

Analisi delle deformazioni crostali dell'area dell'arco ionico tarantino

Angelo GALEANDRO, Alessandro CAPRA, Domenica COSTANTINO

Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente e lo Sviluppo Sostenibile (D.I.A.S.S.) – Politecnico di BARI
Viale del Turismo, 8 – 74100 Taranto – Tel.: 0994733258
e-mail: a.galeandro@poliba.it

Riassunto

Il lavoro presenta i risultati delle campagne di misura GPS effettuate sulla rete per il controllo delle deformazioni dell'arco ionico tarantino. La rete, istituita nel 2002, è costituita da 6 punti di cui 2 materializzati sul margine meridionale dell'altopiano murgiano, zona ipotizzata stabile. Per l'analisi dei dati, elaborati col *Bernese GPS Software v4.2*, è stato fatto un confronto sulle coordinate emanate, nel sistema ITRF2000, dalla stazione GPS permanente di Matera, oltre ad un confronto delle basi tra i vari punti.

Abstract

This job shows the results of several GPS campaigns in order to control the deformation of the arco ionico tarantino with a network constituted by 6 points. Data are processed with *Bernese GPS Software v4.2*. To analyze any movements, ITRF2000 coordinates of the points, emanated from permanent GPS station of Matera, are compared as well as the baselines length.

Introduzione al controllo delle deformazioni crostali

Un generico punto sulla superficie terrestre è soggetto a spostamento nel tempo a causa delle deformazioni a cui è soggetta la crosta terrestre. Note direzione ed intensità dello spostamento, è possibile esprimere la variazione delle coordinate del punto, espresse in un sistema di riferimento geodetico, come una funzione del tempo.

Varie teorie come la tettonica delle placche e il *post-glacial rebound* forniscono spiegazioni circa le cause delle deformazioni crostali, attribuendone l'origine ai movimenti convettivi del mantello, determinati dalla variazione spaziale della densità, ed al progressivo rilascio degli sforzi accumulatisi nella litosfera a causa del peso delle masse di ghiaccio che anno ricoperto parte della superficie terrestre nelle passate glaciazioni (*Ranalli, 1995; Turcotte, Schubert, 2001*).

Dagli anni '80, il GPS è diventato una delle tecniche più idonee per questo tipo di studio, grazie all'elevata precisione conseguibile, sia per applicazioni regionali che globali. Sono sorte numerose reti per il controllo delle deformazioni crostali in varie regioni della Terra e, con l'istituzione delle stazioni permanenti, è stato possibile implementare la rete globale IGS (*International GPS Service*) che fornisce informazioni di riferimento sulla cinematica globale.

Il sistema di riferimento in cui sono inquadrati i punti di tale rete è lo ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), gestito e calcolato allo IERS (*International Earth Rotation Service*), sulla base di dati provenienti da diverse tecniche quali DORIS, GPS, LLR, SLR e VLBI (*Altamimi et al., 2002*). Nella versione attuale di tale sistema, lo ITRF2000, coordinate e velocità dei vari punti sono riferite all'epoca 1997.0; le coordinate nelle epoche successive vengono propagate in maniera lineare nel tempo, considerando le velocità costanti. Questo, di fatto, costituisce una limitazione, in quanto non si tiene conto di eventuali deformazioni locali oltre al fatto che l'ipotesi lineare può non essere valida oltre un certo numero di anni.

Tale limitazione è superata dal sistema IGS2000, detto anche IGb00, realizzazione GPS dello ITRF2000 che, oltre ad una soluzione a lungo termine riferita all'epoca 1998.0, fornisce anche le

soluzioni settimanali con le coordinate aggiornate di volta in volta. Tale sistema, di precisione non paragonabile allo ITRF2000, è stato introdotto come supporto alle sole misure GPS, in quanto intrinsecamente più coerente.

Caratteristiche della rete di controllo dell'arco ionico tarantino

La rete, materializzata nel 2002 (Capra et al., 2002; Capra et al., 2003), si sviluppa tra gli affioramenti calcarei del margine meridionale dell'altopiano murgiano e gli horst carbonatici distaccatisi da quest'ultimo attraverso faglie dirette e trascorrenti (figura 1).



