

INTERFEROMETRIA – RILIEVI GROUND SAR



GRUPPO DI LAVORO ITCOLD

Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili futuri sviluppi

Alberto Masera (Cesi)
Francesco Birindelli (Studio Pietrangeli)
Morena Colli (CVA)
Francesco Sainati (Edison)
Paolo Valgoi (AEM)

dicembre 2007

INDICE

1.	Sommario	3
2.	Generalità	3
3.	Vantaggi	4
4.	Limiti e svantaggi	5
5.	Campi di applicazione	5
6.	Esempio di applicazione	6
7.	Validazione dei risultati	11
8.	Conclusioni	21
9.	Riferimenti bibliografici	22

1. Sommario

Il presente documento è stato realizzato nell'ambito del gruppo di lavoro ITCOLD che ha per tema "*Metodi innovativi per il monitoraggio delle dighe e dei versanti e possibili sviluppi futuri*" e si riferisce ad una applicazione della tecnologia SAR da terra per il monitoraggio strutturale di una diga Edison.

L'obiettivo della sperimentazione è di controllarne la fattibilità e la precisione mediante il confronto con i valori delle misure topografiche periodicamente eseguite sulla diga anche in relazione ad un possibile impiego futuro come monitoraggio strutturale delle dighe a fianco delle tradizionali misure di controllo (collimazioni, pendoli ...).

Il documento non si propone quindi di entrare nel dettaglio della metodologia dal punto di vista teorico, ma contiene solo qualche accenno sul principio di funzionamento. Per gli approfondimenti del caso si rimanda pertanto alla letteratura specializzata di cui si trova indicazione nei riferimenti bibliografici.

2. Generalità

Il sistema interferometrico radar da terra (GBInSAR in seguito GROUND SAR) si fonda sullo stesso principio dell'interferometria radar satellitare utilizzando come supporto, anziché i satelliti in orbita attorno alla terra, un'apparecchiatura installata a terra in posizione idonea rispetto alla struttura da monitorare. Si basa pertanto su di un'analisi spettrale del segnale di emissione e ricezione di un'onda elettromagnetica che consente di misurare la distanza (o la variazione della distanza) fra la sorgente ed il bersaglio radar.

Il sistema utilizza la tecnica SAR (Synthetic Aperture Radar) che consente di ottenere immagini ad elevata risoluzione spaziale, senza bisogno di intervenire drasticamente sulle dimensioni fisiche dell'antenna.

Il sensore radar si muove lungo una direzione rettilinea puntando in direzione perpendicolare rispetto al moto ed emette segnali elettromagnetici a microonde (di lunghezza tipicamente compresa fra 1 e 100 mm) verso l'obiettivo ad opportuni intervalli spaziali e temporali e ne registra il segnale retrodiffuso.

Ogni pixel, che rappresenta il più piccolo elemento di risoluzione dell'immagine, contiene informazioni sia in termini di ampiezza radiometrica, legata alla riflettività degli oggetti, sia in termini di fase. Le dimensioni dei pixel sono legati alla distanza fra radar e bersaglio.

L'*interferometria differenziale* consente, attraverso il confronto fra le fasi di due successive acquisizioni effettuate a distanza di tempo, di valutare lo spostamento dei punti della scena monitorata lungo la direzione congiungente sensore-bersaglio detta *range* o anche *line of sight* (LOS).

In pratica, rilevando la differenza di fase fra pixel corrispondenti nelle due immagini successive è possibile misurare gli spostamenti avvenuti sulla struttura.

I dati memorizzati vengono elaborati fino a produrre un'immagine la cui risoluzione spaziale dipende dalla distanza fra la postazione dello strumento e l'obiettivo da monitorare.

La precisione della misura è pari ad una frazione della lunghezza d'onda del segnale elettromagnetico emesso e può raggiungere in alcuni casi valori di qualche decimo di millimetro.

3. Vantaggi

L'opportunità dei sistemi GROUND SAR di installare nel punto più opportuno l'apparecchiatura di misura in una postazione fissa in vicinanza dell'obiettivo consente, rispetto all'interferometria satellitare, una maggiore libertà di azione, adattabilità e ottimizzazione per una determinata applicazione, sia in termini di parametri orbitali quali frequenza di acquisizione su una determinata area, sia di parametri strumentali quali angolo di incidenza e frequenza di osservazione, che per i sensori satellitari sono rigidamente fissati.

Rispetto al monitoraggio satellitare si possono misurare spostamenti orizzontali ed evitare le deformazioni prospettiche legate alla conformazione del terreno e all'angolo di puntamento, di circa 23° (off-nadir), del sensore radar rispetto alla verticale.

