M. Marchisio*,1, L. D'Onofrio1, E. Forlani2, S. Cerri2

1. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa, via Diotisalvi 2, 56126 Pisa (Italy)

2. SGAI, via Mariotti 20, 47047 Morciano di Romagna (Italy)

Abstract

The Geophysical Laboratory of the Dipartimento di Ingegneria Civile of the University of Pisa has been active in researches on the application of non-pervasive geophysical surveys on the masonry structures of historical buildings for more then ten years.

The diagnostic study of the masonry structures is always complex, but in the case of historical buildings the problem becomes still more delicate.

On the other hand a thorough evaluation of the actual status of the structures is quite necessary both to obtain a descriptive information of the condition of the monument and to provide the designers of the restoration works with concrete data.

A diagnostic survey at least must enable to infer the hidden geometries of the masonry structures and to spot out the presence of defects, cavities, humidity. The possibility of obtaining reliable estimates of the mechanical characteristics of the structural parts is still more important.

We employ for diagnostic purposes some of the geophysical methodologies that are usually applied to the ground surveys. Of course the instrumental technologies must be adapted. The results proved to be very effective while costs and work times are affordable.

In particular the use of micro-seismic methods allows to evaluate the dynamic elastic moduli of the materials, from which the mechanical characteristics of the masonry can be inferred for the static checks and for the design of the restoration works. Tomographic seismic methods are specially efficient.

Several results of the extensive diagnostic surveys performed in the Duomo of Lucca (Tuscany) and in the Cathedral of Nicosia (Sicily) are shown.

Riassunto

Presso il Laboratorio di Geofisica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa sono attive da più di dieci anni ricerche sull'applicazione di metodi non invasivi di origine geofisica allo studio delle strutture murarie di edifici storici.

Il problema dello studio diagnostico delle strutture murarie, sempre complesso, diventa infatti ancor più delicato quando l'oggetto dei lavori sono edifici monumentali.

D'altro canto la valutazione dello stato di fatto nelle strutture murarie è necessaria sia per una diagnostica preliminare sulle condizioni del monumento sia per fornire dati concreti ai progettisti degli interventi di restauro.

In generale le indagini diagnostiche devono essere come minimo in grado di evidenziare le tipologie delle strutture murarie e le loro geometrie nascoste e di individuare la presenza di difetti, cavità, umidità. Ancora più importante è la possibilità di ottenere stime delle qualità meccaniche delle strutture.

L'impiego diagnostico, pur con tecnologie di misura molto diverse, di alcune metodologie geofisiche normalmente usate per le indagini nel sottosuolo ha permesso di ottenere informazioni di grande utilità con tempi e costi decisamente contenuti.

L'utilizzazione di metodi microsismici in particolare permette di ottenere stime dei moduli elastici dinamici, importanti per valutare anche le caratteristiche meccaniche delle murature per le verifiche statiche e per la progettazione di interventi. Particolarmente efficace risulta l'applicazione di metodi sismici tomografici.

Vengono illustrati alcuni importanti interventi diagnostici effettuati sul Duomo di Lucca e sulla Cattedrale di Nicosia (Enna).

* E-mail: m.marchisio@ing.unipi.it

1. INTRODUZIONE AL PROBLEMA

Il complesso problema dello studio diagnostico delle strutture murarie diventa ancor più complicato quando l'oggetto dei lavori sono edifici monumentali che per il loro particolare valore consentono solamente interventi non pervasivi (o, al massimo, "poco pervasivi").

D'altro canto la valutazione dello stato di fatto nelle strutture murarie è necessaria sia per una diagnostica preliminare sulle condizioni del monumento (per esempio per segnalare la necessità di un eventuale intervento di restauro strutturale), sia per fornire dati concreti ai progettisti degli interventi di restauro.

In generale le indagini diagnostiche devono essere almeno in grado di evidenziare il tipo di struttura muraria (muri compatti od a sacco, spessori dei paramenti, ecc.) e la presenza di difetti nascosti (vuoti, distacchi, *leafs*, presenza di umidità, ecc.). Per le analisi statiche per la verifica o per la progettazione di interventi è importante valutare anche le qualità meccaniche delle murature, fornendo stime dei moduli elastici e/ o coefficienti di Poisson.

È di interesse ricordare che mentre nei materiali omogenei (come l'acciaio, ecc.) la resistenza non è legata ai moduli elastici, invece nelle murature, in pietra o in mattoni, sia la resistenza sia la rigidezza dipendono dalle modalità costruttive e dalla qualità delle malte. Di qui discende la poca rappresentatività del carotaggio e conseguenti prove di laboratorio per la loro puntualità e settoriazione che non classificano l'insieme. La valutazione in sito dei moduli elastici della struttura muraria nel suo complesso, diventa un elemento irrinunciabile per una corretta diagnostica arealmente rappresentativa.

Fino a pochi anni fa l'unica tecnica disponibile per prove *in situ* era il "martinetto piatto": metodo lento e relativamente costoso, che richiede dei tagli che provocano un danneggiamento locale nella struttura muraria e risultati puntuali definiti solo localmente, dipendendo dal materiale di contrasto.

Altri metodi classici, come ad esempio gli Ultrasuoni o le "Prove Soniche", non sono indicati per particolari applicazioni dove è nota la presenza di disomogeneità locali, sia superficiali, sia interne alla muratura.

Da più di dieci anni al Laboratorio di Geofisica del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa si studiano queste problematiche e sono attive ricerche sull'applicazione di metodi geofisici non invasivi di indagine con tecniche microsismiche.

Lo scopo di questi studi è quello di ottenere in situ informazioni arealmente significative sulla situazione effettiva delle strutture murarie. Le tecniche adottate si sono dimostrate particolarmente efficaci nel mettere in evidenza situazioni di danneggiamento locale, dato che sono in grado di fornire allo stesso tempo una *descrizione geometrica* della situazione all'interno delle strutture ed una *valutazione* dei moduli elastici dinamici per mezzo delle velocità sismiche.

Tra i vantaggi che le metodologie microsismiche offrono rispetto alle tecniche classiche si ricordano in particolare: la velocità di esecuzione, la non-pervasività delle misure, la riduzione dei costi e l'ampiezza dell'area indagata (da contrapporsi alla puntualità alle tradizionali indagini, non sempre rappresentative).

