“RAVELLO” - Sala Convegni di Villa Rufolo -

Tecniche di Monitoraggio per il Controllo degli Stati di Dissesto sugli Edifici Storici

F. Miniaci*, G. Porco**, D. Romano**

* *Laboratorio S.M.S., Via C. Carrà, Rende (CS)*

** *Dipartimento di Strutture, Università della Calabria (CS)*

Sommario

Il patrimonio edilizio storico - artistico manifesta attualmente stati di dissesto dovuti sia, a cause naturali innescate dal degrado, sia a cause ambientali di tipo geologico e sismico. In tale contesto, è usuale intervenire su strutture in evidente stato di dissesto, sulle quali, la possibilità di prevenire eventuali condizioni di collasso locali o globali diventa un elemento di importanza primaria per la tutela del bene e degli addetti ai lavori. Attualmente notevole è l'impegno profuso dai ricercatori del settore, per studiare tecniche di monitoraggio affidabili ed a basso costo, attraverso le quali si possa giungere ad identificare il tipo di progressione fessurativa eventualmente presente sulle membrature portanti delle strutture.

È in questo filone di studio che si colloca la presente nota, dove, illustrate le tecniche di base per l'osservazione dei fenomeni fessurativi, verrà presentata una metodologia operativa per il controllo degli stati di dissesto.

Il protocollo proposto ha costituito la base di una campagna sperimentale condotta su un immobile Sacro ubicato in provincia di Cosenza che, a seguito di un evento sismico, ha manifestato un diffuso stato di dissesto. Di tale campagna sperimentale verranno illustrati i dati registrati e gli obiettivi raggiunti.

Introduzione

Negli ultimi decenni la continua richiesta di interventi di recupero e di consolidamento sugli edifici storici, unita alla ricerca dell'identificazione dei livelli di sicurezza sul patrimonio edilizio esistente, ha prodotto la nascita di nuove competenze in campo ingegneristico atte ad effettuare la diagnosi degli stati di dissesto sugli edifici ed a provvedere al monitoraggio nel tempo delle situazioni di sofferenza strutturale, in modo da prevenire crolli improvvisi, o situazioni di incipiente collasso [1], [2].

Infatti, quando le strutture vengono sollecitate oltre certi limiti o quando le membrature presentano condizioni di insufficienza in termini di resistenza dovute sia a fattori geometrici che meccanici si determinano i dissesti statici [3]. Tale condizione si manifesta con l'apparire delle lesioni, che interessano sia le opere cosiddette di finitura, quali intonaci, tramezzature, tamponature e rivestimenti, sia le membrature portanti.

Concettualmente l'evoluzione del quadro fessurativo indica che la struttura è alla ricerca di nuove configurazioni di equilibrio e di stabilità. Ovviamente l'incertezza di base consiste nel verificare che queste nuove configurazioni di equilibrio siano reali, vicine, ed effettivamente stabili. Le informazioni contenute nel quadro fessurativo esistente e cioè il tipo di progressione presente, come pure la dislocazione e la geometria delle fessure, possono essere utilizzate con duplice finalità. In particolare mediante attento monitoraggio è possibile garantire in piena sicurezza l'uso dell'immobile (per soli carichi verticali) prima di interessarlo da interventi di rinforzo strutturale, inoltre dalla osservazione delle progressioni si può stabilire se i movimenti in atto evolvono verso condizioni di equilibrio vicine e stabili.

L'analisi invece della morfologia del quadro fessurativo, della sua geometria e della posizione sulle membrature portanti, consente di risalire alle cause che lo hanno prodotto, consentendo di mirare al meglio gli interventi di consolidamento.

È in tale ottica che si inserisce la presente nota con la quale si vuole fornire un protocollo procedurale finalizzato all'osservazione dei quadri fessurativi, identificando preventivamente le tecniche strumentali adatte per le diverse situazioni di dissesto e fornendo successivamente, mediante l'osservazione dello stato di dissesto e l'interpretazione dei diagrammi spostamento – tempo, la possibilità ai tecnici del settore di prevenire incipienti condizioni di crisi.

