TECNICHE GEOMATICHE INTEGRATE PER IL MONITORAGGIO DELLE MURA CICLOPICHE DI AMELIA

Raffaella BRIGANTE (*), Donatella DOMINACI (**), Guido FASTELLINI (*), Fabio RADICIONI (*), Aurelio STOPPINI (*)

(*) Università degli Studi di Perugia, DICA, Via G.Duranti 93 - 06125 Perugia tel. 075/5853765 - fax 075/5853756 - e-mail topos@unipg.it
(**) Università degli Studi dell'Aquila, DAU, P. le E. Pontieri 2 - 67040 Monteluco di Roio, L'Aquila tel. 0862/434135 - e-mail dominici@dau.ing.univaq.it

Riassunto

L'antica città umbra di Amelia (TR) conserva pressoché intatta la sua monumentale cinta muraria, che per lunghi tratti è stata realizzata da civiltà italiche (Umbri e Pelasgi) nei secoli tra il VI e il IV a.C.. La particolare tipologia di costruzione, definita "ciclopica", è caratterizzata da blocchi litici di notevoli dimensioni (a volte superiori ai 2 metri), tagliati con grande precisione in forma di poligoni irregolari e assemblati a secco. Questo tipo di manufatto, di cui esistono solo altri rari esempi in Italia, riveste un eccezionale interesse archeologico, storico e architettonico.

In tempi recenti le mura sono state interessate da dissesti, culminati in un episodio di crollo. La Regione Umbria ha provveduto all'esecuzione di opere di restauro e consolidamento ed ha posto le mura sotto controllo. In quest'ambito, all'Università di Perugia (DICA) è stata affidata la progettazione ed esecuzione di un sistema di monitoraggio basato su tecniche geomatiche (GNSS, stazioni totali robotizzate, laser scanning e fotogrammetria digitale terrestre). Il sistema è stato progettato per utilizzare le diverse tecniche e sensori in sinergia, traendo beneficio dai peculiari vantaggi di ciascuna di esse. Particolare cura è stata dedicata alle materializzazioni, realizzate con grande attenzione al contesto monumentale e ambientale.

Nel presente lavoro vengono presentati il progetto del sistema di monitoraggio, le prestazioni attese dalle sue diverse componenti, le fasi di concreta realizzazione dell'intervento, le metodologie di analisi ed i risultati delle prime osservazioni eseguite.

Abstract

The ancient Umbrian town of Amelia (near Terni, in central Italy) keeps almost intact its monumental curtain of walls, including long stretches built by Italic civilizations (Umbrians and Pelasgians) between VI and IV century BC. The particular construction of such walls, referred to as "cyclopic", is characterized by large (some are > 2 m) limestone blocks cut in polygonal shape, assembled with no cement. This kind of manufact, with only seldom other examples existing in Italy, has an exceptional historical and architectonic interest.

Recently, the Amelia walls have been interested by structural problems culminating in a local collapse. Consequently, a series of restoration actions have been undertaken by the Regional Council of Umbria, and the walls have been put under control. In this frame, the Perugia University (DICA) has been assigned the design and set up of an integrated monitoring system based on geomatic techniques (GNSS, robotic total stations, digital photogrammetry, laser scanning). The system has been designed to employ such different techniques and sensors in synergy, taking advantage by the different features of each one. A particular care has been applied on the monumentations, which have been realized with great attention to the architectonic and environmental context.

This work presents the design of the monitoring system, the performance expected from its different components, the setting up phase, the data analysis methods and the first results.

1. Cenni storici

La fondazione della città di *Ameria* viene fatta risalire da fonti classiche (Plinio il V., Catone) al XII secolo a.C.. Fu abitata da popolazioni italiche (Pelagi, Umbri) e divenne municipio romano attorno al 340 a.C.. La cinta muraria della città, nella parte sud, è caratterizzata dalla monumentale costruzione ciclopica poligonale databile al IV secolo a.C., con blocchi di dimensioni notevolissime (anche alcuni metri). Un tratto di mura megalitiche più a nord, in prossimità della Porta della Valle, viene fatto risalire a un'epoca anteriore (VI sec. a.C.). Alcuni tratti delle mura presentano rifacimenti e sopraelevazioni di epoca romana e medievale.



