

## Il monitoraggio topografico della cattedrale di Agrigento

Gino Dardanelli, Giuseppe Cavallaro

L'oggetto del presente lavoro è il monitoraggio della cattedrale di San Gerlando di Agrigento, duomo eretto tra i secoli XI e XII, che sorge nella parte più alta della collina di Girgenti. Lo studio è significativo poiché, nel corso dei secoli la costruzione è stata soggetta a interventi di ristrutturazione e di consolidamento, resi necessari dai danni arrecati da frane che, in più occasioni, hanno coinvolto il territorio su cui essa sorge.

Dal 2010 la chiesa è chiusa al culto per copiosi eventi franosi e idrogeologici che hanno allarmato ulteriormente anche la Protezione Civile. A seguito di questi eventi è stata avviata una campagna di indagini e monitoraggi con il fine della caratterizzazione geotecnica del sottosuolo, l'approfondimento della conoscenza dello stato attuale delle murature e il controllo dell'evoluzione della condizione di dissesto in atto.

Nell'ambito dell'attività di monitoraggio del Duomo è stata prevista la realizzazione di un sistema di controllo topografico di precisione della parete nord a mezzo di una stazione totale automatizzata e di mini-prismi da monitoraggio.

L'obiettivo di questo monitoraggio è la determinazione degli spostamenti rigidi della struttura, delle deformazioni delle pareti determinabili misurando gli spostamenti relativi tra i punti di controllo e delle rotazioni della struttura rispetto ad un piano verticale.

Il sistema di monitoraggio è costituito da venti punti di controllo (fissati nella parete nord del duomo), due capisaldi, una stazione totale automatizzata e una coppia di ricevitori GNSS.

Attraverso la stazione totale automatizzata è stato eseguito un rilievo dei punti di controllo, mentre tramite i ricevitori GNSS sono determinati i punti per l'inquadramento del rilievo nel sistema di riferimento Gauss-Boaga e il controllo di eventuali spostamenti assoluti dei capisaldi. La stazione totale utilizzata è prodotta dalla *Trimble*, modello S8, ed è uno strumento nato appositamente per le operazioni di monitoraggio, dato che garantisce precisioni sulle letture angolari pari a 1" (0,1 mgon), portata Autolock e robotica (prismi passivi) a 500–700 m, precisione di puntamento a 200 m inferiore a 2 mm e precisione di puntamento a 300 m (deviazione standard) inferiore ad 1mm.

I punti di controllo sulla parete nord della cattedrale sono stati materializzati attraverso dei prismi da monitoraggio da 25 mm collegati con staffe a L. Quest'ultime sono state bullonate ad una barra con estremità filettata inserita nella muratura e fissata attraverso resina espansa del tipo bicomponente. I ricevitori utilizzati per il rilievo statico delle coordinate dei capisaldi sono ricevitori GNSS della Topcon, modello Hiper Plus.

Lo schema del rilievo eseguito è di tipo classico e prevede la collimazione dei prismi da due punti stazione posti ad una distanza di circa duecento metri. Da ogni punto stazione sono stati effettuati diversi cicli di misura per ognuno dei quali, determinati angoli azimutali, zenitali e distanze inclinate, è stato possibile calcolare le coordinate dei punti. I punti di controllo sono stati distribuiti nelle tre elevazioni della parete della chiesa e, dopo essere stati collocati sono stati orientati verso i punti stazione e quindi fissati saldamente con chiavi speciali.

La distribuzione dei punti da materializzare è stata decisa in relazione alla conoscenza delle zone del duomo maggiormente soggette agli spostamenti, in particolare sulla base delle indicazioni degli strumenti di monitoraggio già presenti.

La campagna di misure, avviata nel mese di settembre dello scorso anno, ha previsto, per ogni giornata di rilievo, la determinazione delle coordinate dei punti di controllo da ogni caposaldo, collimando tutti i prismi ad intervalli di tempo fissati. Pertanto per ciascun punto di controllo si sono ottenute un numero ridondante di misure che hanno permesso di migliorare la conoscenza relativamente alla precisione del rilievo.

Dall'elaborazione dei dati della stazione totale sono state ottenute le coordinate dei punti di controllo nel sistema di riferimento locale, quindi, note le coordinate dei capisaldi grazie al rilievo GPS, è stato possibile riferire tutte le misure ad un unico sistema di riferimento, quello nazionale Gauss-Boaga.

Le coordinate dei punti di controllo sono state determinate con tre cicli di misura per ogni punto stazione ripetuto in quattro diverse giornate di misure. Al fine di apprezzare al meglio l'affidabilità del sistema di monitoraggio sono state analizzate le coordinate dei punti di controllo calcolate per ogni ciclo dai diversi punti stazione.

L'analisi delle variazioni di coordinate dei punti di controllo è stata condotta calcolando le differenze tra la coordinata est, nord e quota della prima sessione con quelle delle sessioni successive.

Successivamente si è affrontata una analisi che prevedesse il confronto delle coordinate del singolo punto di controllo determinate dai due punti stazione, durante le stesse giornate di rilievo. Questa analisi permette di evidenziare delle incertezze nella determinazione della coordinate est, nord e quota.

In conclusione si può affermare che il sistema di collimazione automatica abbinato alla presenza di servomotori presenta evidenti vantaggi di produttività nell'esecuzione di reiterazioni o di cicli ripetuti di misure, e rende possibile l'esecuzione di monitoraggi di deformazioni in modo completamente automatizzato.

Come si può notare dai diagrammi che saranno riportati nel lavoro definitivo tra le diverse sessioni di misure si hanno scostamenti delle coordinate dell'ordine di qualche millimetro. E' da evidenziare che le variazioni sono state apprezzate da un solo punto stazione pertanto non possono considerarsi come spostamenti dei punti di controllo rispetto alla posizione iniziale ma sono da attribuire a errori di computazione, essendo comunque di un ordine di grandezza che rientra nella precisione attesa dal sistema. Tali scostamenti sono spesso imputabili a problemi di aggancio automatico del mini-prisma, non indifferente per le distanze presenti in questa applicazione. La distanza tra i punti di controllo e i capisaldi, come detto dell'ordine di duecento metri risulta essere un limite per la precisione stessa delle misura in quando non favorisce un'univoca collimazione del prisma.

Si può affermare che per una precisione sub-centimetrica il sistema di monitoraggio realizzato possa ritenersi valido.

Nel caso in cui si abbia la necessità di precisioni sub-millimetriche è necessario ricorrere a sistemi di monitoraggio fissi, posizionati in alloggi protetti da possibili manomissioni e che lavorino in maniera automatica e continua, così come dimostrato dalla precisione ottenuta all'interno di una stessa sessione. Nei prossimi mesi saranno disponibili ulteriori dati relativi ad altre campagne di misura.