Tale argomento è estremamente importante nello studio della valutazione della consistenza strutturale. Sono diverse, infatti, le situazioni in cui, la valutazione dei livelli prestazionali in opera avviene quando l'immobile è già sede di consistenti e profondi fenomeni fessurativi. L'accertamento quindi, della possibile attività del fenomeno fessurativo e del tipo di progressione in atto, diventa un forte vincolo da rimuovere, per poter usufruire in piena sicurezza della struttura già in fase d'indagine [4], [5].

Il protocollo procedurale proposto è stato validato applicandolo, per la verifica dell'efficienza su un immobile Sacro e, attraverso la raccolta dei dati sperimentali verrà mostrato nelle sezioni seguenti, come l'osservazione temporale del dissesto consente di prevenire condizioni di crisi a tutela della pubblica incolumità e del patrimonio artistico.

1.0. Protocollo procedurale per il controllo dei quadri fessurativi

Mediante l'osservazione delle lesioni si può arrivare alla determinazione delle cause perturbatrici e di conseguenza, allo studio ed all'applicazione dei necessari rimedi di primo intervento o di natura definitiva. Esiste, infatti, una corrispondenza biunivoca fra dissesti (cause) e lesioni (effetti) ossia, assegnato uno di questi fattori, l'altro resta determinato.

Il protocollo procedurale proposto, basato su questi concetti generali, ha, come obiettivo fondamentale, quello di fornire ai tecnici del settore tutti i dati necessari per valutare reali situazioni di pericolo e di fornire utili indicazioni sulle cause del dissesto. L'architettura del protocollo è costituita dalle seguenti fasi:

1. Rilievo dei quadri fessurativi e graficizzazione dello stato di dissesto;
2. Identificazione delle tecniche d'acquisizione dati;
3. Individuazione dei punti da sottoporre a monitoraggio;
4. Campagna d'indagine sperimentale.

Il rilievo dei quadri fessurativi rappresenta il primo passo verso l'identificazione di quella che sarà la loro evoluzione futura. I quadri fessurativi sono degli utili elementi per valutare il livello di sicurezza della struttura e attraverso la loro analisi ed interpretazione, è infatti possibile evitare che si possano innescare crolli o meccanismi di collasso.

Per l'individuazione dei meccanismi di collasso è necessario che le lesioni siano accuratamente rilevate, documentate e classificate singolarmente e, successivamente, riassunte in schemi complessivi che consentano una valutazione globale del fenomeno.

Per ogni lesione è necessario rilevare:

- la posizione e la forma;
- le diverse ampiezze nelle zone d'apice e di ventre;
- se sono di recente o pregressa formazione;
- l'evoluzione degli spostamenti.

In riferimento a quest'ultimo punto, sulle lesioni principali è necessario predisporre, un sistema di controllo della evoluzione delle ampiezze, registrando gli incrementi di spostamento (spostamento tra l'istante t e l'istante $t-1$).

La successiva graficizzazione degli spostamenti totali in funzione del tempo porta ad identificare le progressioni fessurative.

Sulle strutture è possibile riscontrare tre diversi tipi di progressione:

- Progressione ritardata: la progressione ritardata è caratterizzata da spostamenti sempre più attenuati nel tempo, che tendono ad estinguersi per lo stabilirsi di una situazione di equilibrio definitivo;
- Progressione accelerata: la progressione accelerata è caratterizzata dalla evoluzione repentina nel tempo dei quadri fessurativi che inducono la struttura verso stati di equilibrio lontani dalla condizione attuale o addirittura a condizioni di collasso locali o globali del complesso;
- Progressione costante: il fenomeno di crescita è caratterizzato da uno sviluppo costante che in un tempo non quantificabile oggettivamente, evolverà in moti di progressione ritardata o accelerata.

Il livello di rischio associato alle diverse tipologie di progressione è alto per quella accelerata, basso per quella ritardata e infine medio per la progressione costante.