Figura 1 – Mura ciclopiche presso la Porta Romana (sin); Mura megalitiche presso la Porta della Valle (ds)

Nel 2006, un tratto delle mura ciclopiche nella zona sud-ovest della città è stato interessato da un crollo a seguito del quale la Regione Umbria ha provveduto a realizzare opere di restauro e consolidamento, tuttora in corso di esecuzione. Il DICA dell'Università di Perugia è stato incaricato di progettare e realizzare il sistema di controllo di seguito descritto.

2. Il sistema di monitoraggio integrato

Nell'ambito della cinta muraria, sono state individuate quattro aree caratterizzate da un particolare stato di rischio (zone A, B, C, e D in fig. 2), da sottoporre a monitoraggio.



Figura 2 – Planimetria delle mura e ubicazione delle quattro aree da controllare

Il sistema progettato è basato su quattro diverse tecnologie della Geomatica:

- GNSS per realizzare una rete di inquadramento di tutte le aree interessate;
- **Reti tridimensionali locali** misurate con stazioni totali robotiche di alta precisione, per il monitoraggio topografico per punti di ciascuna delle quattro aree da controllare;
- Laser scanner terrestre per il rilievo (quasi) continuo tridimensionale della superficie e delle deformazioni dei tratti di parete da controllare;
- **Fotogrammetria digitale terrestre** per il rilievo tridimensionale continuo delle mura, sia a fini metrici che di documentazione dello stato di fatto.

Nel seguito vengono forniti maggiori dettagli sull'impiego di ciascuna delle tecniche sopra citate e sulle modalità in cui le stesse si integrano in un sistema di monitoraggio unico.

3. La rete GNSS

Una rete GNSS di inquadramento connette le quattro aree sotto controllo allo scopo di georeferenziarle in un unico e stabile datum, evidenziando nel contempo eventuali movimenti relativi tra i diversi versanti. La rete GNSS di Amelia è collegata mediante numerose baselines alla rete regionale di stazioni permanenti dell'Umbria, il che rende possibile inquadrarla nei datum globali; l'inquadramento è stato per ora eseguito in ETRS89.

La rete GNSS include due vertici per ciascuna delle quattro reti tridimensionali locali (per la descrizione delle reti e delle relative materializzazioni a centramento forzato si veda il successivo punto 4), per un totale di 8 vertici. Le baselines di collegamento previste dal progetto sono 16, ottenendo così un "indice di ridondanza" (Dominici ed al., 1995) pari a:

$$R = \frac{16}{8-1} = 2.3$$
 [1]

L'accuratezza attesa è inferiore al mezzo centimetro. La misura delle basi viene effettuata in modo statico, con sessioni di durata minima 1 ora ad un intervallo di campionamento di 5 secondi, impiegando quattro ricevitori geodetici Topcon GPS/GLONASS a doppia frequenza. Le quattro antenne utilizzate sono tutte di identico modello, per ridurre l'effetto di eventuali errori di calibrazione.

4. Le reti tridimensionali locali

In ciascuna delle aree prescelte (con esclusione per ora della zona D per problemi di accesso) sono state realizzate reti tridimensionali di controllo da misurare periodicamente con stazioni totali motorizzate di precisione (Leica TCA 2003). La figura 3 mostra, a titolo di esempio, lo schema di progetto di una delle reti, comprendente tre punti di stazione materializzati su pilastrini posti di fronte alle mura e quattro serie di prismi fissati alla parete lungo quattro sezioni verticali.



Figura 3 – Schema planimetrico rete 3D zona "A" (sin); Schema della disposizione dei prismi (ds); Quote in metri

Gli angoli orizzontali e verticali vengono misurati con quattro reiterazioni eseguite in automatico dalla stazione totale motorizzata. L'accuratezza attesa sulle posizioni 3D dei prismi è di 1-2 mm. La valutazione della stabilità delle stazioni e della significatività o meno degli eventuali spostamenti rilevati nel tempo verrà eseguita con test di congruenza (Caspary, 1987; Dominici et al., 1996)

Materializzazioni

I pilastrini di stazione (parte dei quali sono stati utilizzati anche per la rete GNSS) sono realizzati in pietrame locale con anima in calcestruzzo armato. La sezione è quadrata con dimensioni di 45 x 45 cm. La fondazione è realizzata con plinto di 150 x 150 cm poggiante su 4 micropali di circa 8 metri di lunghezza, o gettato direttamente su strati di roccia compatta in alcune zone.

