

## MONITORAGGIO STRUTTURALE CONTINUATIVO

### IL CANTIERE DI RESTAURO DELLA GUGLIA MAGGIORE DEL **DUOMO DI MILANO**

di Alfredo Cigada, Beniamino Mörlin Visconti Castiglione,  
Matteo Scaccabarozzi, Marcello Vanali, Emanuele Zappa



Fig. 1 - Ponteggio parzialmente completato.

Nel presente lavoro viene descritto il sistema di monitoraggio continuativo della Guglia Maggiore del Duomo di Milano e del ponteggio allestito per permettere gli interventi di restauro in corso d'opera. Si descriveranno le scelte apportate per soddisfare le necessità che hanno portato alle richieste della Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano, in merito allo sviluppo di tale sistema.

**L**e strutture civili di forte rilevanza sociale, culturale e architettonica sono spesso quelle che richiedono un monitoraggio il più possibile attento e sistematico, a garanzia delle condizioni di sicurezza delle persone e della salute stessa della struttura.

Le costruzioni moderne, che presentino soluzioni costruttive sempre più ardite o rappresentino luoghi pubblici frequentati da un'alta concentrazione di persone, sono tipici casi in cui è opportuno disporre di un sistema che ne monitori in maniera continuativa lo stato di salute. Queste sono ad esempio le ragioni che hanno portato allo sviluppo del sistema di monitoraggio continuativo dello stadio "Meazza" in San Siro, Milano [2][3][4][5].

La necessità di un sistema di monitoraggio continuativo può essere ulteriormente accentuata nel caso di costruzioni di rilevanza storica, in genere più delicate dal punto di vista strutturale e di conservazione, in quanto condizionate dal degrado che spesso il tempo impone loro. La presenza in Italia di un ricco patrimonio artistico ed architettonico pone in maniera rilevante la questione del monitoraggio dello stato di salute di tali strutture, al fine di una tempestiva pianificazione degli interventi di conservazione, con vantaggi anche di natura economica.

Va considerato che la natura degli eventi che possono condizionare le condizioni strutturali di una costruzione civile è, in genere, caratterizzata da tempi ed intensità non facilmente prevedibili: si pensi ad esempio ai fenomeni quali quelli atmosferici o sismici. Quando le costruzioni civili sono sottoposte ad interventi di conservazione, di consolidamento o di ammodernamento più o meno invasivi, la struttura vede spesso variare

le proprie caratteristiche statiche e dinamiche. Queste ed altre ancora sono situazioni in cui assume un evidente vantaggio la possibilità di disporre di un monitoraggio continuativo ed in tempo reale dello stato della struttura, ragionevolmente descritto da un insieme di rilevazioni sperimentali opportunamente scelte. Lo stato dell'arte dei dispositivi di misura ed acquisizione oggi raggiunti permette di allestire un sistema di monitoraggio continuativo sufficientemente affidabile e con costi contenuti. Il monitoraggio deve essere in grado di spiegare le ragioni del comportamento strutturale eventualmente variato durante le operazioni di restauro e permettere di adottare tempestivamente gli opportuni rimedi.

#### LA GUGLIA MAGGIORE DEL DUOMO DI MILANO

La Guglia Maggiore viene completata nel 1769 su progetto di Francesco Croce, architetto del Duomo [6]. Il complesso strutturale poggia sulla lanterna all'apice del tiburio, con l'aggiunta di 8 contrafforti ed archi rampanti rovesci per l'equilibrio dei carichi laterali. Si compone di un pilastro ottagonale centrale e da una corona di 8 pilastrini. Il corpo centrale e gli elementi esterni sono collegati dalla scala a chiocciola che funge da irrigidimento trasversale [7]. Complessivamente la struttura si estende per 40 metri di altezza.

Nell'ambito delle complessive e continue opere di restauro messe in atto dalla Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano, la Guglia è oggetto di importanti interventi a partire dal 2010. Tale intervento è di natura straordinaria, anche se più volte, nel corso della sua storia, la guglia ha richiesto importanti opere di conservazione [6].

L'attuale restauro non nasce da una necessità di natura prettamente strutturale, ma da una prevalentemente conservativa, specie nella parte sommitale, a fronte del degrado materico dell'ornato che non garantiva l'incolumità dei visitatori per eventuali distacchi di ornato che si erano già manifestati. Data però la struttura esile della guglia, l'intervento finisce suo malgrado per interessare il complesso strutturale. I tasselli marmorei che compongono la struttura presentano ad esempio un importante degrado in corrispondenza dell'innesto di catene o chiavi di materiale ferroso, apposti nella fase di costruzione stessa della guglia. Le prime svolgono in genere il compito di equilibrare i carichi trasversali di colonne o archi rampanti, mentre le seconde sono state impiegate come elementi di collegamento tra i blocchi di marmo. La sostituzione o l'eliminazione di tali componenti richiede spesso l'asportazione di elementi marmorei che, in molti casi, assolvono un compito strutturale oltre che ornamentale. Infatti alcuni fenomeni di rottura nella zona del lanternino alla base della struttura dichiarano sofferenze nei conci di marmo dovute a concentrazioni di carichi al limite del collasso del materiale.