È opportuno mettere in evidenza che sono molto delicate sia la fase di acquisizione dati sia quella del trattamento ed interpretazione. Dato infatti che le distanze sorgenti-sensori sono molto inferiori a quelle usuali per le operazioni sul terreno (tipiche delle indagini geofisiche), si devono valutare tempi di percorso delle onde estremamente piccoli, anche inferiori al millisecondo: la loro corretta valutazione richiede un'accuratezza estrema sia nelle operazioni *in situ* sia nella lettura dei tempi di arrivo sui sismogrammi. Anche il trattamento dei dati con programmi di ricostruzione tomografica richiede controllo dei parametri ed esame critico dei risultati durante le varie fasi.

In alcuni casi particolari si sono usate anche altre metodologie importate dalla Geofisica, come le tomografie geoelettriche.

2. ASPETTI METODOLOGICI

Il problema principale, per una corretta valutazio-

ne delle velocità sismiche su piccola scala, è la necessità di misurare *i tempi di percorso* delle onde sismiche (o soniche) dall'istante che corre dall'energizzazione iniziale ai trasduttori riceventi, questi tempi sono di uno-due ordini di grandezza inferiori rispetto alle usuali indagini sul terreno.

Per ottenere la risoluzione necessaria è necessario lavorare con frequenze molto elevate che richiedono l'utilizzo di alte frequenze caratterizzate da una forte attenuazione del segnale sismico durante la loro propagazione. Nella maggior parte dei casi, per esempio, gli ultrasuoni non sono utilizzabili per indagini su strutture murarie, specialmente "a sacco": infatti al loro interno le energizzazioni vengono totalmente attenuate nel giro di pochi centimetri: si possono utilizzare con successo solo su elementi strutturali monolitici, come colonne o capitelli.

La banda di frequenza che si è dimostrata adatta a questo tipo di indagini è risultata quella delle alte frequenze soniche. Questa banda corrisponde però ad un buco tecnologico nei sensori disponibili sul mercato, tra i geofoni costruiti per indagini sismiche ed i trasduttori ad ultrasuoni.

Per le nostre indagini sono stati reperiti ed adattati allo scopo sensori che permettono di lavorare fino a 4000-5000 Hz.

Le procedure operative adottate per le nostre indagini su murature sono molto diverse da quelle consuete nel campo dell'Ingegneria Civile: sia le "prove soniche" sia quelle ad ultrasuoni si basano infatti sulla misura diretta dei tempi di percorso tra un Trasmettitore ed un singolo Ricevitore e sulla valutazione della *velocità media* delle onde. Questo metodo è corretto su materiali omogenei, ma nel caso delle murature è fortemente influenzato dalle disomogeneità locali sia superficiali che interne, che possono falsare completamente i risultati.

Nelle nostre prove si utilizzano stendimenti di numerosi ricevitori collegati a registratori sismici multicanale.

A seconda delle situazioni, le indagini possono venire effettuate disponendo i sensori lungo *profili* sulle superfici delle strutture murarie, con le modalità della Sismica a Rifrazione, oppure utilizzando tecniche tomografiche: Tomografie per Trasparenza, secondo sezioni piane attraverso lo spessore delle strutture murarie, o SST - Sondaggi Sismici Tomografici - che richiedono un singolo foro di carotaggio in cui inserire un'apposita attrezzatura con la catena dei trasduttori di ricezione (questa tecnica è l'unica utilizzabile con risultati affidabili quando non siano accessibili entrambe le facce del muro e si possa lavorare su un solo lato). Le prime forniscono la distribuzione delle velocità sismiche nella sezione piana indagata, evidenziate con tecniche grafiche per mezzo di scale di colori o di toni di grigio. In Figura 1 (vd. Marchisio e Sambuelli, 1990) è riportato un esempio di tomografia piana effettuata su di una colonna di arenaria del cortile di un palazzo rinascimentale (il Real Collegio di Lucca). In questo caso per l'acquisizione si è usata un'apparecchiatura ad Ultrasuoni.

Gli SST forniscono invece l'andamento delle velocità sismiche lungo l'asse del foro di carotaggio.

Una breve descrizione delle tecniche sopra elencate è riportata in Appendice, insieme ad alcuni esempi.



Fig. 1 – Tomografia piana effettuata su di una colonna (Real Collegio di Lucca - 1991).

Si riportano i risultati degli studi effettuati sulle strutture murarie di due chiese cattedrali, il San Martino a Lucca e San Nicolò a Nicosia (En).

3. LE INDAGINI EFFETTUATE SUL COMPLESSO MONUMENTALE DEL DUOMO DI S. MARTINO A LUCCA (1994-1998)

La costruzione del Duomo di Lucca (dedicato a S. Martino), sulla precedente chiesa anselmiana, risale agli ultimi decenni del XII secolo e si protrasse fino ai primi del XIII secolo. Subì sostanziali lavori di ingrandimento ad est (zona absidale) nel secolo XIV, con evidenti modificazioni ormai gotiche (nel verticalismo, in una maggiore articolazione dei particolari, nelle grandi finestre) pur inserendosi nello schema romanico iniziale. Nei secoli successivi subì numerosi interventi, che non ne alterarono l'insieme armonico, soprattutto all'esterno, fino ad assumere l'aspetto odierno nel XVI secolo.

Il Campanile sorge in aderenza alla fabbrica del Duomo di S. Martino e alla Casa dell'Opera del Duomo (oggi sede della Banca del Monte di Lucca). La torre risale, nella sua parte inferiore, che dovrebbe arrivare fino all'altezza della monofora, ad epoca precedente al XII secolo ed è probabile che la particolare forma della facciata del Duomo sia dovuta alla necessità di adeguarla alla struttura preesistente del Campanile. Esiste notizia certa, riportata in un documento del 1274, che fin dal 1261 si stesse lavorando al Campanile che probabilmente ebbe in questa fase le sue aperture fino al livello delle trifore. La costruzione del Campanile continuò probabilmente fino ai primi anni del



Fig. 2 - Duomo e Campanile di S. Martino (Lucca)

1300 e, come date certe, vi è notizia che tra il 1320 ed il 1324 vennero poste le campane maggiori. Dopo questa data non si ha più menzione di lavori di edificazione se non per interventi di manutenzione, restauro e consolidamento dato che la torre fu colpita ripetutamente dai fulmini (Fig. 2).