In particolare sono meno influenti le distorsioni tipiche dell'interferometria satellitare:

- *foreshortening* che si verifica quando gli oggetti da rilevare sono disposti su un terreno con pendenza pari all'angolo di off-nadir.
In questo caso gli oggetti risulterebbero tutti alla stessa distanza dal radar e quindi verrebbero rappresentati nella stessa cella di risoluzione senza possibilità di discriminare fra oggetti anche molto distanti fra loro.
- *Layover* che si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo di off-nadir determinando una non corretta interpretazione del segnale e una corrispondente distorsione dell'immagine acquisita.
(In realtà questo fenomeno si è verificato anche nell'applicazione con postazione radar a terra a causa della particolare forma della struttura monitorata ed è stato risolto utilizzando un modello DEM di supporto).
- *shadowing* che si verifica quando le zone bersaglio non possono essere raggiunte dal segnale radar perché schermate da altri oggetti

Nel caso di sensori basati a terra per applicazioni di interferometria differenziale risulta tecnicamente più semplice realizzare la condizione in cui l'acquisizione viene ripetuta esattamente nella stessa posizione.

Le principali limitazioni riguardano in particolare i limiti sull'estensione dell'area coperta, che difficilmente possono essere superiori a qualche chilometro quadrato e il fatto che l'applicabilità dipende in gran parte dalla possibilità di individuare un buon punto di osservazione.

Per quanto riguarda il primo aspetto non vi sono in principio limitazioni ad estendere il range di operazione del sistema, a patto che la potenza emessa possa essere opportunamente aumentata. Contrariamente ai sistemi SAR su aereo o satellite però, nei casi di sistemi a terra la risoluzione spaziale ritorna ad essere parzialmente dipendente dalla distanza e, pertanto, a qualche chilometro la perdita di risoluzione può essere sensibile e vanificare uno dei principali vantaggi.

Rispetto al monitoraggio tradizionale questa applicazione offre i seguenti vantaggi:

- non richiede l'accesso all'area da monitorare, né l'installazione di bersagli
- è indipendente dai punti della struttura da rilevare
- è poco influenzato dalle condizioni meteorologiche e dalle condizioni di illuminazione

- è in grado di generare delle mappe estese di spostamento dell'oggetto monitorato anziché restituire gli spostamenti di un limitato numero di punti
- è in grado di operare anche a grande distanza dall'obbiettivo (centinaia di metri)

4. Limiti e svantaggi

I principali limiti della tecnologia sono i seguenti:

- *Ambiguità di fase*
E' legato al principio stesso su cui si basa la tecnologia, vale a dire la ciclicità delle misure di fase del segnale elettromagnetico.
L'interferometria SAR permette di stimare con precisione sub-millimetrica, pari ad una frazione della lunghezza d'onda elettromagnetica, le variazioni di distanza fra il sensore ed il bersaglio, ma non consente di valutare spostamenti corrispondenti a multipli di mezza lunghezza d'onda che potrebbero essere confusi con gli spostamenti nulli.
Questa anomalia viene superata utilizzando particolari algoritmi detti *phase unwrapping* ("srotolamento") che consentono di stimare il numero intero di cicli da aggiungere alla fase per ottenere il valore reale, sempre che sia verificata la condizione che la differenza fra gli spostamenti di pixel adiacenti sia inferiore a mezza lunghezza d'onda.
- Possibilità di misurare gli spostamenti della struttura solo lungo la direzione congiungente sensore-bersaglio (LOS).
- *Decorrelazione*
Questo fenomeno può essere causato da:
 - forti variazioni nel tempo della riflettività della superficie del bersaglio
 - spostamenti di tipo caotico (tipicamente in presenza di vegetazione e specchi d'acqua)e si verifica talvolta nel caso di acquisizioni effettuate dopo lunghi intervalli temporali.
Si rileva in questo caso un rumore di fondo sovrapposto alla fase interferometrica legata agli spostamenti che può causare una perdita di precisione delle misure e nei casi peggiori l'impossibilità di effettuare la misura stessa.
La mediazione di più immagini SAR consente di ridurre e in qualche caso di eliminare il disturbo.
- Lo strumento ha dimensioni e peso non trascurabili, richiede la realizzazione di un basamento ad hoc e di alimentazione elettrica a 220 V
- Elaborazione e restituzione dei dati piuttosto complessa

5. Campi di applicazione

Per le sue caratteristiche intrinseche il sistema è particolarmente idoneo alle seguenti applicazioni:

- rilevamento di deformazioni di strutture
- rilevamento degli spostamenti di versanti e frane
- creazione di mappe digitali di elevazione del terreno

- in supporto a reti di monitoraggio con strumenti tradizionali
- monitoraggio, in situazioni di emergenza, in “tempo quasi reale” di fenomeni in evoluzione

6. Esempio di applicazione

La tecnologia Ground Sar è stata utilizzata per monitorare gli spostamenti planimetrici della diga del lago Venina di proprietà Edison.

La diga, ubicata a quota 1824,00 m s.l.m. sul torrente omonimo in comune di Piateda (SO), è alta circa 50 m, lunga 175 m e crea un invaso di circa 11 milioni di m³.

E' costituita da otto volte cilindriche in calcestruzzo armato a pieno centro, con generatrice verticale, che si impostano su speroni in calcestruzzo.

Il sistema di monitoraggio della diga comprende tre allineamenti di collimazione in corrispondenza dei vertici delle volte e della testa degli speroni (si veda la figura 7) e due pendoli rovesci installati all'interno della muratura dei due speroni adiacenti alla volta centrale ed ancorati in fondazione.