Naturalmente la suddivisione riportata è puramente indicativa in quanto, in opera, i diagrammi di spostamento presentano nel complesso evolutivo a volte tutte e tre le tipologie canoniche.

La possibilità di disporre dei diagrammi di spostamento è legata alla tecnica di controllo ed alla strumentazione scelta per il monitoraggio.

Per quanto attiene alla identificazione delle tecniche di controllo la scelta è vincolata alla complessità del fenomeno ed anche alla apparente situazione di pericolo. Solitamente si preferisce utilizzare tecniche miste, cioè sia manuali che automatiche, tuttavia la manifesta pericolosità dovute ad evidenti ed incipienti condizioni di crisi, limita la scelta della tecnica di osservazione alle sole centraline automatiche.

Gli strumenti dovranno essere posizionati sui punti identificati durante le operazioni di rilievo, e dopo aver classificato le lesioni in principali e secondarie.

Infatti, i punti di osservazione dovranno preferibilmente essere ubicati sulle lesioni che sono direttamente collegate con il fenomeno di dissesto, cercando così di evitare le lesioni secondarie che registrano in ritardo gli effetti dovuti alle cause perturbatrici.

2.0. Tecniche di monitoraggio dei quadri fessurativi

Le tecniche di monitoraggio dei quadri fessurativi oggi a disposizione sono molteplici, alcune obsolete come ad esempio i fessurimetri, altre tecnologicamente avanzate come i sensori a fibre ottiche. Nella metodologia proposta sono stati presi in considerazione due tipi di strumenti: i deformometri e i sensori automatici con centraline di acquisizione dati. Di seguito verranno descritte brevemente le caratteristiche tecniche delle due strumentazioni.

2.1. Misure dirette mediante deformometro

Quando il livello di approssimazione deve essere più accurato, ed in particolare quando la situazione di dissesto sotto osservazione è molto impegnativa, per cui è necessario rilevare anche gli spostamenti più piccoli, si ricorre all'uso del deformometro (Fig.1).



Fig.1 – Deformometro e capisaldi in acciaio

Il deformometro è uno strumento di misura, che consente letture degli spostamenti relativi a cavallo delle fessure utilizzando basi a partire da 50 mm. E' costituito da una

barra invar alle cui estremità sono montate due testine munite di punte coniche. Una delle testine è fissa, mentre l'altra è libera di effettuare una certa rotazione attorno ad un speciale coltello.

I punti di misura vengono posizionati a cavallo delle fessure più rappresentative e sono costituiti da capisaldi in acciaio con guida per la testina conica saldati a dei perni filettati inseriti all'interno della muratura. Le letture indicate sul micrometro, si riferiscono al movimento della testina ruotante conseguente all'eventuale spostamento dei capisaldi o punti di misura (Fig.2). I valori letti devono essere trasformati attraverso il fattore di Gauge proprio dello strumento.

La rilevazione periodica delle distanze, effettuata ad intervalli temporali, definiti in base al tipo di dissesto ed al tipo di struttura in esame, consente di tracciare dei diagrammi di spostamento utili a riconoscere il tipo di progressione in atto.



Fig.2 – Punti di misura

2.2. Monitoraggio dei quadri fessurativi con acquisizione automatica degli spostamenti

L'uso del deformometro, risolve il problema dell'accuratezza della misura, spingendo gli spostamenti letti a valori dell'ordine di $1/100$ di millimetro o più, consente inoltre, di effettuare letture negli intervalli predefiniti giungendo comunque alla identificazione del tipo di progressione in atto sull'immobile. Ha tuttavia un difetto di fondo, e cioè, è necessaria la presenza di un operatore, per tutte le letture.

Tale condizione è estremamente vincolante e rappresenta un serio limite nel caso in cui l'immobile presenti incipienti condizioni di collasso. In tali circostanze è opportuno ridurre al minimo la presenza del personale tecnico, utilizzando un sistema di acquisizione dati collegato ad un gruppo di sensori.