Sul complesso monumentale di S. Martino sono stati effettuati due cicli di indagini diagnostiche con metodi microsismici.

Il primo è stato eseguito sulle strutture murarie del Campanile in occasione di una serie di rilievi e verifiche effettuati a causa del degrado osservato soprattutto nelle parti interne della torre.

Il secondo ha riguardato le strutture del transetto sinistro del Duomo, ed è stato motivato dalla presenza di dissesti sul muro ovest del transetto sinistro, dove si apre il grande arco di ingresso.

3.1. Il Campanile

Per formulare una proposta operativa di intervento per la conservazione del Campanile di S. Martino a Lucca, la fase di studio e analisi delle sue condizioni statiche è stata preceduta da quella di rilievo fotogrammetrico e topografico e da quella di studio dei materiali che hanno così consentito di definire il degrado e di dedurne le cause.

Dal rilievo eseguito è emerso come le strutture portanti verticali siano state eseguite dai costruttori medievali seguendo due differenti tecniche costruttive murarie. La parte più antica, che arriva al livello della monofora, è in muratura di materiale lapideo costituito da blocchi spianati e squadrati di pietra di Guamo, disposti a corsi paralleli e ben connessi aventi uno spessore variabile da un massimo di 3 m alla base fino ad 1,8 m in corrispondenza della parte più alta. Nella parte più elevata della torre è stata invece adottata una soluzione costruttiva mista costituita, procedendo dall'interno verso l'esterno, da un paramento in mattoni di laterizio pieni collegato ad una muratura di pietrame rifinita da un rivestimento esterno che, per i primi tre ordini di aperture, è realizzato con conci di pietra di Guamo mentre, per gli ultimi due, da conci di marmo di San Giuliano; la struttura è poi completata da lesene in pietra ringrossate ai quattro spigoli.

Dai carotaggi eseguiti eseguiti si è accertato che la muratura, nella parte più alta della torre, a spessore pressocché costante, pari a circa 1,20 m, ed è costituita da un parametro interno in muratura di mattoni pieni di laterizio con spessore di circa 40 cm (tre teste), da un interno di muratura di pietrame dello spessore di circa 60 cm rifinito all'esterno da un parametro in pietra. Durante i sopralluoghi si è costatato che le parti in pietra di Guamo sono in buono stato di conservazione mentre le parti realizzate con tecniche miste presentano un diffuso quadro fessurativo caratterizzato da lesioni che hanno origine generalmente dalla sezione in chiave degli architetti delle polifore ed andamento pressoché verticale interessando sia i commenti che alcuni mattoni. Si è anche rilevato che, nel tempo, si sono susseguiti vari interventi di manutenzione con il metodo dello scuci-cuci; alcune parti hanno subito processi di degrado fisico-chimico.

Le prove eseguite riguardano la valutazione della resistenza delle malte ed i moduli elastici delle strutture. Per la valutazione della resistenza delle malte si è applicata la nuova tecnica non distruttiva denominata PNT-G (vd. Gucci N., Barsotti R., A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ, «Materials and structures», 28, 1995, pp. 276-283 e Gucci N., Sassu M., Resistenza delle murature: valutazione con metodi non distruttivi, il Penetrometro PNT-G, «L'Edilizia», 2, 2002, pp. 36-42), che consente di misurare il lavoro di perforazione necessario per praticare con un trapano una piccola cava nei giunti e di metterlo in relazione con la resistenza della malta. Le prove sulla malta sono state eseguite sia in situ, sui giunti affioranti nelle pareti, sia in laboratorio sulle carote prelevate. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza che la malta del nucleo murario ha buone caratteristiche di resistenza a compressione che varia tra i 70 e i 100 daN/cm² mentre la malta delle parti più superficiali ha subito processi di degrado che ne hanno diminuito la resistenza per spessori di circa 10-15 cm.

Per la valutazione dei moduli elastici sono state eseguite nella struttura una serie di misure microsismiche. Oltre ad un serie di profili a rifrazione, si sono eseguite prove sperimentali non distruttive con metodi tomografici.

Non essendo disponibili ponteggi per accedere all'esterno della torre, si è pensato di utilizzare, per la prima volta su strutture murarie, la suaccennata tecnica di sondaggio tomografico SST. Questa era stata sviluppata negli anni antecedenti per indagini ad alta risoluzione sul terreno, ed aveva dimostrato una elevatissima capacità di individuare strati deboli ed una elevata affidabilità nella stima dei moduli elastici dinamici dei vari strati.

Queste prove richiedono l'esecuzione di un singolo foro di carotaggio. Per questo progetto è stata sviluppata un'attrezzatura da foro costruita *ad hoc* per introdurre i sensori nel foro e fissarli solidamente alle sue pareti durante le misure (ϕ = 60 mm; 6 sensori; lunghezza di circa un metro).

Sono stati eseguiti diversi profili a rifrazione, sia in direzione orizzontale sia verticale, in varie parti delle superfici interne della torre e 10 profili tomografici SST nei 5 fori di carotaggio eseguiti *ad hoc.*

Fig. 3 – Andamento della velocità all'interno del muro del campanile.

Le risposte hanno messo in luce una certa disuniformità di rigidezza nelle varie zone, nonché una notevole anisotropia tra percorsi orizzontali e verticali. Le tomografie SST hanno messo in evidenza una "stratificazione" nella struttura muraria. In particolare, procedendo dalla superficie interna verso l'esterno, le velocità sismiche raggiungono nei primi 30-40 cm valori compresi tra 1.300-1.400 m/s, mentre nei successivi 30-40 cm aumentando fino a 1.600-1.700 m/s; in alcuni casi nella parte terminale del foro si evidenzia una leggera diminuzione della rigidezza (Fig. 3).