In prima istanza il progetto di un sistema di monitoraggio nasce dalla necessità di verifica tempestiva di ogni possibile situazione di rischio, per la struttura e per gli operatori del cantiere, a seguito della collocazione del complesso ponteggio nell'area di cantiere. I potenziali rischi nascono dell'aggravio di carico statico determinato della massiccia struttura metallica, non previsti nella progettazione originaria della cupola che regge la guglia [7], e dalle interazioni dinamiche tra ponteggio e la guglia stessa in occasione di eventi ambientali di una certa intensità. La particolarità di questa struttura ausiliaria risiede nel fatto che si sia ritenuta condizione irrinunciabile quella di non avere alcun contatto tra ponteggio e guglia, oltre ad una certa quota. Si è ritenuto infatti non opportuno che i carichi di pressione esercitati dal vento sul ponteggio, esposto per una sezione resistente maggiore rispetto alla guglia, si trasmettano alla parte alta della guglia, particolarmente snella.

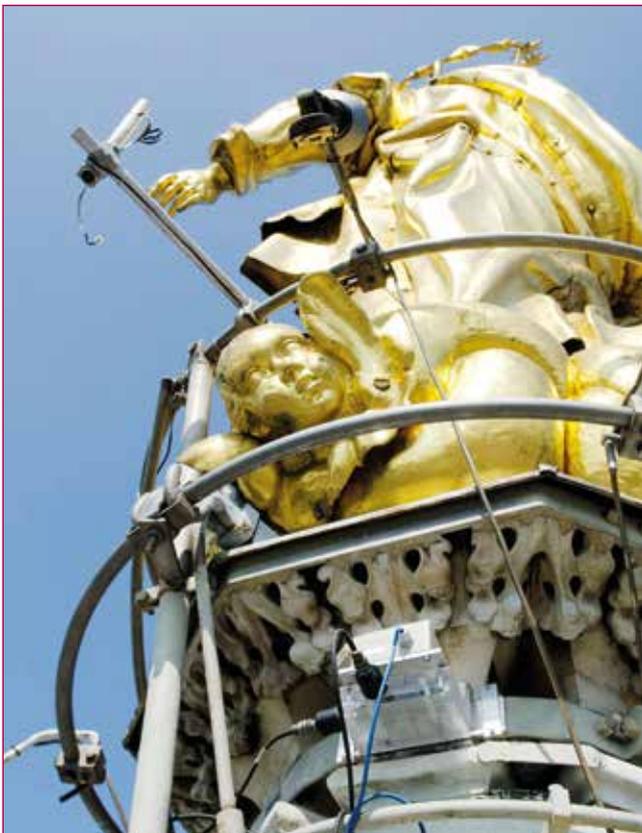


Fig. 2 - Inclinometro biassiale ed accelerometri posti sulla sommità della guglia. La coppia di accelerometri era presente in occasione di una delle periodiche campagne di identificazione modale della struttura.

In Figura 1 è visibile la struttura metallica prima del completo innalzamento. In quella fase si è posta molta attenzione ai dati sperimentali di spostamento relativo, come verrà descritto nel paragrafo Elaborazione e presentazione dati.

Durante gli interventi di sostituzione degli elementi strutturali che compongono il complesso della Guglia, il sistema di monitoraggio consente un controllo sull'assetto statico della struttura, infatti la realizzazione degli interventi di restauro può provocare una diversa distribuzione dello stato tensionale. Una volta ultimati i lavori, l'operatività del sistema qui descritto dovrà continuare nell'opera di controllo dello stato di salute del complesso architettonico, affiancato da altri dispositivi di misura.

### SISTEMA DI MISURE CONTINUATIVO

La progettazione del sistema di monitoraggio in oggetto ha dovuto tenere in considerazione diverse necessità: integrare verifiche sia statiche sia dinamiche sulla struttura e sul ponteggio; garantire un monitoraggio 7 giorni su 7 h24, al fine di cogliere sia evoluzioni di lungo periodo dei valori misurati, sia la risposta della struttura in occasione di eventi occasionali di rilievo (terremoti, forti fenomeni atmosferici, interventi di cantiere), in genere non prevedibili; fornire adeguate prestazioni in termini di frequenza di campionamento, banda passante e sincronismo delle acquisizioni sui diversi canali di misura.

Il sistema deve essere in grado di acquisire e memorizzare integralmente tutti i dati campionati, con una frequenza adeguata all'analisi del comportamento dinamico del tipo di struttura considerata, in risposta alla tipologia di eventi di interesse, come sarà precisato nel paragrafo 4. L'estrazione automatica e in tempo reale di opportuni parametri ricavati dai dati misurati, confrontabili con valori di riferimento, consente l'identificazione di ogni trend evolutivo nelle grandezze statiche, l'occorrenza di particolari eventi nella risposta dinamica della struttura, così come possibili avarie o malfunzionamenti agli strumenti di misura. L'archiviazione continua di tutti i dati permette di compiere successivamente indagini più accurate qualora si riscontrassero eventi di particolare interesse.