Figura 1 – Rete GPS per il controllo delle deformazioni dell'arco ionico tarantino

In particolare, due caposaldi sono ubicati lungo il margine meridionale del tavolato calcareo murgiano, due sono siti sull'horst di Crispiano-Statte, separato dall'altopiano murgiano dalla depressione tettonica dove sono ubicati Grottaglie e Montemesola. Ulteriori due capisalidi sono ubicati su horst carbonatici più meridionali.

La rete si sviluppa su una superficie di circa 350 km². I punti della rete sono stati materializzati con centramento forzato e, a tal fine, sono stati realizzati dei capisalidi specifici al tipo di rilievo. È stato scelto un centramento forzato senza ausili di messa in stazione perseguendo la verticalità del vertice in fase di installazione dello stesso, in modo da garantire un più facile ed immediato posizionamento del punto di misura; ciò è giustificato anche dalle finalità del rilievo, atto a definire deformazioni ipotizzate sub-centimetriche.

Cinque dei capisalidi sono infissi su roccia calcarea affiorante, in modo da non risentire di eventuali deformazioni in situ di copertura sedimentaria. L'ultimo caposaldo è invece installato sul tetto di un edificio, la Facoltà di Ingegneria di Taranto. Nel corso del 2005, tale punto è stato spostato a causa di un cedimento strutturale nella zona in cui era situato il caposaldo.

Tutti i punti sono stati materializzati in posizioni lontane da possibili fonti di disturbo del segnale, quali superfici riflettenti o alberi, che possono dare origine al fenomeno del *multipath*, nonché ad installazioni elettriche.

La periodicità delle misure è stata preliminarmente stabilita con cadenza annuale. Nelle prime tre campagne (2002-2004) si sono effettuate 2 sessioni di durata variabile tra 3 e 4 ore, nell'ultima le sessioni sono state 3, con durata tra 6 e 12 ore. La frequenza è di 4 acquisizioni al minuto. La strumentazione consta di ricevitori GPS a doppia frequenza ed antenne *choke ring*.

Strategia di elaborazione

Non avendo fatto, sin dalla prima campagna di misure, un inquadramento della rete, l'elaborazione si è sviluppata in due fasi distinte:

1. emanazione delle coordinate dei punti della rete da una stazione di cui siano note le coordinate ITRF2000, nel caso specifico Matera (stazione appartenente alla rete globale IGS ed alle sottoreti EUREF e Geodaf), al fine di controllare eventuali spostamenti assoluti dei punti;
2. elaborazione dei soli punti della rete per analizzare eventuali movimenti relativi.

Nella prima fase si è scelto un sistema di basi colleganti Matera ad ogni punto della rete. Per la fase successiva, il *Bernese GPS Software v4.2*, software utilizzato per l'elaborazione dei dati, contempla, tra le altre metodologie di scelta automatica delle basi, la OBS-MAX, il cui parametro discriminante è il numero di osservazioni contemporanee tra due punti; in effetti, questo sarebbe il criterio di scelta più opportuno, a condizione che le distanze tra i punti e la durata delle sessioni di misura su ogni punto siano paragonabili. Nel caso in esame, però solo la prima condizione è soddisfatta, per cui si è adottato un set di basi indipendenti, diverso per ogni sessione, dettato più che altro da criteri di robustezza delle reti.

Parametro importante per l'elaborazione è l'angolo di cut-off. In generale, le osservazioni provenienti da satelliti bassi sull'orizzonte sono sicuramente più affette da disturbo ionosferico e multipath; d'altra parte esse contribuiscono ad una migliore stima della quota di un punto. Infatti, le stazioni permanenti di reti quali IGS ed EUREF contemplano un angolo di cut-off pari a 5°. Nella rete in esame, però, essendo i punti posti direttamente sul suolo, si è dovuto impostare un angolo di 15° per garantire la visibilità del segnale anche in presenza di ostacoli dell'altezza di 6 m (alberi, edifici) ad una distanza minima di 22 m.