L'andamento di questi profili concorda con l'ipotesi fatta sulla costituzione della muratura verificata in base alle carote estratte e permette di affermare che la muratura di pietrame, compresa tra il parametro interno di mattoni di laterizio e quello esterno di rivestimento in conci di pietra direttamente accostati, ha buone caratteristiche di resistenza: non si tratta di un riempimento "a sacco" ma della principale struttura portante: uno schema è riportato in Figura 4.

La diminuzione della velocità (rigidezza) riscontrata negli ultimi centimetri del foro avviene proprio in corrispondenza del passaggio dalla struttura interna al paramento esterno, e può



Fig. 4 – Muro a sacco.

esser spiegata dalle modalità costruttive della muratura: infatti la necessità di collegare i conci esterni in pietra (che presentavano una certa conicità) alla muratura interna comportava riempimenti locali con pietre più piccole ed una maggiore percentuale volumica di malta.

Dai valori della velocità è stato poi possibile stimare i moduli elastici dinamici. I moduli elastici statici sono stati successivamente valutati pari al 90% di quelli dinamici e nelle verifiche di stabilità sono stati assunti i valori più bassi tra quelli sperimentati; si è adottato pertanto per il modulo elastico statico della muratura di pietra il valore $E_{mp} = 0.9 \times E(_{mp}) d_{min} = 0.9 \times 35.000 =$ $31.500 dN/cm^2$ mentre per la muratura di mattoni il valore $E_{ml} = 0.9 \times E(_{ml}) d_{min} = 0.9 \times 25.000 =$ $22.500 dn/cm^2$.

Le verifiche strutturali, effettuate utilizzando i carichi valutati in base all'accurato rilievo geometrico ed i valori dei moduli elastici derivati dalle prove microsismiche, hanno dato risultati positivi per la stabilità dell'imponente edificio, ed hanno permesso di consigliare un restauro solo di tipo "cosmetico".

3.2. Il transetto del Duomo di Lucca

Questo studio, che riguarda in particolare il lato sinistro del transetto, è partito dalla fortuita scoperta di una situazione di dissesto nel muro O, dove si apre un grande portale di ingresso.

Questo muro ha una lunghezza complessiva di circa 9 m., un'altezza di 28 m, ed uno spessore alla base di circa 1,15 m. La continuità della parete è interrotta dal grande portale di ingresso il cui vano libero misura circa 4 m di larghezza per 6 m di altezza; il suo architrave è rettilineo dal lato interno, foderato da un rivestimento lapideo, e si trasforma sull'esterno, attraverso una strombatura a semicono contenuta all'interno del muro, in un arco decorato da paraste in breccia rosata e da colonnine accantonate in marmo. In asse al portale si apre un'ampia finestra ad arco di dimensioni 2,5 m \times 5,4 m circa e, ancora più in alto, due "occhi" del diametro di 80 cm, attualmente tamponati dal lato interno, rifiniscono il prospetto. Il muro si estende verso destra all'interno della chiesa con un arco che raggiunge i 14 m di altezza in chiave e sorregge una volta a crociera di mattoni dello spessore di circa 18 cm e le estremità delle due capriate lignee che sostengono la copertura del transetto. Il paramento esterno è costituito da conci di marmo perfettamente squadrati e spianati, disposti su corsi orizzontali e paralleli con giunti sottilissimi, mentre quello interno è costituito da bozze di verrucano su corsi tendenzialmente orizzontali e paralleli.

Il muro N, a questo ortogonale, si estende per circa 25 m e presenta ambedue i paramenti interno ed esterno in conci di marmo, disposti su corsi orizzontali e paralleli perfettamente squadrati e spianati. All'interno è fatto uso del nastrino, mentre all'esterno sono levigati ed hanno giunti sottilissimi. Parallelamente alla parete O, a distanza di circa 6 m da questa, si estende un'altra parete, ortogonale al muro Nord, sulla quale si aprono due archi sormontati da trifore in pietra.

Il primo segnale di dissesto risale al 1993, quando un Monsignore, camminando in prossimità della parete O, fu colpito da una scheggia che si era appena distaccata dal paramento esterno e segnalò il fatto. La Soprintendenza fu immediatamente avvisata e furono effettuati alcuni sopralluoghi con la partecipazione di esperti.

In quella occasione furono notate e rilevate deformazioni degli elementi architettonici, lesioni sul muro, in particolar modo sul paramento lapideo esterno, e fenomeni di degrado della pietra e della malta. Sulla faccia esterna si evidenziano infatti lesioni, alcune delle quali si traducono in separazioni degli elementi lapidei, mentre altre, più preoccupanti, interessano le due paraste in breccia ed alcune pietre al livello della finestra, accompagnate da numerose scheggiature sugli spigoli delle lastre.

Si rilevò inoltre la sensibile deformazione delle quattro colonnine di marmo accantonate, poste ai lati del portale che, visibilmente inflesse, presentavano, in corrispondenza della mezzeria, uno scostamento di qualche centimetro dalla verticale.

Dato il pericolo di collasso improvviso che è tipico delle antiche costruzioni in pietra (vd. il crollo del Campanile del Duomo di Pavia), con-



Fig. 5 – Pianta con l'ubicazione delle tomografie sismiche effettuate.

temporaneamente ad urgenti provvedimenti per la messa in sicurezza di quella parte del Duomo, partirono immediatamente indagini con diverse metodologie, tra le quali quelle microsismiche.

Alcune tomografie sismiche per trasparenza (il piano di posizione è riportato in Figura 5) evidenziarono immediatamente una situazione estremamente seria nella muratura, da entrambi i lati del portale di ingresso nel transetto stesso: nella parte interna infatti vaste zone a bassissima velocità sonica segnalavano un gravissimo degrado di quello che doveva essere il muro portante interno. La parte interna della parete risultava praticamente a rigidezza nulla per diversi metri. In Figura 6 sono riportate quattro delle tomografie ottenute: le T1 (Fig. 6a) e T3 (Fig. 6b), effettuate ai lati del portale, evidenziano nella parte interna le zone fortemente degradate, mentre le T4 (Fig. 6c) e T8 (Fig. 6d), effettuate sulla parete N del transetto e sulla parete della navata sinistra, indicano velocità (e rigidezza) elevatissime.

