

Il monitoraggio di una diga a gravità mediante GPS

Riccardo Barzaghi (*), Letizia Cannizzaro (*), Maria Elena Gaetani (*), Livio Pinto (*)

(*) Politecnico di Milano, DIAR - Sez. Rilevamento, P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133, Milano

Tel. 02.2399.6528 - 02.2399.6510 - 02.2399.6510 - 02.2399.6525, Fax: 02.2399.6530

E-mail: riccardo.barzaghi@polimi.it, letizia.cannizzaro@polimi.it, mariaelena.gaetani@polimi.it, livio.pinto@polimi.it

Riassunto

L'obiettivo del lavoro è stato quello di valutare le potenzialità del GPS come strumento di controllo delle strutture. Data l'ampia casistica del problema, non è stato possibile affrontare in termini generali l'argomento: si è scelto allora uno dei possibili casi, quello del controllo delle dighe. In particolare si è presentata agli autori l'opportunità dello studio di una diga a gravità.

E' stato messo a punto un sistema di monitoraggio costituito da stazioni permanenti GPS, i cui dati raccolti sono stati elaborati per ricavare le serie temporali giornaliere delle coordinate delle stazioni stesse. E' stato inoltre possibile mettere in relazione i dati geodetici con i dati di temperatura dell'aria e dell'acqua, e con i dati degli spostamenti di due coppie di pendoli, dritti e rovesci, montati in corrispondenza delle stazioni GPS.

I risultati ottenuti accertano la sensibilità della tecnica GPS nel controllo della struttura e mostrano come gli spostamenti visibili con il GPS, dedotti da un'analisi qualitativa delle serie temporali, rispecchino il comportamento atteso per la struttura in esame.

Abstract

The aim of the present work is to assess the capability of GPS technique in monitoring civil structure deformations. The applications can be several and the matter can be very different: the authors had the opportunity to focus their attention on dams monitoring.

A geodetic network of six GPS permanent stations was settled down to monitor a dam. The collected data were processed to obtain daily coordinate time series.

The GPS deformations, the water (and air) temperature data and the deformations coming from pendulum monitoring systems demonstrate a great agreement.

The results highlight the capability of GPS system in monitoring dam structures because GPS displacements are clearly explained by physical point of view and reflect the expected behaviour.

Introduzione

Il monitoraggio delle strutture, o in generale il monitoraggio ambientale, riveste un ruolo fondamentale nell'ambito della sicurezza, perché consente di valutare nel tempo le modificazioni del fenomeno in esame, con l'obiettivo ultimo di riconoscere l'insorgere di situazioni di pericolo per cose o persone e quindi consentire un'efficace allarmistica.

Il monitoraggio strutturale non è, di per sé, un argomento di studio recente; al contrario ha una lunga tradizione in diverse discipline. Per quanto riguarda le tecniche di monitoraggio geodetico, i metodi tradizionalmente utilizzati per il controllo delle strutture possono essere suddivisi, come è ben noto, in due categorie: quelli che permettono di determinare spostamenti verticali (livellazione geometrica o trigonometrica, livellazione idrostatica, clinometro etc.), e quelli che permettono di determinare spostamenti orizzontali (triangolazione, collimatore, pendoli dritti e rovesci etc.). Questi metodi, che consentono di raggiungere elevate precisioni, sono ormai ben consolidati e largamente utilizzati, ma hanno il limite di non fornire una descrizione continua del fenomeno, nel senso che si eseguono campagne periodiche di misura con la presenza costante di personale tecnico;

inoltre le tecniche citate difficilmente si prestano all'automatizzazione delle procedure di acquisizione o di un sistema di allarme. Per questi motivi, tra le nuove metodologie sviluppate nel tempo, da affiancare ai metodi tradizionali di monitoraggio, un ruolo importante è ricoperto dal posizionamento satellitare GPS di precisione, che permette di avere una maggior risoluzione temporale e una strumentazione che ben si presta all'automatizzazione delle misure e alla realizzazione di un sistema di allarme semi-automatico. Altro vantaggio del metodo risiede nel fatto che il sistema GPS fornisce contemporaneamente le deformazioni nelle tre dimensioni.