Risultati delle campagne di misura

Per ogni campagna di misura, è stato fatto un confronto tra le coordinate risultanti dai due processi di elaborazione successivi, ottenendo che le coordinate di alcuni punti presentano differenze anche di ordine centimetrico e, in particolare, ciò avviene per le prime 3 campagne, caratterizzate, come scritto in precedenza, da un numero di sessioni ed una durata delle stesse inferiore rispetto all'ultima campagna (tabella 2). E' probabile, quindi, che la durata delle sessioni sia troppo breve in relazione alle distanze tra i punti della rete.

	2002			2003			2004			2005		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
PICCOLI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FACOLTA	-0,004	-0,003	-0,001	0,011	0,004	0,007	-0,001	0,001	-0,002	0,003	0,001	0,003
FORTUNA	0,002	-0,002	0,003	0,006	0,003	0,004	-0,014	-0,003	-0,015	0,001	0,001	0,000
ROCCAFO	-0,002	-0,002	0,000	0,012	0,005	0,008	-0,009	-0,002	-0,010	0,000	0,000	0,000
STATTE	-0,002	0,000	0,002	0,005	0,001	0,003	-0,009	-0,002	-0,009	-0,001	0,000	0,000
SANPAOL	0,010	0,002	0,010	0,003	0,002	0,003	0,004	0,001	0,005	-0,003	-0,001	-0,002

Tabella 2 – Confronto tra le coordinate risultanti dai due processi di elaborazione

Le coordinate restituite nei processi di elaborazione risentono sia di un eventuale spostamento del punto che degli effetti rototraslativi del sistema di riferimento adottato. Un confronto diretto delle coordinate non permetterebbe, quindi, di ottenere informazioni sulla dinamica della rete; i vari set di coordinate ottenuti, devono quindi essere riferiti alla stessa epoca per poter essere confrontabili. Lo strumento matematico che consente di effettuare questa operazione è la *trasformazione a 7 parametri*, contemplata dallo stesso *Bernese GPS Software*. I residui, che potrebbero rappresentare lo spostamento in un sistema di coordinate locali (Nord, Est, Up), sono riportati in tabella 3.

Si è visto che, effettuando la trasformazione con tutti i punti, si ottengono residui maggiori rispetto alla precisione del metodo, in particolare sulle stazioni FACOLTA e SANPAOL; escludendo tali stazioni (flag "M") si vede che i residui sulle altre diventano trascurabili. Sembrerebbe, quindi, che i

residui evidenziati in grassetto, superiori alla precisione del metodo, siano indicatori di movimento (si ricordi che nel 2005 la stazione FACOLTA è stata spostata rispetto alla posizione occupata in passato).

	2002/2003			2002/2004			2002/2005			FLAG
	N [m]	E [m]	U [m]	N [m]	E [m]	U [m]	N [m]	E [m]	U [m]	
PICCOLI	-0,003	-0,003	0,000	0,001	-0,004	0,003	0,000	-0,003	0,002	
FACOLTA	-0,007	0,002	0,056	-0,021	-0,006	0,089	-59,612	-133,587	0,796	M
FORTUNA	-0,004	0,003	0,000	-0,003	-0,003	-0,002	-0,005	-0,001	-0,001	
ROCCAFO	0,004	-0,001	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	
STATTE	0,003	0,001	0,000	0,003	0,004	-0,005	0,002	0,002	-0,003	
SANPAOL	0,005	-0,004	0,050	-0,005	-0,007	0,027	-0,003	-0,001	0,051	M

Tabella 3 – Residui della trasformazione di Helmert (epoca di riferimento: 2002). In grassetto i valori superiori alla precisione del metodo

D'altra parte, però, utilizzando tali stazioni come punti doppi, si ottengono residui decisamente elevati sulle altre, come evidenziato in tabella 4, in contrasto con la conclusione precedente.