Dati i carichi molto elevati (che gravavano ormai solo sui paramenti murari esterni) le condizioni di stabilità strutturale risultarono alle immediate verifiche statiche estremamente precarie e la situazione era di grave pericolo. Il transetto sinistro venne immediatamente chiuso al pubblico ed il portale murato.

Le tomografie sismiche sono state il primo segnale forte della situazione di pericolo.

Una serie di tomografie è stata poi eseguita sulle pareti adiacenti, sia nel transetto (parete N) sia in navata sinistra. Fortunatamente queste non hanno evidenziato altri problemi.

Le tomografie hanno messo in evidenza molti dettagli strutturali. La descrizione della situazione ottenuta da queste prove è stata perfettamente confermata da una serie di investigazioni di vario tipo e dalle accurate indagini storiche.

Sulla sezione tra il portale del transetto e l'angolo con la navata, in corrispondenza esatta con la tomografia sismica T3, è stata eseguita anche una prova con tecniche di tomografia geoelettrica.

In questo caso si indaga la resistività elettrica dei materiali: questa è in genere estremamente elevata nei materiali costituenti le strutture murarie in pietra, ma non è correlabile alla loro resistenza meccanica, mentre è estremamente sensibile alla eventuale presenza di umidità.

Le prove sulla sezione considerata sono state eseguite utilizzando 24 mini-elettrodi fissati lungo un profilo verticale sul paramento interno del muro, nelle posizioni dei ricevitori utilizzati per la tomografia sonica. Il contatto elettrico è stato migliorato utilizzando un gel conduttivo.

Verificata la compatibilità tra le resistenze tra gli elettrodi e l'impedenza di ingresso dello strumento utilizzato (IRIS SYSCAL multi-elettrodo) si sono eseguite due serie di misure con tecnica polo-dipolo e dipolo-dipolo. Le pseudo-sezioni di resistività apparente così ottenute sono state invertite e trasformate in tomografie elettriche lineari, riportate in Figura 7. In entrambi i casi risulta ben evidente la presenza di aree conduttive dovute alla presenza di umidità.

4. La cattedrale di san nicolò a nicosia (en) - 1998

«Nicosia, vetusta città della Sicilia, edificata dai Greci, abitata da' Romani, distrutta da' Barbari,



Fig. 6 – Alcuni esempi di tomografie sismiche (a,b,c,d).

49

ELECTRIC TOMOGRAPHIES



Fig. 7 – Tomografia elettrica (a: dipolo-dipolo; b: polo-dipolo).

50



Fig. 8 - Cattedrale S. Nicolò di Nicosia (En).

dagli Erbitesi ristabilita, da' Normanni e Lombardi accresciuta, sorge pressoché al centro del Val Demone...»: così il Beritelli-La Via la descrive a metà del secolo scorso.

Ripopolata, in particolare, al tempo dei Normanni per sostituire gli Arabi con genti provenienti prevalentemente dall'attuale Liguria e Piemonte (a seguito del matrimonio del Conte Ruggero con Flandina dei Marchesi di Monferrato) subì alterne vicende al passare delle dominazioni Sveva, Aragonese, Borbonica fino ad entrare sotto il Regno d'Italia, con periodi di prosperità e di decadenza.

Nel periodo Aragonese, nella prima metà del '300 venne edificata la splendida Chiesa di S. Nicolò (Fig. 8). Pochi decenni più tardi, fu rialzata la Torre Campanaria con le grandi finestre gotiche del secondo piano (probabilmente il primo piano era stato costruito dagli Arabi). Tra la fine del '400 e gli inizi del '500 fu eseguito lo splendido ciclo di pitture sul soffitto ligneo.

Profondi rimaneggiamenti alla fine del '500 ed agli inizi dell''800 hanno riguardato prevalentemente l'interno. L'istituzione del Vescovado di Nicosia, proposta nel 1778, ha portato a San Nicolò il titolo di Chiesa Cattedrale.

A causa del naturale invecchiamento e di alcuni lavori inopportuni compiuti alla fine del secolo scorso, erano evidenti alcuni danni. Purtroppo circa 30 anni fa è stata eseguita un'intensiva campagna di restauro, basata su centinaia di iniezioni di boiacca ad alta pressione e micropali.

Questa tecnica all'epoca sembrava promettere miracoli, ma, per eccesso di pressione e per dilatazioni dovuti ad incompatibilità del cemento con le malte e le rocce gessose che produce ettringite, nel giro di alcuni anni la boiacca si è rigonfiata. Il risultato è stato un disastro esteso dalle fondazioni al tetto. Gli elementi di pietra (pilastri, lastre, cornici, modanature) delle

M. Marchisio et al.



Fig. 9 – Evidenti situazione di danneggiamento (a,b,c,d).'





Fig. 10 – Attrezzature specifiche per una rapida posa dei micro-geofoni (a: nastro strumentato per superfici regolari; b: sbarra adatta per superfici irregolari).



Fig. 11 – Esempi di profili sismici superficiali (a,b) (a: strato unico senza presenza di zone fessurate; b: strato unico ma con presenza di zone fessurate).

murature rigonfiate sono stati spinti fuori, staccati, spaccati. Anche il pavimento all'interno della Cattedrale si è rigonfiato. La malta iniettata, dove appariva in superficie, mostrava una scarsissima resistenza. In Figura 9 sono riportate quattro immagini che mostrano quanto i danni fossero importanti ed evidenti.

Il problema postoci consisteva nel cercare di valutare se, nonostante l'evidente danno superficiale, le strutture murarie fossero all'interno ancora sufficientemente resistenti o se il danneggiamento fosse profondo (con conseguente pericolo di collasso globale).

Dato che nessun'altra tecnica sembrava adatta alla situazione, si è proposta un'indagine intensiva con metodi microsismici. Data l'estensione del danno non era infatti possibile limitare l'indagine al campionamento di alcuni elementi strutturali tipici: sono state fatte misure praticamente dovunque fosse possibile, dalle fondazioni (dove erano accessibili) al tetto, sia all'interno che all'esterno della chiesa. Anche la torre campanaria è stata studiata dalla base alla sommità. Alla fine si sono ottenuti: più di 85 profili sismici superficiali sulle pareti; 10 tomografie piane per trasparenza attraverso le strutture murarie; 15 sondaggi tomografici unidimensionali SST in 6 fori di carotaggio, per un totale di 851 registrazioni sismiche.