In letteratura è possibile trovare alcuni esempi di applicazioni di apparati satellitari GPS nel controllo di opere ingegneristiche: in (Cazzaniga et al., 2005), (Çelebi, Sanli, 2002) e (Psimoulis et al., 2006) si parla del monitoraggio GPS di strutture snelle, in particolare di ciminiere o edifici alti; in (Brown et al., 2006), (Collier, Raziq, 2006) e (Li, Ou, 2006) si parla invece del monitoraggio GPS di ponti; anche per quanto riguarda le dighe è possibile trovare articoli in letteratura: (Lutes, 2002), (Radhakrishnnan, 2006) e (Behr, Hudnut, 1998) sono alcuni esempi.

Da un punto di vista pratico, il controllo delle opere avviene installando le antenne GPS sulla struttura da monitorare, nei punti ritenuti più significativi per la valutazione degli spostamenti dell'intera struttura o di una sua parte: ad esempio, al centro del coronamento e sulle spalle delle dighe; oppure in corrispondenza delle pile dei ponti o sulla sommità di strutture snelle quali le ciminiere o alti edifici.

La casistica del problema del monitoraggio delle strutture, a ben vedere, è ampio e gli autori hanno avuto l'opportunità di poter studiare, nell'ambito di un'attività di consulenza, un caso concreto di diga a gravità.

Il sistema di monitoraggio della diga e l'elaborazione dei dati geodetici

Il caso di studio riguarda la diga a gravità Cixerri, in Sardegna. L'opportunità di studiare questa struttura è nata nell'ambito di un'attività di consulenza che il DIIAR del Politecnico di Milano – sez. Rilevamento – ha svolto per conto di Leica Geosystems, al fine di sperimentare sul campo la fattibilità di un sistema di monitoraggio di grandi opere basato sul GPS. Nell'ambito della consulenza è stato possibile seguire le varie fasi di realizzazione del sistema di monitoraggio, che consiste in sei ricevitori (con le caratteristiche delle stazioni permanenti GPS) a doppia frequenza, di cui quattro installati lungo il coronamento della diga, due al centro e due sulle spalle, in posizione equidistanti tra loro (430 m circa); i due restanti ricevitori sono posizionati all'esterno della diga in modo da poter essere utilizzati come stazioni *reference* nelle elaborazioni in post-processamento (i due ricevitori sono a distanza di circa 500 m e 1 Km dalla stazione diga più vicina). In Figura 1 è possibile vedere la disposizione dei ricevitori GPS del sistema di monitoraggio realizzato.

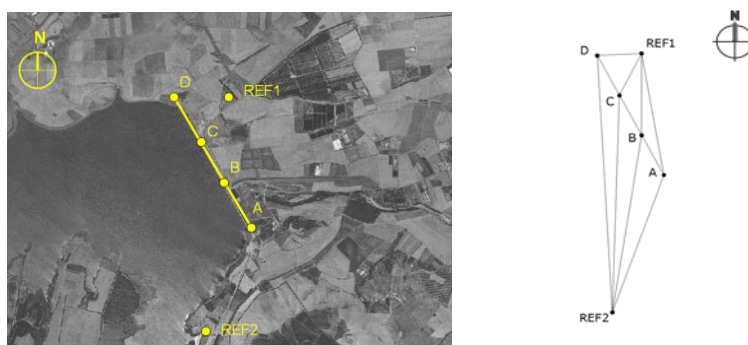
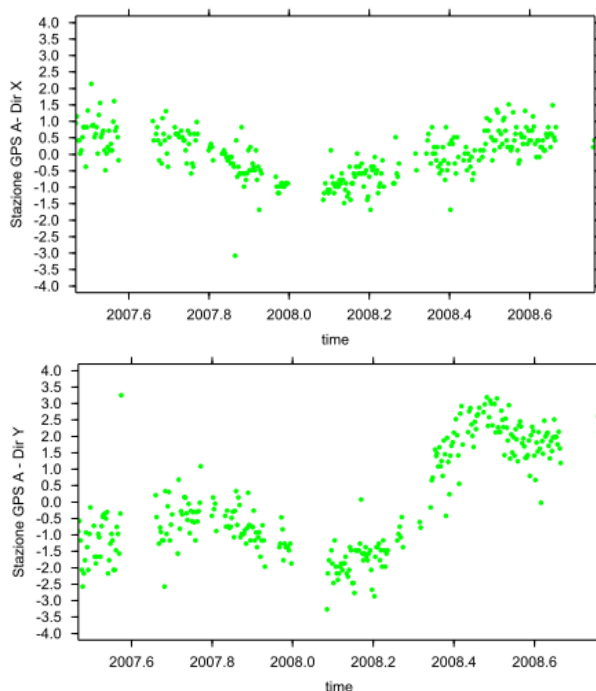