Sulla sommità di ogni pilastrino è stato realizzato un sistema di centramento forzato con piastra di acciaio inox con foro centrale calibrato nel quale trova riscontro una sferetta fissata alla base degli strumenti. Le basi utilizzate sono del tipo ad altezza costante (una vite fissa e due regolabili); uno spinotto eccentrico (con corrispondente foro praticato nella piastra) impedisce rotazioni dello strumento durante la misura e fa sì che l'orientamento della basetta sia sempre lo stesso.

I prismi (miniprismi Leica GMP101) sono fissati alla parete mediante appositi adattatori in acciaio inox ancorati con resina o malta. Le piccole dimensioni ne minimizzano l'impatto visivo.



Figura 4 – Particolari delle materializzazioni: Pilastrino di stazione e GNSS (A); Stazione totale TCA 2003 su pilastrino (B); Miniprisma GMP101 (C); Adattatore per miniprisma (D, quote in mm); Prisma montato (E)

5. Scansione laser terrestre

Le scansioni vengono effettuate facendo stazione negli stessi pilastrini utilizzati per le reti 3D e per il GNSS, la cui ubicazione è stata scelta in funzione di un'ottimale visibilità dei tratti di parete interessati. I prismi disposti sulla parete fungono da marker la cui posizione viene determinata mediante le reti 3D. Il rilievo a scansione laser viene così ad essere georeferenziato nello stesso sistema delle reti 3D.

Un primo rilievo è stato eseguito con uno strumento di tipo "EDM-imaging" (Topcon IS, fig. 5). Si tratta in pratica di una stazione totale robotizzata, con EDM laser senza riflettore, che esegue una scansione tridimensionale della superficie dell'oggetto con una velocità di 20 punti al secondo e accuratezza di circa 5 mm, permettendo di ottenere nuvole di punti del tutto analoghe a quelle

ricavabili da un laser scanner, sia pure con una rapidità di acquisizione inferiore. L'acquisizione metrica dei punti è coordinata con la presa di immagini digitali effettuata da una camera digitale coassiale allo strumento.

Successive riprese verranno eseguite con strumentazione laser scanning terrestre di tipo convenzionale, che permette di ottenere nuvole di punti a densità più elevata in tempi minori; i risultati delle scansioni laser verranno confrontati con quelli ottenuti con la tecnologia EDM-imaging.



Figura 5 – Rilievo a scansione EDM con stazione totale Topcon Imaging IS

6. Fotogrammetria digitale terrestre

Le zone oggetto del monitoraggio vengono rilevate anche con fotogrammetria digitale terrestre. Le prese sono state eseguite con le seguenti fotocamere:

- Una camera grandangolare semimetrica Fuji GSW 690 III a pellicola (formato del negativo 56.0 x 82.6 mm; 8 fotogrammi su una pellicola 120; ottica fissa di focale 65 mm) calibrata e dotata sul piano focale di un reseau in vetro ottico fotoinciso (realizzato dalla OMI di Roma) recante 35 marche a croce. Gli angoli di campo per i lati maggiore e minore del fotogramma sono rispettivamente di 66° e 46° circa. I negativi vengono scanditi con uno scanner Nikon 9000 ED.
- Una camera digitale Nikon D200 (ottiche intercambiabili) con obiettivo di focale 14 mm, calibrata presso il Laboratorio di Topografia e Fotogrammetria del DICA. Dimensioni sensore 23.6 x 15.8 mm. Angoli di campo con ottica 14 mm: 80° e 56° (lato maggiore e minore).