È risultata una delle più estese indagini di questo tipo.

Dato il gran numero di prove da effettuare su superfici diverse, si sono sviluppate alcune attrezzature specifiche sia per limitare al massimo l'impatto sulle superfici murarie sia per rendere più veloci le operazioni. In Figura 10a si vede l'utilizzazione di un nastro strumentato con 12 microgeofoni e cablaggi, adatto per interni. In Figura 10b si vede una sbarra con 6 micro-geofoni e cablaggi, adatta per superfici irregolari.

Il lavoro di interpretazione è stato laborioso e delicato, ma alla fine è stato possibile fare un quadro coerente della situazione.

In alcuni punti si sono eseguiti sia profili a rifrazione lungo le superfici sia entrambi i tipi di rilievi tomografici. I dati sono risultati estremamente coerenti (non identici, dato che ogni tecnica ha un suo modo peculiare di lavoro: per esempio, le velocità ottenute da profili verticali sono influenzate dai carichi, cosa che non succede con i profili o le misure tomografiche con percorsi prevalentemente orizzontali).

L'indagine ha permesso di ricostruire un quadro globale della situazione delle strutture murarie della chiesa Cattedrale e della torre campanaria.

In Figura 11 sono riportati due esempi dei profili sismici superficiali: il primo (Fig. 11a) denota una risposta "regolare": le velocità sismiche si ricavano dalle pendenze delle due dromocrone che risultano ben definite dall'allineamento dei punti sperimentali; il secondo (Fig. 11b) presenta un "salto", ma prosegue circa con la stessa pendenza. Tale "salto" ci indica la presenza di fessurazioni o danni superficiali nel tratto attraversato dal profilo mentre la pendenza ci fornisce le velocità sismiche.

In Figura 12 sono riportati due esempi di profili delle velocità sismiche lungo il foro di carotaggio ottenuti con la tecnica tomografica SST. In ognuno dei due casi si sono effettuati due SST indipendenti cambiando la direzione delle energizzazioni. In Figura 12a sono riportati 2 SST effettuati nella Torre Campanaria: si nota bene un paramento interno piuttosto rigido, cui segue una struttura interna a rigidezza inferiore ("sacco"?). Nella parte terminale dei profili si ha un netto aumento della rigidezza, avvicinandosi al paramento esterno in pietra di spessore ben maggior di quel interno. In Figura 12b sono riportate le risposte degli SST effettuati in un'altra parete della stessa Torre: l'andamento è simile a parte un forte picco a circa 80 cm dalla superficie interna, evidentemente il foro è passato molto vicino ad una delle barre iniettate.

In Figura 13 sono riportate due tomografie: la prima (Fig. 13a) effettuata attraverso la muratura della Torre, la seconda (Fig. 13b) attraverso la parete esterna della Cattedrale, lato N. In entrambe si notano alcune forti anomalie inclinate che evidenziano la presenza di barre iniettate. Nelle zone intorno alle barre, si hanno dei valori di velocità più basse della media (evidenziate in blu scuro-nero nella scala dei colori). Si tratta di effetti di sgretolamento del materiale circostante le zone iniettate a causa delle sovrapressioni generate dai fenomeni sopracitati. Escluse le zone anomale, il



Fig. 12 – Esempi di tomografie SST (a,b).

NICOSIA - TOMO 4



Fig. 13 – Esempi di tomografie per trasparenza (a).



Fig. 13 – Esempi di tomografie per trasparenza (b).

resto delle sezioni indica valori di velocità (zone blu) corrispondenti a valori di rigidezza sufficientemente elevati.

Se ne può dedurre che le operazioni di iniezioni hanno portato gravi danneggiamenti locali, ma gli elementi strutturali sono risultati globalmente "sani".

I moduli elastici derivati dall'indagine microsismica sono i stati utilizzati per una modellazione statica della struttura. Anche in questo caso i risultati sono stati coerenti con altri dati disponibili (gli spostamenti subiti dalla struttura, per esempio).

5. CONCLUSIONI

In conclusione, i metodi microsismici utilizzati come metodi non distruttivi per lo studio di strutture murarie costituiscono uno strumento estremamente potente ed affidabile per la diagnostica degli edifici monumentali sia per la utilizzabilità intrinseca dei dati forniti, sia per la non-pervasività, sia per i tempi e costi contenuti rispetto ad altre metodologie.

APPENDICE

BREVE DESCRIZIONE DELLE TECNICHE MICRO-SISMICHE E GEOELETTRICHE UTILIZZATE E DEL TIPO DI PRODOTTO OTTENIBILE

Le tecniche da noi utilizzate per le indagini sulle strutture murarie derivano, con le necessarie modifiche tecnologiche e strumentali, da tecniche sismiche comunemente usate per le indagini sul terreno. Tutte prevedono l'utilizzazione di numerosi sensori di vibrazioni (*geofoni*) collegati, con opportuni sistemi di cavi e connettori, a sismografi da prospezione multicanale (12, 24 o più canali). Tra i diversi modelli esistenti sul mercato, è necessario utilizzare quelli ad alta banda passante, data la necessità di lavorare con alte frequenze.

L'energizzazione avviene battendo con una piccola massa (martelletto) la superficie del muro in punti prestabiliti. Dalla lettura dei *sismogrammi* registrati per ogni canale si ricavano i tempi di percorso (*travel times*) sorgente-geofono. Tra le diverse modalità di indagine utilizzate in campagna, quelle "trasferite" sulle murature sono le seguenti:

1. Profili sismici superficiali

In questo caso i geofoni sono allineati secondo un profilo rettilineo sulla superficie del muro in esame. Si effettuano una o più energizzazioni battendo alle estremità dei profili o sul loro prolungamento (Lo schema di tale tecnica è rappresentato in Figura A1). La tecnica corrisponde a quella della *Sismica a Rifrazione* in campagna.