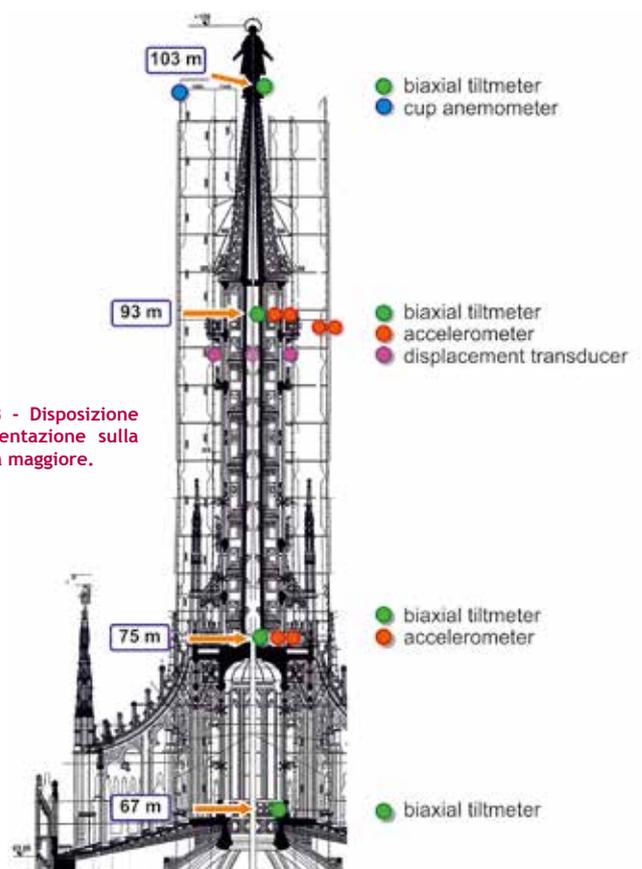


Fig. 3 - Disposizione strumentazione sulla Guglia maggiore.

La tempestività nell'elaborazione e nella presentazione dei dati offre maggiori garanzie per la sicurezza di chi opera nel cantiere. Il sistema deve avere inoltre sufficiente grado di automazione ed autonomia. Nonostante la posizione centrale occupata dal Duomo nella città di Milano, l'accesso al cantiere non è semplice. Quindi ricevere informazioni oppure operare sulla configurazione del sistema in remoto è un requisito considerato necessario.

### STRUMENTAZIONE

Il sistema di monitoraggio è configurato da diversi sistemi di misura disposti su 4 livelli della Guglia. In Figura 2 è riportata la strumentazione posta al livello più alto, appena sotto la statua della Madonnina.

L'elenco comprende, per la strumentazione disposta sulla Guglia e sul ponteggio, quanto riportato in Tabella 3 1, dove sono riportate anche le caratteristiche dei dispositivi.

Alla strumentazione sopra elencata si aggiunge un anemometro a coppe posto al livello più alto del ponteggio, il cui segnale analogico è acquisito del sistema di monitoraggio. In Figura 3 è riportata la disposizione degli strumenti sui 4 livelli della Guglia.

### MISURE DI ACCELERAZIONE

Le misure dinamiche consistono principalmente in rilevazioni di tipo accelerometrico su due livelli della Guglia e su un livello del ponteggio, in direzione radiale e tangenziale rispetto alla geometria delle strutture, nel piano orizzontale, considerando che i modi di vibrare delle due strutture, di forma estremamente snella, hanno ampiezze ordini di grandezza maggiori nella direzione orizzontale rispetto a quelle in direzione verticale.

I dati rilevati permettono un costante raffronto con alcuni parametri ottenuti dalla precedente caratterizzazione dinamica della guglia e del ponteggio[1]. La scelta di accelerometri piezoelettrici ad alta sensibilità consente la registrazione di valori di accelerazione molto modesti, con ottime prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore, anche nel caso di segnali in ingresso deboli, quali ad esempio quelli dovuti all'eccitazioni ambientali, ossia quelle prodotte da vento, traffico, etc.... La scelta si è dimostrata opportuna anche nel caso delle rilevazioni sul ponteggio, che ha visto e vedrà diverse variazioni di configurazioni, in relazione all'estensione in altezza, all'aggiunta di elementi di irrigidimento e di conseguenza alla sua massa complessiva, andando ad influenzare i valori di frequenza propria della struttura. In Figura 4 è visibile la coppia di accelerometri posta al livello del belvedere alto. La strumentazione scelta si è dimostrata adeguata malgrado i maggiori rischi di saturazione del segnale, dato il minore smorzamento della struttura metallica.

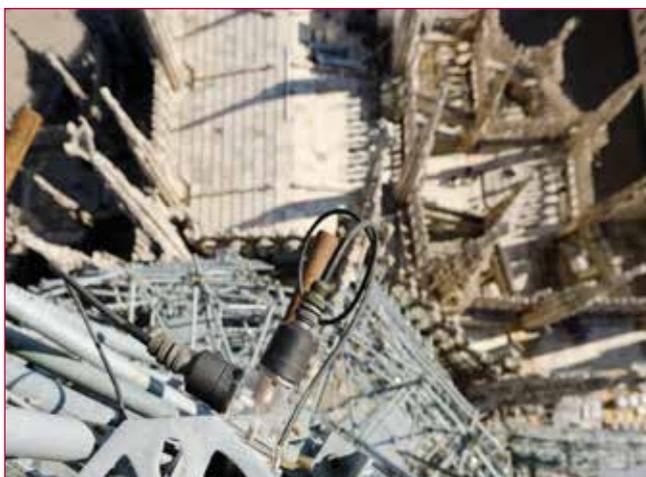


Fig. 4 - Coppia di accelerometri posti sul ponteggio.