Il sistema di rilevamento automatico si compone dei seguenti elementi:

- ❑ Acquisitore dati LPA dotato di batterie al litio con possibilità di registrazione modulabile e per un tempo massimo di sei mesi dotato di scheda GSM per la trasmissione dei dati in altro sito;
- ❑ Sensori di spostamento, trasduttori lineari e tridimensionali: vengono installati sulla struttura e servono per rilevare il fenomeno fisico in atto;

- Cavi di collegamento;
- Computer portatile per la elaborazione dei dati provenienti dalle centraline di acquisizione, visualizzazione in tempo reale.

Il sistema di monitoraggio è riportato nella figura 3 dove sono raffigurati quattro sensori di spostamento in opera collegati ad una centralina di acquisizione.



Fig.3 – Sensori di spostamento e centralina di acquisizione

3.0. Un caso di studio

Al fine di verificare l'affidabilità del protocollo procedurale proposto, è stata sottoposta a monitoraggio una chiesa in stato di crisi ubicata nel comune di Rogliano (CS) (Fig.4).

L'immobile sacro è attualmente chiuso al culto, in quanto interessato da un profondo stato di dissesto su diverse membrature portanti, prodotto dall'evento sismico che ha investito il territorio di Rogliano il 18 Ottobre del 2001.

L'immobile presenta in pianta un corpo centrale e due navate laterali. Lateralmente sono ubicati il campanile e i locali destinati alla sacrestia (Fig.7).



Fig.4 – Chiesa di S.Lucia, Rogliano (CS)

La particolarità dell'immobile è quella di presentare piani di posa delle fondazioni a quote differenti. Infatti, per come è rilevabile dalla figura 8, le murature presenti sul lato

opposto a quello del campanile, hanno il piano di innesto delle fondazioni più basso rispetto al resto dell'immobile.

Tale condizione geometrica ha esposto in modo rilevante questa parte della struttura all'evento sismico che ha manifestato in più parti evidenti condizioni di collasso (Fig.5, 6).



Fig.5,6 - Fessure sugli archi

La presenza di un diffuso stato di dissesto ha reso necessario procedere al monitoraggio dei quadri fessurativi per riscontrare la presenza di stati di attività ed identificare incipienti condizioni di crisi.

Nella campagna di monitoraggio effettuata, sono stati utilizzati due tipi di strumenti uno manuale e l'altro automatico. Il tipo automatico, formato da due centraline con otto canali di acquisizione, è stato posizionato nella navata laterale sinistra, ad esclusione di due sensori che sono stati posizionati sulle murature dell'altare. Tale sistema ha permesso di effettuare letture in modo continuo degli spostamenti delle fessure principali ad intervalli di 2 h. Il sistema manuale, costituito da basi deformometriche, è stato utilizzato per monitorare i quadri fessurativi presenti sull'altare. Altri punti di misura sono stati posizionati sulle volte secondarie della navata laterale sinistra e sugli archi.

Nelle figure 7-11 sono riportate la pianta dell'immobile e le rispettive sezioni con l'ubicazione delle basi di misura e la numerazione di identificazione.

La campagna di monitoraggio è stata avviata il 29 Novembre 2001, registrando periodicamente l'evoluzione degli spostamenti della struttura fino al 29 Maggio 2002.

Per brevità, sono state riportate le registrazioni eseguite sulle basi più rappresentative. In particolare, per come è evidente nelle figure 12 – 14, già all'avvio della campagna sperimentale sono stati identificati segni di attività. Su diverse basi, ubicate nelle zone maggiormente danneggiate, le registrazioni hanno manifestato progressioni accelerate, evidenziando evoluzioni verso stati di collasso. Tale evidenza ha consentito di provvedere tempestivamente al puntellamento delle membrature portanti riuscendo così a bloccare le evoluzioni accelerate e riducendo il fenomeno ad una fase di quiete. Infatti, per come è rilevabile dai grafici, l'effetto delle puntellature installate (Febbraio 2002)

ha indotto una riduzione degli incrementi di spostamento producendo diagrammi con andamento orizzontale, propri di uno stato di quiescenza del fenomeno fessurativo.