I tempi di arrivo vengono posti in grafico rispetto alle distanze dalla sorgente. Questi grafici, detti *dromocrone*, hanno in genere uno o più tratti

Surface Profile



Fig. A1 - Schema di un profilo sismico superficiale.

rettilinei: la loro *pendenza* permette di ricavare sia la *velocità delle onde sismiche* negli strati della struttura muraria interessata, sia il loro spessore.

Alcuni esempi tipici di situazioni frequentemente incontrate su murature:

• dromocrona rettilinea: l'indagine rileva una situazione uniforme. La velocità di propagazione delle onde sismiche è bene evidenziata dalla pendenza del grafico. Un esempio tipico è quello della Figura 11a.

• La dromocrona presenta un "salto", ma prosegue circa con la stessa pendenza: questa risposta, non rara nella nostra esperienza, indica la presenza di fessurazioni o danni superficiali in un tratto attraversato dal profilo. La rigidezza del muro però è la stessa al di là della zona fessurata. Si noti che questa è una tipica situazione in cui le indagini con tecniche soniche monocanale, che si basano su velocità medie, non possono evidenziare la situazione reale. Un esempio tipico è quello della Figura 11b.

• Dromocrona con due tratti, il primo a pendenza maggiore, il secondo a pendenza minore: in questo caso l'indagine mette in evidenza la presenza di uno strato rigido al di sotto di quello superficiale. Questa risposta è abbastanza comune nel caso di indagini su parti in pietra con straterello superficiale rovinato dagli agenti atmosferici o nel caso di muratura coperta da uno strato di intonaco. Un esempio è rappresentato in Figura A2.



Fig. A2 – Esempio di un profilo sismico superficiale in cui si ha un doppio strato di cui inferiore più rigido.

Si tenga però presente che con questa tecnica non si possono evidenziare strati meno rigidi al di sotto di quello superficiale.

2. Tomografie Sismiche per trasparenza

Proprio per evidenziare aree o strati a bassa velocità, cioè di bassa rigidezza rispetto a quella del paramento esterno, problema estremamente importante per le indagini sulle strutture murarie, è necessario ricorrere alle tecniche di Tomografia Sismica.

Quella più frequentemente adottata è quella per trasparenza, che corrisponde alla disposizione crosshole in campagna. In questo caso è necessario poter accedere ad entrambe le superfici delle muratura. Da un lato si fissa la stringa dei sensori, come per un profilo. Dall'altro, su un profilo parallelo, in corrispondenza con il primo, si effettuano numerose energizzazioni. In questo modo, per ogni energizzazione si registrano numerosi tempi di arrivo relativi ai raggi sismici che attraversano la struttura dal punto di battuta ai geofoni. Ripetendo le energizzazioni in numerosi punti del profilo, la struttura muraria viene attraversata da molti raggi sismici, in modo da ottenere una buona "copertura" della sezione piana della struttura muraria tra i due profili. Lo schema di tale tecnica è rappresentato in Figura A3.

L'interpretazione dei dati così ottenuti avviene, in maniera simile ai dati radiografici delle TAC, suddividendo la superficie interessata dai raggi sismici generati in "rettangolini" (pixels): il processo di interpretazione consiste nell'individuare, con buona approssimazione, la distribuzione dei valori di velocità sismica in tutta la sezione, pixel per *pixel.* Questa distribuzione viene poi trattata con programmi di grafica per sintetizzare i risultati (altrimenti inutilizzabili) in un'immagine: a colori, in cui ad ogni colore corrisponde un intervallo di velocità, o in bianco e nero, in cui i valori di velocità sono indicati da una scala dei grigi. Queste immagini sintetiche della sezione (fisica) della muratura sono chiamate Tomografie. Esempi tipici sono quelli delle Figura 6 e Figura 13.

Si noti che è possibile eseguire anche tomografie tri-dimensionali, estendendo la procedura di quelRi Si

Transparency Tomography

Fig. A3 – Schema di una tomografia sismica per trasparenza.

le piane in modo di coprire con i raggi sismici un volume della struttura tra le due facce esterne tra due quote diverse.

3. Sondaggi Sismici Tomografici (SST)

La tecnica di sondaggio sismico con tecnica SST è stata sviluppata per affrontare, sul terreno, alcuni problemi particolari, quali lo studio di frane, la valutazione di rigidezza delle rocce in situazioni stratigrafiche complesse, ecc. (Lo schema di tale tecnica è rappresentato in Figura A4).

La procedura si basa sull'utilizzazione di un singolo foro di carotaggio, in cui vengono posizionati i geofoni, mentre le energizzazioni avvengono lungo un profilo che parte dalla bocca-foro. La sezione "coperta" dai raggi sismici è perciò triangolare. Invece di impostare la ricostruzione tomografica della distribuzione di velocità in detta sezione triangolare si è preferito utilizzare i dati per studiare con maggior dettaglio le variazioni della velocità lungo l'asse del foro. Si è ottenuto un potere risolutivo nettamente maggiore, soprattutto quando si tratta di individuare difetti a bassa rigidezza.

Questa tecnica è stata trasferita ed adattata allo studio diagnostico delle strutture murarie nell'impossibilità di accedere alle pareti esterne di edifici alti (la prima applicazione è stata fatta proprio sul campanile del Duomo di Lucca) o per la presenza di altri corpi dietro il muro in oggetto. Talora si è usata questa tecnica anche in parallelo a tomografie 2D per trasparenza per la sua maggiore risoluzione.

Per l'esecuzione delle misure è necessario utilizzare un foro di carotaggio del diametro di 50-60 mm.

Una volta inserita e fissata l'attrezzatura con la stringa dei geofoni nel foro, le energizzazioni



Tomographic VSP (SST)



Fig. A4 – Schema di un SST.

avvengono lungo uno o più profili sulla superficie del muro, a partire dalla bocca del foro con distanze via via crescenti.

Il trattamento dei dati utilizza gli stessi algoritmi matematici della tomografia bi-dimensionale ma con una "pixelizzazione" unidimensionale. Il risultato mostra l'andamento delle velocità con la profondità nel muro, lungo l'asse del foro. Si tratta cioè di una tomografia mono-dimensionale. Esempi tipici sono quelli delle Figure 3 e 12.