Anche in occasione di eventi che hanno prodotto livelli di forzamento più elevati è stato dunque possibile avere una valutazione della risposta delle due strutture in esame. È il caso di alcuni eventi sismici registrati nel 2012 nel Nord Italia. Si riporta in Figura 5, a titolo di esempio, la storia temporale dei dati accelerometrici in direzione radiale, registrati sulla guglia ai due diversi livelli di misura, nel corso di uno degli eventi registrati.

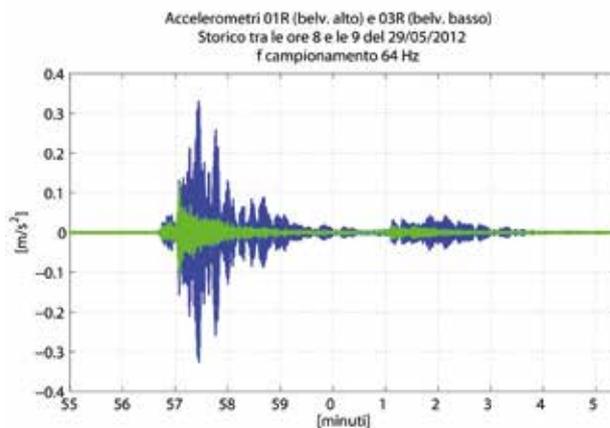


Fig. 5 - Sisma del 29/05/2012: dati accelerometrici registrati su due diversi livelli della Guglia, in direzione radiale.

Si evidenzia come la scelta di misurare in maniera continuativa permetta di analizzare integralmente la risposta dinamica della struttura.

### MISURE DI SPOSTAMENTO RELATIVO

Nell'ambito del monitoraggio degli spostamenti relativi del ponteggio rispetto alla guglia, l'attenzione è posta in particolare alle condizioni di vento intenso che possano portare al rischio di contatto tra guglia e ponteggio, data la minore rigidità flessionale di quest'ultimo. Sull'intero periodo di acquisizione l'evento con la più alta intensità di raffiche e velocità media registrato si è presentato il 21 luglio 2012, con valori massimi di velocità su medie a finestre di 3 secondi pari a 28 m/s e venti medi su finestre di 10 minuti a 18 m/s. Si farà pertanto riferimento a quell'evento per riportare alcune elaborazioni dei dati di spostamento, che hanno mostrato i massimi tra i valori registrati per questo dato. La Figura 6 mostra le misure di spostamento relativo impalcatura-guglia misurate dal trasduttore 1, sensibile agli spostamenti in direzione Nord (approssimativamente quella di provenienza del vento presente nel caso in esame).

Va precisato come non esista una posizione di riferimento assoluta, né per l'assetto della guglia né per quello del ponteggio. Queste sono continuamente variabili nel tempo per gli effetti termici ambientali, in particolare in relazione alla direzione di irraggiamento solare. Per tanto anche la distanza relativa tra le strutture assumerà configurazioni differenti. La valutazione degli spostamenti può essere fatta solo assumendo una distanza di riferimento. Per le osservazioni sul lungo periodo si è scelto di considerare come riferimento i valori acquisiti all'avvio del sistema, mentre per l'analisi della risposta ad eventi di breve periodo si ritiene più opportuno considerare la posizione rilevata immediatamente antecedente l'intervallo di osservazione. Se si considera ad esempio la risposta all'azione del vento, anche la durata della finestra temporale di osservazione va scelta con una limitazione opportuna, al fine di isolare il più possibile l'evento sotto osservazione dagli spostamenti prodotti da effetti termici. A titolo indicativo si segnala che lo spostamento relativo ponteggio-guglia raggiunge comunemente valori di 5-6 mm in occasione di una giornata con insolazione significativa e in assenza di vento. Sono spostamenti dello stesso ordine di grandezza di quelli generati da fenomeni ventosi di moderata intensità.



Fig. 6 - Valori di posizione relativa mediati su finestre di 3 secondi, per il trasduttore di spostamento in direzione N/NE.