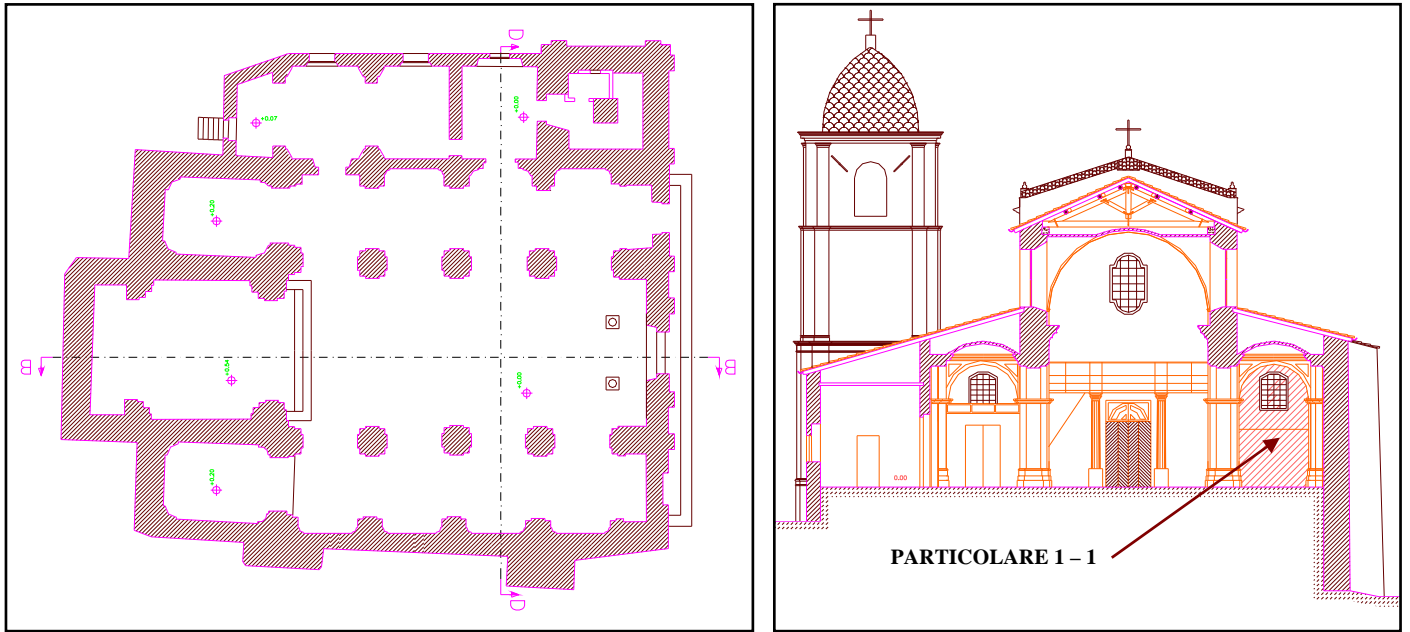


Fig.7,8: Pianta piano primo, Sezione D - D

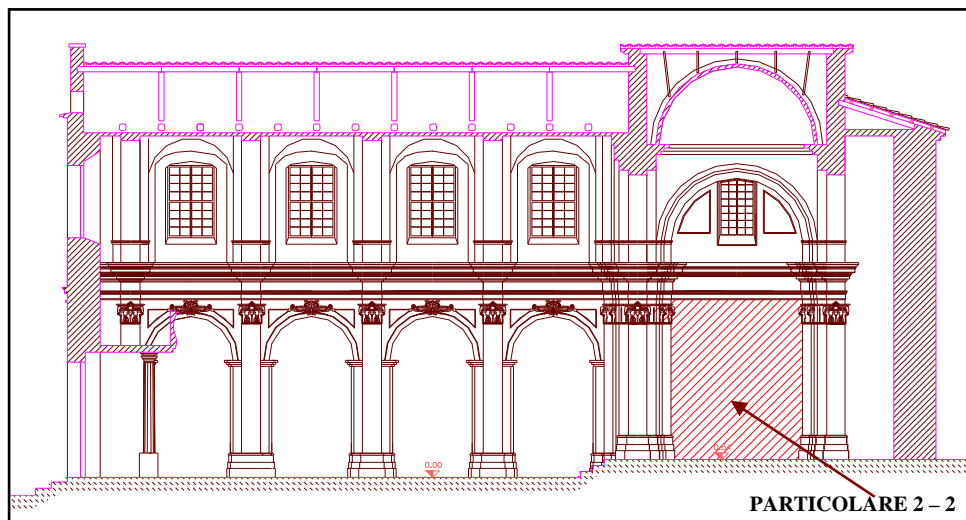