Figura 6 – Schema delle prese fotogrammetriche con camera GSW 690 nella zona "A"

La figura 6 mostra, a titolo di esempio, lo schema di progetto delle strisciate per una delle zone da monitorare, riferito alla camera GSW 690. Il ricoprimento longitudinale è del 70%, quello trasversale del 25%. La scala media dei fotogrammi risulta circa 1:200. Con una scansione a 1200 dpi si ottiene una dimensione del pixel sul fotogramma di 21 micron, corrispondenti a 4 mm circa sulla parete. L'accuratezza attesa è al di sotto dei 5 mm, analoga quindi a quella ottenuta dalle scansioni laser.

I punti di appoggio sulla parete sono costituiti in parte dagli stessi prismi delle reti 3D, integrati da altri punti della parete non segnalizzati (spigoli di elementi litici) rilevati con stazione totale dai pilastrini delle reti. Lo stesso DSM dei manufatti acquisito con il laser scanner può integrarsi vantaggiosamente con i dati fotogrammetrici permettendo di migliorare l'esito della restituzione.

La triangolazione aerea e la restituzione vengono eseguiti con la workstation fotogrammetrica digitale del Laboratorio di Topografia e Fotogrammetria del DICA, dotata di un sistema di visione stereoscopica a occhiali passivi, con il software SOCET SET 5.4 della BAe Systems.

7. L'integrazione tra le diverse tecniche utilizzate

Le tecniche sopra descritte si integrano in un sistema di monitoraggio completo; esistono infatti molteplici aspetti di sinergia tra i quali si possono citare i seguenti:

- La rete GNSS permette di georeferenziare tutti i rilievi locali in un unico datum (ETRS89) coerente con la cartografia esistente, ed è in grado di rilevare eventuali spostamenti relativi tra le aree in oggetto;
- Le reti 3D costituiscono la tecnica di maggior accuratezza e sensibilità, in grado di rilevare sui punti segnalizzati (prismi) spostamenti di entità piccolissima (1-2 mm), fungendo quindi da sistema di allarme per evidenziare e prevenire eventuali dissesti; la frequenza dei rilievi prevista inizialmente è di tre mesi, da incrementare se necessario in base all'esito delle prime campagne. Grazie a questa tecnica "spia" potrà essere anche decisa e variata nel tempo la periodicità delle campagne delle altre tecniche di monitoraggio.
- La scansione laser permette di estendere il rilievo di controllo a tutta la superficie del manufatto, superando il limite della tecnica di cui sopra che opera su punti singoli;
- La fotogrammetria digitale, oltre a fornire un rilevamento metrico confrontabile con quello della scansione laser, realizza una documentazione accurata dello stato di fatto, con particolare riferimento alle lesioni degli elementi litici; interagisce inoltre con la tecnica laser scanner potendo utilizzare, con opportuni software, il DSM ottenuto da questa.
- Le materializzazioni eseguite per le reti 3D vengono utilizzate anche per la rete GNSS, per le scansioni laser e per la determinazione dei punti di appoggio fotogrammetrici.

Si può quindi concludere che le quattro tecnologie geomatiche impiegate nel presente lavoro si integrano sinergicamente in un sistema di monitoraggio unico e completo, che somma i vantaggi e le peculiarità di ciascuna di esse.

8. Bibliografia

Caspary W. F. (1987). *Concepts of network and deformation analysis*. Monograph 11, University of New South Wales, Australia.

Dominici D., Radicioni F., Stoppini A., Unguendoli M. (1995). *Testing on the redundancy effect in GPS networks: some examples.* Proc. of the 1st International Symposium on Deformations in Turkey, Istanbul, September 1994.

Dominici D., Radicioni F., Selli S. (1996). *Statistical Analysis of GPS monitoring Network*. Proc. of IAG Regional Symposium on deformations and Crustal movement investigations using Geodetic Techniques, Székesfehérvár, Hungary, August - September 1996.

Grassi S., Radicioni F., Stoppini A. (2003). *Monitoraggio tridimensionale in tempo reale delle deformazioni: Prove in condizioni operative su una stazione totale automatica di alta precisione.* Atti della VII Conferenza Nazionale ASITA, Verona, Ottobre 2003.

Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A. (2008): *An integrated monitoring system for the monumental walls of Amelia.* Proc. of "Measuring the Changes", 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis - 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, May 2008.