Combinando vettorialmente lo spostamento relativo rilevato da una coppia di trasduttori disposti ortogonalmente fra loro, è possibile esprimere il modulo e direzione del movimento relativo tra guglia e ponteggio nel piano. Un terzo sensore serve solo come ridondanza e controllo, oppure sostituisce uno degli altri due in caso di mal funzionamento, dal momento che questa misura viene ritenuta una delle più critiche ai fini del monitoraggio. È quindi stato possibile ottenere il diagramma della Figura 7, dove i dati sono ottenuti con medie su finestre di 3 secondi. Riportando su un digramma cartesiano le intensità degli spostamenti relativi con i corrispettivi valori di velocità del vento, è possibile ricostruire l'andamento della curva vento-spostamento relativo, riportata in Figura 8, in cui, come atteso, si vede che gli spostamenti hanno un andamento proporzionale al quadrato della velocità del vento, ovvero alla pressione dinamica generata dal vento stesso. Sempre in Figura 8, si vede come la buona correlazione tra i dati sperimentali e la curva interpo-

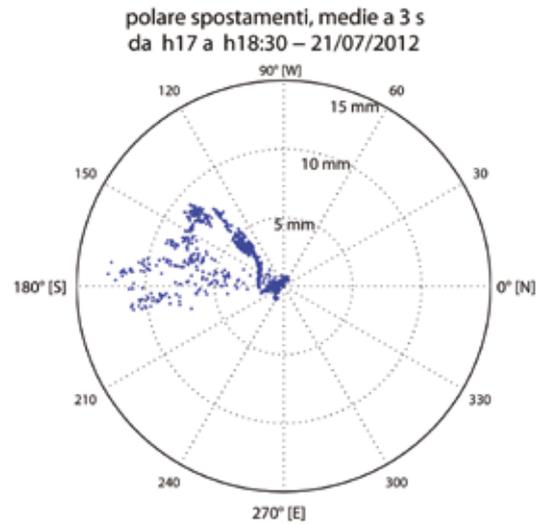


Fig. 7 - Diagramma polare degli spostamenti relativi ponteggio-guglia, ottenuto come somma vettoriale degli spostamenti registrati dal trasduttore 2 e 3, mediati su finestre di 3 secondi.

lante di secondo grado ricavata abbia permesso di estrapolare valori di spostamento relativo in corrispondenza di velocità di raffica più alte rispetto a quelle registrate. I dati raccolti hanno permesso di validare alcuni modelli numerici ad elementi finiti creati per una stima a priori degli spostamenti attesi di ponteggio e guglia. Un confronto importante data la difficoltà intrinseca nella modellazioni di due strutture così complesse. I valori misurati hanno consentito di operare in modo più confidente nell'opera di innalzamento del ponteggio fino all'apice della guglia, oltre che fornire una verifica dell'efficacia del lavoro di irrigidimento delle struttura effettuata precedentemente.

## Vibrometria laser-Doppler a scansione

Verifica della tenuta di rivestimenti incollati o ad aggancio meccanico

## Riprese termografiche

Controlli su rivestimenti per il rilievo di distacchi, fessurazioni, presenza di umidità

Rilievi per l'efficienza energetica

Analisi di affreschi, mosaici, intonaci e pavimentazioni

## Georadar

Localizzazione di strutture murarie sepolte

Determinazione della geometria e stratigrafia di componenti edilizi

Ricerca di sottoservizi, sezioni stradali, verifica presenza di cavità

Prove su strutture in calcestruzzo per il rilievo delle armature

## Misure di trasmittanza termica

## Monitoraggio ambientale con reti wireless (WSN)

Indagini soniche e ultrasoniche

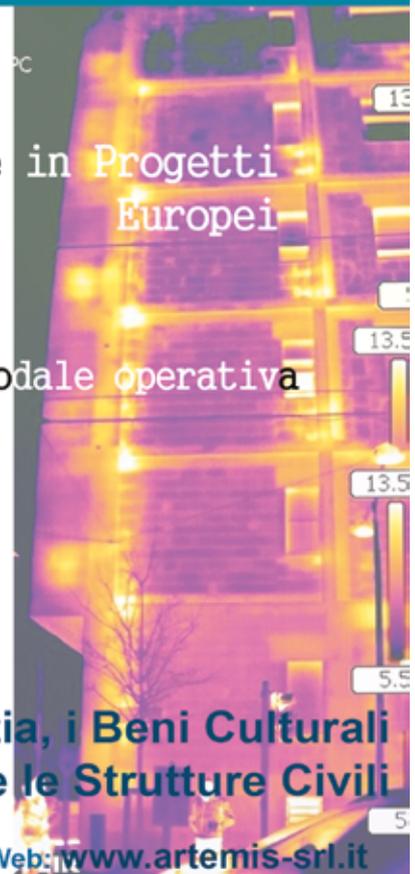
Prove sclerometriche

Prove pacometriche per il rilievo delle armature

Prove di carbonatazione

Partecipazione in Progetti Europei

Analisi modale operativa



Servizi diagnostici per l'Edilizia, i Beni Culturali e le Strutture Civili

Artemis srl

c/o Università Politecnica delle Marche - via Breccie Bianche 60131 Ancona (IT)

Tel.: 071-2204442 Fax: 071 2204801 Cell.: 342-3352713 E-mail: info@artemis-srl.it Web: www.artemis-srl.it

## MISURE INCLINOMETRICHE

Fatta salva l'utilità delle misure dinamiche, tuttavia c'è anche la piena consapevolezza del fatto che una corretta diagnosi di un eventuale danno passi anche attraverso la misura di grandezze statiche, dotate di dinamica lenta o comunque di dinamica limitata superiormente a valori di frequenza relativamente bassi, certamente inferiori a quelle rese disponibili dagli accelerometri. Per questo si è ritenuto strategico accoppiare alle misure dinamiche anche misure quasi statiche. I sensori ritenuti più significativi per fornire l'evoluzione dell'assetto sono certamente stati gli inclinometri. Quelli installati sono stati sottoposti ad una lunga fase di testing sul campo [5].