Fig.9 - Sezione B - B

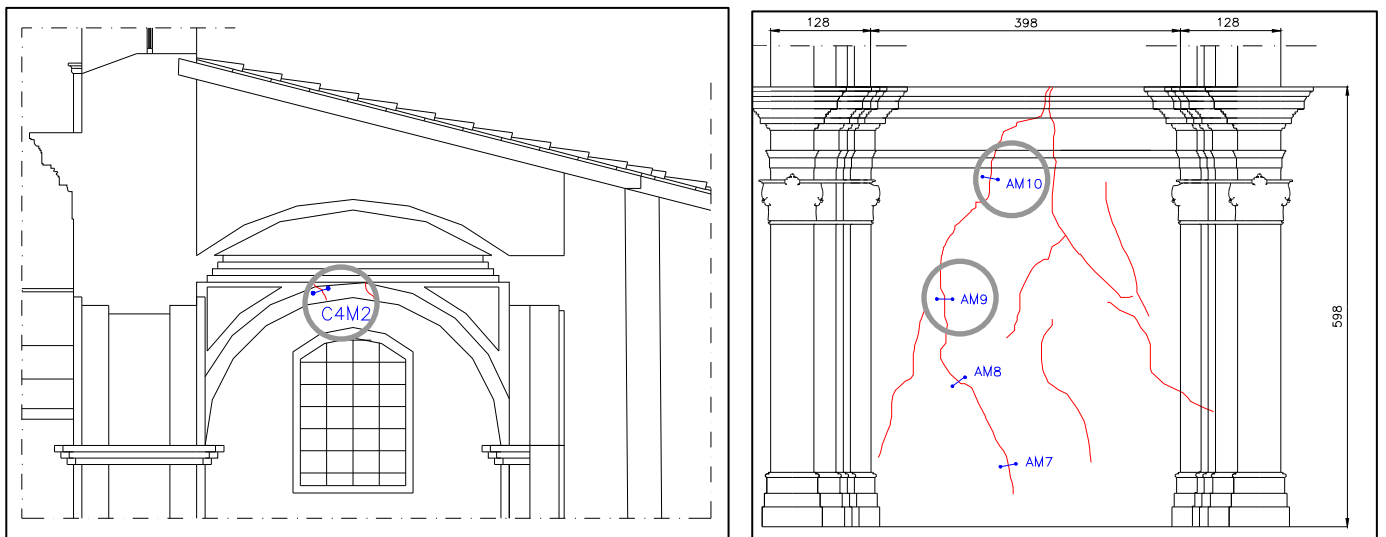


Fig.10,11 - Particolari 1 - 1 e 2 - 2