Figura 1 – Sinistra: Posizione dei ricevitori GPS facenti parte del sistema di monitoraggio. Destra: Configurazione geometrica di elaborazione delle baseline

Avendo voluto concentrare la nostra attenzione sul monitoraggio dei movimenti strutturali della diga, i cui spostamenti attesi sono di carattere stagionale, il calcolo delle coordinate delle stazioni GPS è stato eseguito su base giornaliera in modalità statica. Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software LGO (Leica Geomatic Office). E' stata scelta, dopo diverse analisi, una configurazione geometrica di elaborazione a stella (Figura 1).

In Figura 2 sono riportati i grafici delle serie temporali delle coordinate GPS di due punti che si trovano rispettivamente sulla spalla (stazione A) e sul coronamento (stazione B) della diga. E' più corretto dire che i dati riportati sono le variazioni (esprese in millimetri) delle coordinate dei punti, monitorati rispetto a una loro posizione iniziale presa come riferimento. Le serie temporali coprono, al momento, un lasso di tempo che va dal 20 Giugno 2007 al 5 Ottobre 2008. Le coordinate vengono calcolate in un sistema di riferimento locale i cui assi sono diretti in direzione monte-valle (X) e coronamento (Y), che sono le due direzioni lungo le quali ci si aspettano gli spostamenti interessanti, ed eventualmente critici, della struttura stessa.



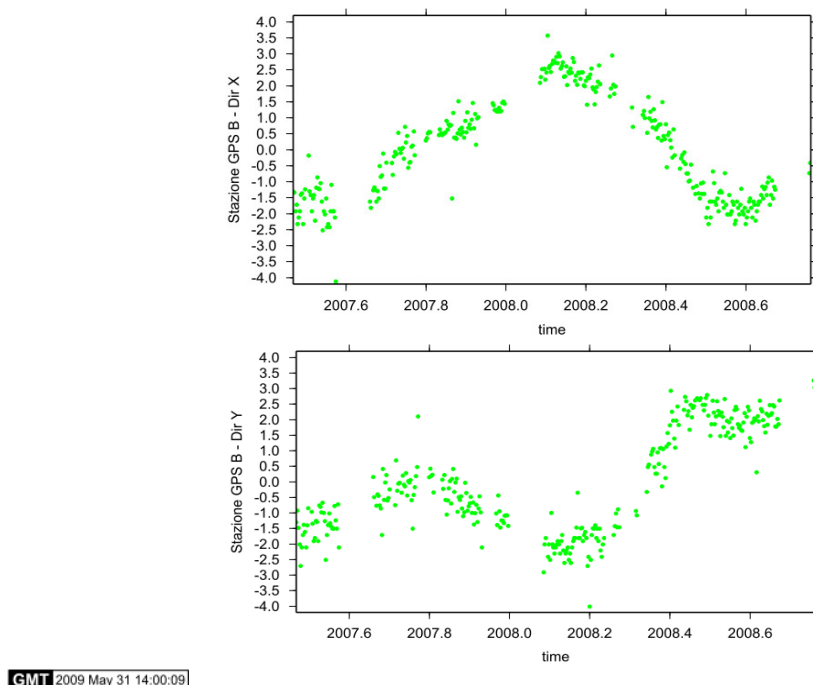


Figura 2 Serie temporali delle stazioni A (spalla) e B (coronamento) in direzione monte-valle (X) e coronamento (Y) espresse in millimetri.