nr.	Sensore	Fondo scala	Banda passante	Sensibilità	Rumore di fondo
6	Accelerometri: Piezo PCB 393B12	0,5 g	0.1 Hz - 500 Hz	10 V/g	3.1 ( $\mu\text{m}/\text{s}^2$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$
3	Trasduttori di spostamento a cavo: Celesteo PT8101	0.5 m	0.1 Hz - 500 Hz	10 V/g	3.1 ( $\mu\text{m}/\text{s}^2$ )/ $\sqrt{\text{Hz}}$
4	Inclinometri biassiali: Applied Geomechanics Tuff Tilt 420/High-gain	$\pm 0,5^\circ$	3 Hz	0.0625°/mA	Risoluzione 0.0001°

Gli inclinometri adottati, come indicato in Tabella, sono caratterizzati da un'alta sensibilità, un favorevole rapporto segnale/rumore ed una banda passante che permette di identificare correttamente le inclinazioni associate ai primi modi di vibrare della struttura. Nonostante gli strumenti scelti siano in grado di fornire un dato assoluto di inclinazione rispetto all'orizzonte, non è possibile stabilire in maniera univoca una condizione iniziale di riferimento assoluta per l'assetto statico della struttura, dato che questo cambia continuamente per effetto delle condizioni termiche, sia giornalmente che stagionalmente. Per questo motivo si assume come valore di riferimento il primo acquisito dopo la verifica del corretto posizionamento e collegamento dello strumento.

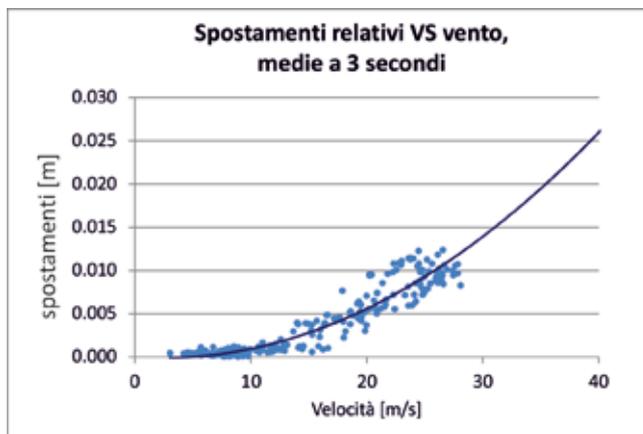


Fig. 8 - Andamento delle ampiezze degli spostamenti relativi in funzione dell'intensità del vento.

Risulta così possibile monitorare le variazioni dei dati di inclinazione, al fine di rilevare qualsiasi anomala deriva di questi rispetto all'escursione tipica giornaliera e stagionale, la prima fortemente influenzata dalle condizioni di irraggiamento della Guglia, mentre la seconda correlata alle medie giornaliere di temperatura atmosferica. Il confronto dei valori di inclinazione, nei medesimi periodi dell'anno e con condizioni termiche simili, ha mostrato un generale rientro delle derive di lungo periodo con una periodicità più o meno annuale.

Gli scostamenti, dove presenti, sono comunque non superiori al centesimo di grado. In Figura 9 si riporta, a titolo d'esempio, lo storico dei valori inclinometrici registrati dallo strumento posto a 75 m di altezza su periodo di circa un anno e mezzo.

Nel paragrafo successivo si darà descrizione del sistema e delle modalità di acquisizione dei dati.

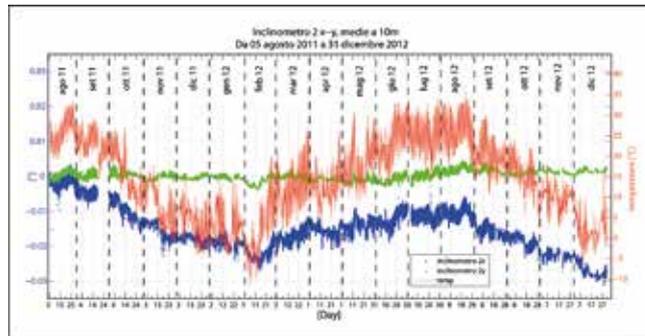


Fig. 9 - Dati inclinometrici al livello del belvedere basso.

## SISTEMA DI ACQUISIZIONE CONTINUA

L'esigenza principale del sistema di acquisizione risiede nella sua affidabilità, e nel poter sopportare tutti gli inconvenienti tipici della vita di cantiere. Si è scelto di utilizzare un sistema stand-alone composto da una unità real-time ed uno chassis FPGA (field-programmable gate array) riconfigurabile con controller embedded, il tutto senza parti meccaniche in movimento (Fan-less e con memoria allo stato solido) al fine di avere un sistema insensibile alle gravose condizioni di lavoro previste (polvere ed umidità sopra tutto) e dall'elevato livello di affidabilità richiesto.