4. Tomografie elettriche

La tecnica tomografie elettriche o di resistività prevede lo studio delle variazioni della resistività elettrica nei materiali all'interno delle murature. Questo metodo non è applicato di frequente sulle strutture murarie data la difficoltà (al contrario delle misure effettuate sul terreno) di far passare corrente e di leggere correttamente i dati a causa della elevata impedenza delle superficie murarie. Alcune strumentazioni dell'ultima generazione hanno caratteristiche elettriche elevate (in particolare impedenze di ingresso molto alte) e permettono le misure sulle murature.

Si possono effettuare misure per tomografie elettriche sia ponendo gli elettrodi sulle due facce della struttura muraria sia lavorando su una sola parete.

La ricostruzione tomografica necessita di un'inversione numerica dei dati di "resistività apparente" ottenuti dalle misure. Anche in questo caso l'immagine viene resa leggibile mediante l'impiego di tecniche di *imaging* con scale a colori. In questo caso le variazioni di resistività evidenziate dalla tomografia non hanno un rapporto diretto con le proprietà meccaniche dei materiali. Questo metodo è però estremamente sensibile alla presenza di umidità all'interno delle murature. Un esempio è rappresentato in Figura 7. Le tomografie geoelettriche sono state applicate con successo per determinare l'estensione di strutture interrate, per esempio di fondazioni.

CENNI BIBLIOGRAFICI

Cardarelli E. (1995), 3D tomography of some pillars of the Coliseum, in «Bollettino di Geofisica Teorica ed

Applicata», XXXVII, n. 148, December.

- Cardarelli E., Godio A., Marrone C., Morelli G., Sambuelli L., Santarato G., Socco L.V., Ton Jin Guo (0000), *Geophysical survey on the vault of "Scarsella" of the S. Giovanni Baptistery in Florence, in Proceedings of the 6 Meeting EEGS, European Section, Bochum, Sept. 3-*7 2000.
- Cardarelli E. (2000), Seismic transmission tomography: determination of the elastic properties of building structures (some examples), «Annali di Geofisica», 43, 6, December.
- Cardarelli E., de Nardis R. (2001), Seismic refraction, isotropic anisotropic seismic tomography on an ancient monument (Antonino and Faustina temple AD 141), «Geophysical Prospecting», 49, 228-240.
- Cosentino P.L. (2000), Approaching electrical tomography, «Annali di Geofisica», 43, 6, 1131-1146.
- Cosentino P., Martorana R. (2001), The resistivity grid applied to wall structures: first results, in Proceedings of the 7th Meeting EEGS, European Section, Birmingham, ARCH02.
- Cosentino P., Martorana R. (2001), La griglia di resistività applicata a strutture murarie, in 20° Convegno Nazionale G.N.G.T.S., Roma, in corso di stampa.
- Cosentino, P., Martorana R. (2002), Micro-geofísica de alta resolución: Tomografía eléctrica para muros, in Proceedings of 3^a Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia, 534.
- Cosentino P.L., Capizzi P., Martorana R., Miraglia D., Pellerito S., Sanfratello V., Anselmo G., Genovese C., Messina P. (2002), *Geophysical Researches In The Roman Villa Del Casale (Piazza Armerina, Sicily),* in *Proceedings of the 8th Meeting of EEGS,* Aveiro, 127-130.
- Gucci N., Barsotti R. (1995), A non-destructive technique for the determination of mortar load capacity in situ, in Materials and structures, 28, pp. 276-283.
- Gucci N., Marchisio M., Sassu M. (0000), Tecniche sperimentali comparate per la diagnostica di murature miste, in Atti VII Convegno ANIDIS, Siena, 1995.
- Gucci N., Marchisio M., D'Onofrio L., Mazzeo D., Sassu M. (0000), Prove microsismiche in controllo di carico su pannelli di muratura, in Atti VIII Convegno ANIDIS, Taormina, 21-24 Settembre 1997.
- Gucci N., Sassu M. (2002), Resistenza delle murature: valutazione con metodi non distruttivi, il Penetrometro PNT-G, «L'Edilizia», 2, pp. 36-42.
- Marchisio M., Sambuelli L. (1990), Applicazioni di metodologie geofisiche al controllo non distruttivo di strutture ed infrastrutture civili ed alla conservazione e

restauro di beni culturali, in Atti del VI Convegno Ass. It. Prove non Distruttive, Milano.

- Marchisio M., Godio A. (1994), Applicazioni di tecniche tomografiche a problemi di Ingegneria Civile, «GEAM -Geoingegneria Ambientale e Mineraria», 3, 165-169.
- Marchisio M., Caridi G., Caroti G., Costantino P. (1994), Studio sismico delle murature del campanile del Duomo di Lucca, in XIV Congresso GNGTS, Roma.
- Marchisio M. D'Onofrio L., Forlani E. (1995), SST A Tomographic VSP Technique for Geomechanical Applications, in Atti del I Meeting EEGS, European Section, Torino.
- Marchisio M. (0000), Prove dinamiche su strutture murarie con tecniche micro-sismiche, in Atti della Giornata di Studio sul tema: "Le attuali tecniche geofisiche applicate all'Ambiente, al Territorio ed all'Ingegneria Civile", Bologna, 19 giugno 1998.
- Marchisio M., D'Onofrio L., Forlani E., Cerri S. (0000), The use of geophysical methods to study the masonry structures of monuments: an application for the restoration of the Cathedral of Nicosia (Sicily), in Proceedings of the 6 Meeting EEGS, European Section, Bochum, Sept. 3-7 2000.
- Marchisio M., D'Onofrio L., De Falco A., Baroncini V., Morandi D. (0000), Non-destructive testing on masonry structures: a series of different methodologies applied on the cathedral of Lucca, in Proceedings of the 8 Meeting EEGS, European Section, Aveiro, Sept. 9-12 2002.
- Marchisio M., D'Onofrio L., Forlani E., Cerri S. (2001), Diagnostica non pervasiva con metodologie dinamiche di origine geofisica sulle strutture murarie di edifici monumentali, «Science and Technology for the Cultural Heritage», 10, 1-2 in corso di pubblicazione.