I risultati ottenuti e il confronto dei dati geodetici con il sistema di monitoraggio dei pendoli

Sulla base delle serie temporali di coordinate GPS dei punti sulla diga è stato possibile fare alcune considerazioni. Innanzitutto le stazioni al centro del coronamento hanno un comportamento molto simile tra loro, così come accade per le stazioni posizionate sulle spalle: le stazioni al centro subiscono le deformazioni maggiori in direzione monte-valle, pari a circa 5 mm nel periodo analizzato. Si è visto che il picco di deformazione coincide, in termini temporali, con quello riscontrabile nei dati di temperatura (aria e acqua) misurati in corrispondenza della diga. Si suppone ragionevolmente che l'andamento delle deformazioni sia di tipo periodico (con periodo annuale, concorde con l'andamento della temperatura), ma per averne la conferma sarà necessario analizzare un periodo più lungo di dati.

Per quanto riguarda le stazioni sulle spalle della diga, anch'esse subiscono delle deformazioni in direzione monte-valle, ma di minore entità (ampiezza massima di 2 mm): queste, essendo vincolate al terreno, tendono a contrastare lo spostamento al centro della diga, tant'è che l'andamento delle deformazioni avviene in direzione opposta rispetto a quello delle stazioni al centro del coronamento.

Le deformazioni in direzione del coronamento (Y) sono molto simili per tutte e quattro le stazioni: esse hanno un andamento di tipo periodico e si evidenzia, apparentemente, un trend lineare. L'interpretazione di questo tipo di deformazione richiede, al momento della scrittura, ancora qualche approfondimento, anche se si pensa che esso possa essere dovuto (soprattutto il trend lineare) a fenomeni non legati al movimento della struttura.

Infine, per quanto riguarda le deformazioni in direzione verticale, si è visto che le stazioni sulle spalle non sembrano subire deformazioni in questa direzione, mentre per le stazioni sul coronamento, si può notare un picco di deformazione verso il basso pari a circa 2 mm, che coincide con il picco riscontrabile nei dati di temperatura.

I risultati ottenuti mediante la rete di monitoraggio GPS sono stati qualitativamente confrontati con i dati di un sistema di pendoli: le misure di spostamento sono rilevate in continuo come previsto dal foglio condizioni diga. Solo le stazioni GPS al centro della diga sono dotate di un pendolo (dritto e rovescio) corrispondente, mentre questa strumentazione è assente in corrispondenza delle stazioni sulle spalle.

Come si vede dalla Figura 3 è emerso che l'andamento e l'entità delle deformazioni stimate con il GPS, nella direzione monte-valle e per le stazioni al centro del coronamento, sono comparabili con quelle stimate tramite i pendoli. Non accade la stessa cosa in direzione Y (coronamento).