Nella fase iniziale di definizione dell'apparato di monitoraggio per il Duomo, la flessibilità di configurazione offerta da un sistema composto da moduli I/O, integrati in un sistema facilmente riconfigurabile, ha permesso di procedere per gradi nell'installazione dei sistemi di misura, velocizzando la valutazioni in corso d'opera dei punti di misura più opportuni. I dati, inizialmente acquisiti ad una frequenza di campionamenti di 2048 Hz, vengono poi filtrati e sotto-campionati per essere portati alla frequenza di campionamento finale di 64 Hz, con una frequenza di taglio del filtro a 16 Hz. Tale frequenza permette di campionare correttamente i comportamenti dinamici della Guglia o del ponteggio, associati ai primi modi di vibrare delle due strutture, come appurato nelle precedenti campagne sperimentali [1], eliminando i contributi di rumore elettrico a più alta frequenza. I dati di ciascun canale così acquisiti vengono salvati ad intervalli di 10 minuti in un file binario identificato dall'istante temporale di chiusura del file. Tutti gli accorgimenti adottati permettono di ridurre al minimo le dimensioni dei file, facilitando l'invio dei dati via rete, l'archiviazione e l'elaborazione in locale o in remoto.

## ELABORAZIONE E PRESENTAZIONE DEI DATI

Al fine di rendere il sistema di monitoraggio un dispositivo utile per fornire un quadro aggiornato, sintetico e puntuale di indici rappresentanti le condizioni statiche e dinamiche della struttura osservata, l'automatismo nella presentazione dei dati più opportuni è una condizione di sicuro interesse.

I pacchetti di dati vengono inoltrati ad un PC collegato in rete, sul quale viene compiuta in modo automatico l'elaborazione dei dati e la presentazione di valori identificati come utili per il controllo dello stato della struttura. Il sistema elabora, per finestre temporali di 10 minuti, i valori di RMS (root mean square) di ciascun accelerometro, la media della velocità del vento, degli spostamenti relativi guglia-ponteggio e dei dati degli inclinometri.

Il software confronta i valori elaborati con livelli di soglia impostati, individuati sulla base dei dati storici acquisiti in precedenza. Il superamento della soglia di uno o più parametri attiva un indicatore di allerta specifico per ogni dato. Lo stato di funzionamento del programma di elaborazione e le situazioni di allerta sono monitorati attraverso una serie di messaggi automatici.

Il software può infatti inviare e-mail che informino sull'attivazione di qualunque stato di allerta, così come dare comunicazioni periodiche sullo stato di funzionamento del sistema, oppure di avvio e di interruzione dell'elaborazione. È inoltre possibile produrre automaticamente dei report periodici sui dati di monitoraggio desiderati.

A titolo di esempio si riporta in Figura 10 una schermata del pannello di controllo del software di elaborazione dei dati.

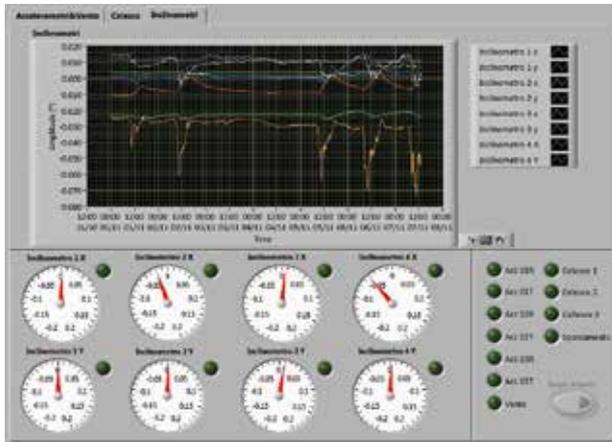


Fig. 10 - Schermata del pannello inclinometri.

La rapida elaborazione e visualizzazione automatica di certi parametri ha permesso di compiere valutazioni immediate sull'evoluzione statica della struttura a seguito di situazione di potenziale rischio, per esempio i citati eventi sismici registrati nel corso del 2012. Valutando in tempo reale i valori di inclinazione dei diversi livelli della guglia e la distanza relativa di questa col ponteggio, prima ed immediatamente dopo la risposta delle strutture al sisma, il sistema di monitoraggio ha permesso di escludere in prima istanza situazioni di allarme, sia per la strutture stesse che per le condizioni operative del cantiere. La continuità di monitoraggio e registrazione completa dei dati ha permesso in ogni caso di compiere analisi molto più approfondite e dettagliate a posteriori.

## CONCLUSIONI

Si è posta l'attenzione su come un sistema di monitoraggio continuativo permetta di analizzare l'intero trend evolutivo delle grandezze misurate, consentendo una selezione di ciò che è identificabile in termini di evoluzioni cicliche delle grandezze statiche della struttura, da ciò che evidenzia fenomeni di deriva dell'assetto. Può rappresentare inoltre un'efficace strumento di valutazione della condizioni di salute della struttura a seguito di particolare eventi ambientali, la cui occorrenza ed intensità non siano prevedibili.