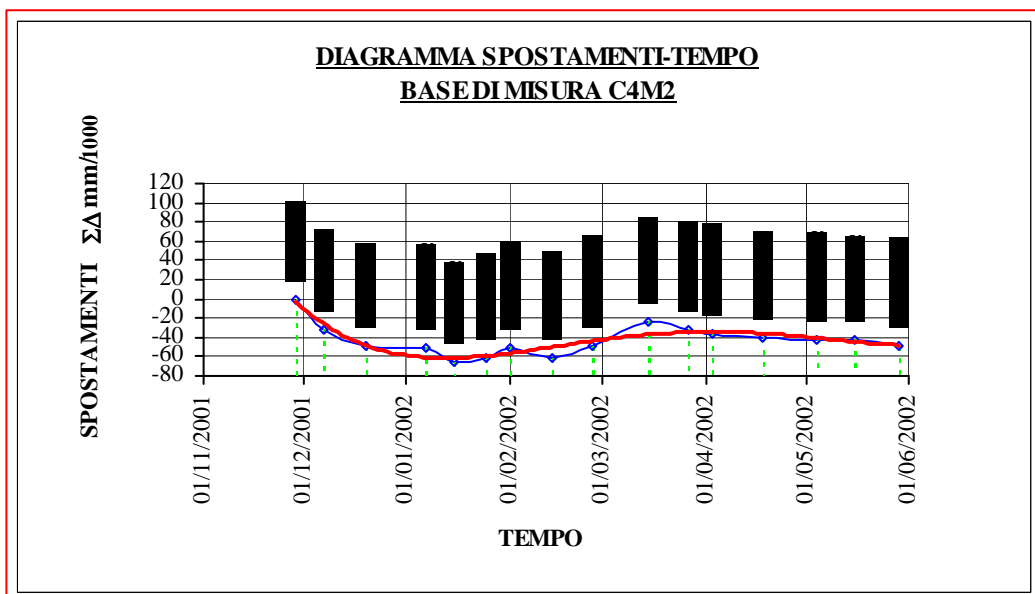
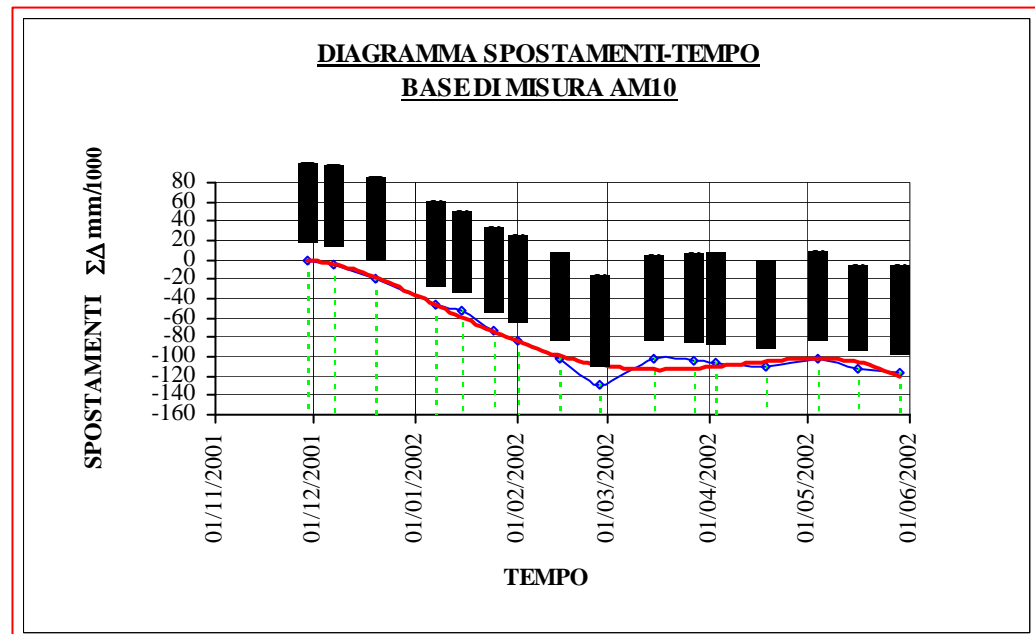
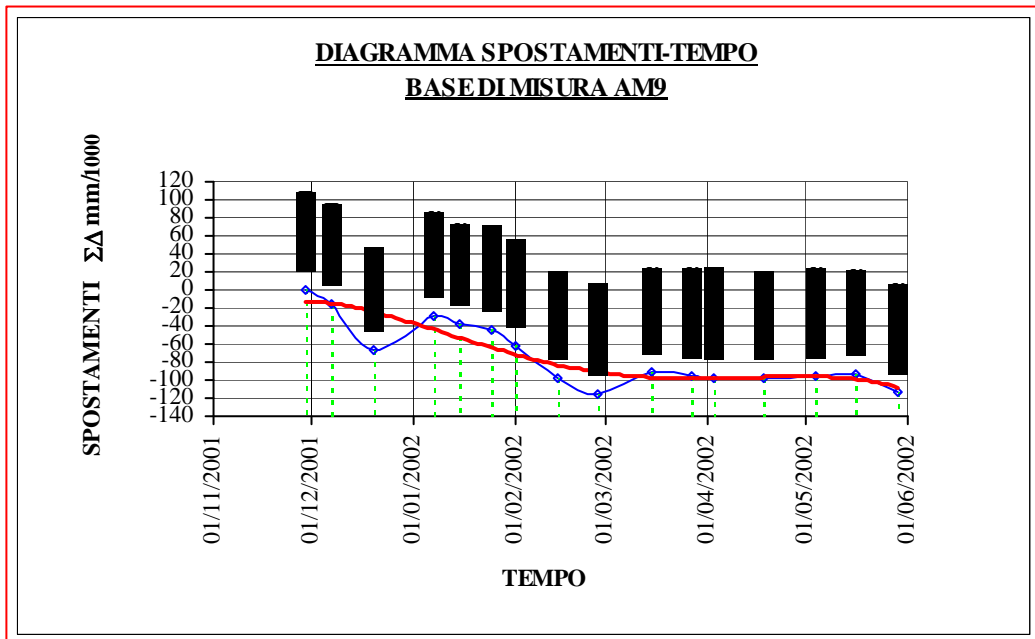