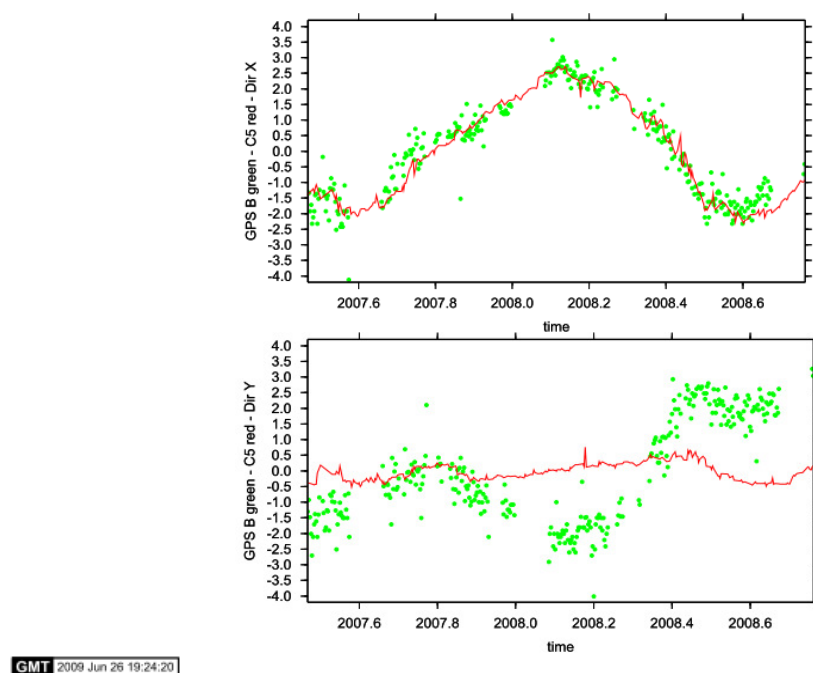


Figura 3 – Stazione al centro del coronamento: sovrapposizione delle serie temporali degli spostamenti (millimetri) ricavati dai dati dei pendoli (linea continua) e dai dati GPS (punti)

Conclusioni

I risultati ottenuti hanno accertato la sensibilità della tecnica GPS nel monitoraggio di una diga a gravità: i movimenti strutturali evidenziati dalla rete di controllo sono ben interpretabili e, soprattutto, concordi ai movimenti evidenziati con un diverso sistema di sensori (pendoli) di cui è dotata la diga.

La fase successiva del lavoro sarà quella di affrontare il problema della messa a punto di una metodologia per la calibrazione di un modello che permetta di realizzare un sistema di monitoraggio e di allerta automatico della struttura.

La strategia di lavoro, già pianificata, prevede di tentare di predire il comportamento della diga in assenza di pericolo, confrontare tale comportamento con l'andamento delle coordinate GPS e, infine, valutare se la struttura si comporti secondo il modello.

Come comportamento di riferimento della diga in assenza di pericolo si pensa di scegliere un modello che bene interpola le serie temporali degli spostamenti della struttura registrati mediante i pendoli: questi sono risultati essere in buon accordo con le serie temporali GPS nella direzione monte-valle, direzione nella quale si hanno gli spostamenti interessanti, ed eventualmente critici,

della struttura stessa. Laddove mancasse questo tipo di strumentazione, si pensa di utilizzare come comportamento di riferimento quello determinato tramite il sistema GPS stesso, dopo un opportuno periodo di acquisizione dati.

Ringraziamenti

Si ringrazia Leica Geosystem per il finanziamento della ricerca e per il supporto tecnico.

Bibliografia

- Barzaghi R., Gaetani M.E., Pinto L., Pozzoli A. (2007), "Monitoraggio strutturale e ambientale con serie temporali GPS", *Atti 11^o Conferenza Nazionale ASITA*, Centro Congressi Lingotto, Torino 6-9 Novembre 2007.
- Behr J. A., Hudnut K.W. (1998), "Continuous GPS monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California", *Seismological Research Letters*, Vol. 69, 4: 299-308.
- Brown C.J., Meng X., Roberts G.W. (2006), "Deflection Monitoring and Frequency Analysis of the Forth Road bridge using GPS", *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.
- Cazzaniga N.E., Forlani G., Pinto L., Abruzzi P. (2005), "Progetto e sviluppo di un sistema di monitoraggio di strutture snelle", *Atti della 9^a Conferenza Nazionale ASITA*, Catania.
- Çelebi M., Sanli A. (2002), "GPS Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 5, 1: 47-61.
- Collier P., Raziq N. (2006), "GPS Deflection Monitoring of the West Gate Bridge", *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.
- Gaetani M. E. (2009), "Controllo di strutture mediante metodologie GPS", *Tesi di dottorato in Geodesia e Geomatica*, XXI ciclo, Politecnico di Milano.
- Li H., Ou J. (2006), "A Remote Deformation Monitoring System for a Cable-stayed Bridge Using Wireless Internet-based GPS Technology", *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.
- Lutes J. A. (2002), "Automated Dam Displacement Monitoring Using A Robotic Total Station", *M.Sc.E. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical, Report No. 214*, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Psimoulis P.A., Pytharouli S., Triantafyllidis P., Stiros S. (2006), "Experimental Monitoring of Oscillations of major Flexible Structures Using GPS and RTS", *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.
- Radhakrishnam N. (2006), "Direct GPS Measurement of Koyna Dam Deformation During Earthquake", *3rd IAG/12th FIG Symposium*, Baden, May 22-24.