Il sistema sviluppato ed installato presso la Guglia Maggiore del Duomo di Milano, in più di due anni di operatività ha mostrato di poter soddisfare i requisiti richiesti. L'intero sistema di misura ed il suo cablaggio sono stati predisposti garantendo la minor interferenza possibile con le attività di cantiere in atto. Ha acquisito con continuità fino a 19 canali di misura, facilmente espandibili, fornendo una banca dati utile a definire le condizioni standard di comportamento della struttura; consentendo di poter stabilire delle soglie di allerta che possano avvisare dell'insorgere di situazioni di rischio, per la struttura e per il personale operante in cantiere. È stato inoltre possibile valutare la risposta della struttura stessa ad ogni genere di evento fin ora occorso, dall'avvio del sistema.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Busca, G., Cappellini, A., Cigada, A., Scaccabarozzi, M., & Vanali, M. (2011). Dynamic properties of the Guglia Maggiore of the Duomo in Milano via Operational Modal Analysis. *EVACES - Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, (p. 1-8). Varenna (LC) - Italy.
- [2] Caprioli, A., & Vanali, M. (2009). Comparison of different serviceability assessment measures for different events held in the G. Meazza Stadium in Milano. *IMAC-XXVII*, (p. 1-8). Orlando, Florida, USA.
- [3] Caprioli, A., Reynolds, P., & Vanali, M. (2007). Evaluation of serviceability assessment measures for different stadia structures and different live concert events. *IMAC XXV*. Orlando, Florida.
- [4] Cigada, A., Caprioli, A., Redaelli, M., & Vanali, M. (2008). Vibration Testing at Meazza Stadium: Reliability of Operational Modal Analysis to Health Monitoring Purposes. *J. Performance of Constructed Facilities*, 228-237.
- [5] Cigada, A., Moschioni, G., Vanali, M., & Caprioli, A. (2010). The measurement network of the San Siro Meazza Stadium in Milan: origin and implementation of a new data acquisition strategy for structural health monitoring. *Experimental Techniques*, 70-81.
- [6] Corradi Dell'Acqua, L., & Calvi, G. M. (2009). La gran guglia come opera di ingegneria: un'opera ardua su un supporto difficile. *La gran Guglia del Duomo di Milano e il caso Croce*. Milano.
- [7] Nascimbene, R., Fogà, E., Calvi, G. M., Moratti, M., Pinho, R., Cigada, A., et al. (2012). Realizzazione di un ponteggio metallico per la Gran Guglia del Duomo di Milano: analisi, modellazione, verifica ed identificazione dinamica. *Progettazione Sismica*, IUSS Press.

## ABSTRACT

CIVIL STRUCTURES HAVING SOCIAL, CULTURAL HERITAGE AND ARCHITECTURAL RELEVANCE ARE THOSE WHERE A SYSTEMATIC AND ACCURATE MONITORING SYSTEM IS OFTEN NEEDED. THE NATURE OF THE EVENTS THAT COULD AFFECT THE HEALTH OF A STRUCTURE, SUCH AS EARTHQUAKES OR SEVERE WEATHER PHENOMENA, IS - TO A LARGE EXTENT - UNKNOWN. THE INTENSITY OF THESE PHENOMENA ISN'T FORESEEABLE, NOR IS THE MOMENT WHEN THEY WILL OCCUR. RESTORATION OR REINFORCEMENT WORKS ARE FURTHER SITUATIONS WHERE THE STATIC AND DYNAMIC CONDITIONS OF A STRUCTURE COULD BE IMPAIRED. IN ALL THESE CONDITIONS, THE AVAILABILITY OF A CONTINUOUS AND REAL TIME STRUCTURAL HEALTH MONITORING IS OBVIOUSLY USEFUL IN THE DETECTION OF A POTENTIALLY DANGEROUS SITUATION FOR THE STRUCTURE AND ITS OCCUPANTS. WHEN IT COMES TO HISTORIC BUILDINGS, THE UTILITY OF HAVING A HEALTH MONITORING SYSTEM IS MORE EVIDENT, BECAUSE OF THE GREATER FRAGILITY OF THESE KINDS OF STRUCTURES. HENCE IS THE NEED TO DESIGN A MONITORING SYSTEM FOR THE MAIN SPIRE OF MILAN'S DUOMO.

## PAROLE CHIAVE

MONITORAGGIO STRUTTURALE; MISURE STATICHE; MISURE DINAMICHE; RESTAURO; MONITORAGGIO CONTINUATIVO

## AUTORI

ALFREDO CIGADA  
alfredo.cigada@polimi.it  
MATTEO SCACBAROZZI  
matteo.scaccabarozzi@polimi.it  
EMANUELE ZAPPA  
emanuele.zappa@polimi.it

SEZIONE MISURE E TECNICHE SPERIMENTALI  
DIPARTIMENTO DI MECCANICA POLITECNICO DI MILANO  
Via LA MASA 1 - 20156 MILANO

BENIAMINO MÖRLIN VISCONTI CASTIGLIONE  
direzione@duomomilano.it  
ARCHITETTO DEL DUOMO DI MILANO  
VENERANDA FABBRICA DEL DUOMO DI MILANO  
Via DELL'ARCIVESCOVADO, 1 - 20121 MILANO

MARCELLO VANALI  
marcello.vanali@unipr.it  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE, UNIVERSITÀ DI PARMA  
PARCO AREA DELLE SCIENZE, 181/A - 43124 PARMA