Fig.12 – 14: Diagramma Spostamenti - Tempo

4.0. Conclusioni

La possibilità di effettuare valutazioni oggettive sullo stato di consistenza degli edifici storici è oggi pienamente conseguibile mediante tecniche di monitoraggio manuali e automatiche. In particolare, attraverso l'uso di sensori, centraline di acquisizione dati e di personal computer è possibile effettuare un monitoraggio continuo nel tempo dei quadri fessurativi attraverso il quale, il tecnico può valutare le reali condizioni di rischio a tutela della pubblica e privata incolumità.

L'insieme delle operazioni da attivare per l'analisi di uno stato di dissesto e presentate in questa nota, sotto forma di protocollo procedurale, costituiscono un efficace strumento di controllo e di diagnosi.

La campagna sperimentale condotta ha infatti consentito di identificare sia condizioni di attività sia di prevenire il crollo di una parte di un immobile a valenza storico – artistica. Tuttavia la complessità dei fenomeni di dissesto e la singolarità degli eventi richiedono, per una validazione più generale del protocollo proposto, altre osservazioni sperimentali su strutture a diversa tipologia portante e muraria.

Bibliografia

- [1] Malerba P. G., *“Monitoraggio delle strutture dell'ingegneria Civile”*, CISM – International centre for mechanical sciences – Collana di ingegneria strutturale N°9 (1995).
- [2] Casanova N., Inaudi D., Colombo G., *“Monitoraggio mediante sensori a fibre ottiche”*, XX Convegno di Geotecnica, 25 Settembre 1999, Parma.
- [3] Mastrodicasa S., *“Dissesti statici delle strutture edilizie”*, Hoepli Editore Milano.
- [4] AA.VV., *“Raccolta monografica: elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali provenienti dal sistema di monitoraggio della cattedrale di Santa Maria del Fiore – Firenze”*, Bollettino degli ingegneri, Vol.38, n°1-2, 1991.
- [5] Chiarugi A., Fanelli M., Giuseppetti G., *“Diagnosis and strengthening of the Brunelleschi dome”*, Iabse Symposium, Roma 1993.