	2002/2003			2002/2004			FLAG
	N	E	U	N	E	U	
PICCOLI	-0.001	0.003	0.000	0.002	0.004	0.000	
FACOLTA	-0.003	-0.001	0.000	-0.004	0.002	0.000	
FORTUNA	-0.006	-0.005	-0.123	0.021	-0.008	-0.103	M
ROCCAFO	0.008	-0.008	-0.099	0.027	0.009	-0.136	M
STATTE	0.007	0.002	-0.026	0.014	0.014	-0.065	M
SANPAOL	0.004	-0.002	0.000	0.002	-0.006	0.000	

Tabella 4 – Residui della trasformazione di Helmert

Altro strumento per l'analisi di eventuali movimenti relativi tra i vari punti della rete è la variazione della lunghezza delle basi tra due punti, come riportato in tabella 5.

		02/03 [m]	02/04 [m]	02/05 [m]			02/03 [m]	02/04 [m]	02/05 [m]
MATE	FACOLTA	-0,003	0,002	112,375	PICCOLI	FACOLTA	-0,001	-0,015	11,406
MATE	FORTUNA	0,001	0,005	0,003	PICCOLI	FORTUNA	0,002	0,001	-0,005
MATE	PICCOLI	0,006	0,002	0,008	PICCOLI	ROCCAFO	0,012	-0,001	-0,001
MATE	ROCCAFO	0,004	0,001	0,002	PICCOLI	STATTE	0,007	0,001	0,001
MATE	SANPAOL	0,006	0,008	0,005	STATTE	SANPAOL	0,006	0,003	-0,003
MATE	STATTE	0,001	-0,002	0,004	FORTUNA	ROCCAFO	0,007	0,010	0,009
					ROCCAFO	STATTE	0,006	0,001	0,000
					STATTE	FACOLTA	-0,005	-0,006	62,958
					STATTE	SANPAOL	0,005	0,015	0,005
					SANPAOL	FORTUNA	-0,006	0,000	-0,002

Tabella 5 – Variazione della lunghezza delle basi

Si vede che, ad eccezione delle basi in cui uno dei due estremi è il punto FACOLTA, da non considerare per i motivi spiegati in precedenza, la lunghezza è sempre un valore oscillante, per cui non è possibile trarre informazioni su eventuali movimenti da tali dati. Solo la base FORTUNA – ROCCAFO sembra avere una tendenza alla crescita, ma la differenza tra due anni successivi è troppo piccola per poter trarre tale conclusione.

Inquadramento nel sistema ITRF2000

Con la campagna di misure del 2005 la rete è stata anche inquadrata nel sistema ITRF2000. A tal

fine, sono state scelte le stazioni permanenti riportate in tabella 6. La scelta non è stata immediata a causa della scarsa diffusione di stazioni nelle vicinanze e, soprattutto, di stazioni di cui fossero note le coordinate ITRF2000.

DOMES NB	SITE NAME	ID	X [m]	Y [m]	Z [m]
11401M001	BUCAREST	BUCU	4093760,889	2007793,864	4445129,972
12725M003	CAGLIARI	CAGL	4893378,829	772649,790	4004182,161
12706M002	LAMPEDUSA	LAMP	5073164,768	1134512,581	3683181,147
12734M008	MATERA	MATE	4641949,549	1393045,432	4133287,454
12741M001	VENEZIA	VEVE	4379724,785	957495,896	4521605,255

Tabella 6 – Coordinate ITRF2000 (epoca: 15 giugno 2005) delle stazioni permanenti scelte per l'inquadramento della rete (fonte ITRF web site <http://itrf.ensg.ign.fr>)

Per l'elaborazione, si è ritenuto fosse opportuno adottare lo schema rappresentato in figura 7, dettato da criteri di robustezza delle reti. La lunghezza delle basi lunghe varia da circa 500 km a circa 800 km, mentre MATE dista dalla rete di 40-60 km. Si sono effettuate due sessioni della durata di 12 ore.

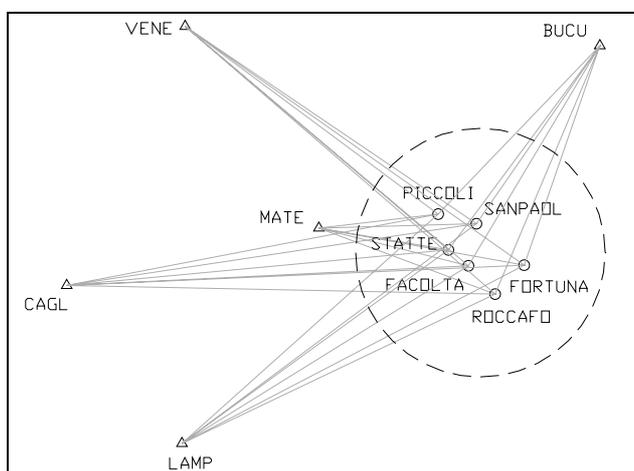


Figura 7 – Schema di rete adottato per l'inquadramento. Per ragioni di visualizzazione dell'intera rete, le stazioni nel riquadro sono riportate in scala diversa rispetto alla restante parte

I risultati dell'elaborazione, in termini di coordinate e scarti quadratici medi, così come restituiti dai software, sono riportati in tabella 8.

	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]
FACOLTA	4635800,156	1442401,646	4122685,763	0,0036	0,0005	0,0006
PICCOLI	4628103,540	1430032,181	4136123,556	0,0034	0,0002	0,0023
FORTUNA	4630524,663	1460007,771	4122519,766	0,0001	0,0013	0,0020
ROCCAFO	4639232,896	1452436,989	4115430,271	0,0006	0,0012	0,0020
SANPAOL	4626561,570	1442654,643	4133441,264	0,0036	0,0010	0,0041
STATTE	4634416,660	1435185,535	4126880,093	0,0055	0,0035	0,0076

Tabella 8 – Coordinate ITRF2000 dei punti della rete di controllo

Conclusioni

Come si evince dai risultati delle varie elaborazioni, è difficile dare una interpretazione univoca ai dati ottenuti. Spesso, infatti, questi presentano numerose disomogeneità e talvolta sono tra loro contrastanti. La spiegazione a cui si è giunti è che, come si è già avuto modo di supporre, le sessioni di misura effettuate nelle prime tre campagne di misura siano troppo brevi in relazione alle distanze

caratteristiche della rete. Si ritiene, inoltre, che a tali distanze, la semplice emanazione, piuttosto che un rigoroso inquadramento, possa introdurre delle disomogeneità nei dati.

In ogni caso, anche in assenza delle disomogeneità di cui si è scritto, nell'individuazione di eventuali movimenti, il condizionale sarebbe d'obbligo in quanto, in un controllo delle deformazioni crostali condotto con misure non continue nel tempo, solo lunghe serie temporali possono fornire precise indicazioni sulla dinamica della zona oggetto di studio.

L'inquadramento della rete nel sistema ITRF2000, inoltre, fornirà, a partire dalla prossima campagna di misure, un ulteriore strumento di controllo per l'analisi di eventuali movimenti dei punti.

Bibliografia

Benazzo E., Biagi L., Manzino A., Pesenti M., Roggero M., 2005, *Reti GPS permanenti su scala regionale in Piemonte, inquadramento geodetico e strategie d'analisi*, Atti del Convegno SIFET, Palermo 2005;

Belluomini P., Biagi L., Sansò F., Scuratti M., Novembre C., Laffi R., 2004, *Il servizio di posizionamento della regione Lombardia: stato di avanzamento*, Atti del Convegno ASITA, pp. 357-362, Roma 2004;

Capra A., Costantino D., Galeandro A., 2003, *Analisi preliminare delle deformazioni dell'area dell'arco ionico tarantino*, Atti del Convegno ASITA, pp. 585-590, Verona 2003;

Capra A., Costantino D., Simeone V., 2002, *Controllo delle deformazioni crostali dell'area del Mar Piccolo e delle Murge*, Atti del Convegno ASITA, pp. 631-636, Perugia 2002;

Altamimi Z., Sillard P., Boucher C., 2002, *ITRF2000: a new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science application*, J. Geophys. Res. 107;

Turcotte D. L., Schubert G., 2001, *Geodynamics*, Second Edition, Cambridge University Press, 456 p.;

Ranalli G., 1995, *Rheology of the Earth*, Second Edition, Chapman and Hall, 413 p.;

ITRF web site <http://itrf.ensg.ign.fr>