Le misure sono state eseguite da LiSALab srl che è licenziataria in esclusiva per l'Italia della tecnologia LiSA (Linear Synthetic Aperture radar) che è stata sviluppata dal Centro Comune Ricerche di Ispra della Commissione Europea.

L'apparecchiatura di misura è stata montata su un basamento in acciaio appositamente realizzato, secondo le specifiche fornite da LiSALab, ad una distanza di circa 170 m a valle della diga in una posizione per quanto possibile centrale rispetto all'asse della diga in modo tale da soddisfare i seguenti requisiti fondamentali:

- Buona visione dell'area da monitorare
- Angolo di incidenza locale medio tale da garantire una buona retrodiffusività del segnale
- Linea di vista (LOS) il più possibile coincidente con la direzione dello spostamento da misurare (direzione monte-valle)
- Compromesso fra una buona visione d'insieme della diga e una buona visibilità radar nei punti di interesse per il rilievo degli spostamenti

Il sistema di misura è schematicamente costituito da un'antenna trasmittente che invia il segnale a microonde verso il bersaglio e da una seconda antenna, ricevente, che acquisisce il segnale retrodiffuso consentendo di effettuare la vera e propria misura.

La coppia di antenne muovendosi lungo una traiettoria rettilinea, definita dal binario posto sul basamento, simula di fatto un'antenna sintetica di dimensioni molto maggiori di quelle fisiche.

La lunghezza dell'apertura sintetica è di 2,60 m.

L'ubicazione e le caratteristiche della postazione di misura sono rappresentate nelle figure 1 e 2.

Le misure radar sono effettuate ad opportuni intervalli spaziali acquisendo le immagini con frequenza temporale di circa 13 minuti.

Le caratteristiche principali del sistema di misura sono i le seguenti:

- Massima distanza dell'area rilevata: 200 m
- Minima distanza dell'area rilevata: 110 m

- Risoluzione teorica in range: 0,30 m
- Risoluzione teorica in azimuth a 100 m: 0,33 m
- Risoluzione teorica in azimuth a 200 m: 0,66 m
- Lunghezza d'onda elettromagnetica λ 17,4 mm
- Precisione delle misure: +/- 0,4 mm (immagini non mediate)
+/- 0,3 mm (immagini mediate)
- Frequenza di scansione: 13 min.

La prima campagna di misure è stata eseguita dal 7 al 13 dicembre 2004 allo scopo di verificare la fattibilità del sistema, valutare la precisione delle misure e determinare la misura di zero per le successive campagne previste con frequenza semestrale.

Le successive campagne di misura sono state effettuate alle seguenti date:

- dal 26 luglio al 1 agosto 2005 (2^a campagna)
- dal 14 al 19 dicembre 2005 (3^a campagna)
- dal 31 luglio al 11 agosto 2006 (4^a campagna)
- dal 27 novembre al 7 dicembre 2006 (5^a campagna)
- dal 20 luglio al 2 agosto 2007 (6^a campagna)

Le evidenze emerse durante l'esecuzione delle misure hanno consentito di formulare le seguenti considerazioni:

- La presenza della neve, che non riflette in maniera stabile le onde elettromagnetiche, sulla superficie inclinata degli speroni della diga, durante le campagne invernali, e della vegetazione nelle zone circostanti la diga, durante le campagne estive, causa una locale perdita di coerenza nelle immagini SAR. Per le porzioni di diga influenzate da questi fenomeni non è pertanto possibile ottenere l'interferogramma differenziale e di conseguenza valutare gli spostamenti relativi.
- La posizione dello strumento causa nelle immagini radar piane un effetto di distorsione e compressione delle reali dimensioni delle volte (si vedano le figure 3 e 4).
La volta centrale è affetta dal fenomeno di layover a causa della differente distanza fra la postazione del sensore e i diversi punti della parete verticale. Il coronamento della diga, che costituisce l'obiettivo principale della campagna di misure, non è però soggetto a questo problema.
Le volte laterali non risentono invece dell'effetto layover ma solo della compressione.
La distorsione dell'immagine è stata comunque corretta utilizzando un modello digitale della diga.
È bene notare che la ricostruzione dell'energia retrodiffusa, o in altri termini la focalizzazione dell'immagine, è bidimensionale e viene di solito effettuata su un piano arbitrariamente scelto. L'immagine che risulta è la proiezione in due dimensioni di uno scenario tridimensionale ed è pertanto affetta da deformazioni di cui si deve tener conto nell'interpretazione di risultati.
- La presenza degli speroni n° V e VI produce alcune "zone d'ombra" sulle volte adiacenti (n° 4 e 6).

- La curvatura delle volte produce un effetto “multipath” che genera degli artefatti. Questo fenomeno è dovuto alle ripetute riflessioni dell’onda elettromagnetica contro la superficie cilindrica della diga prima di essere acquisita dall’antenna ricevente provocando un ritardo nella stima del tempo di volo e quindi la creazione di una immagine fittizia ad una distanza superiore rispetto a quella reale
- La precisione delle misure si è confermata di circa 0,4 mm

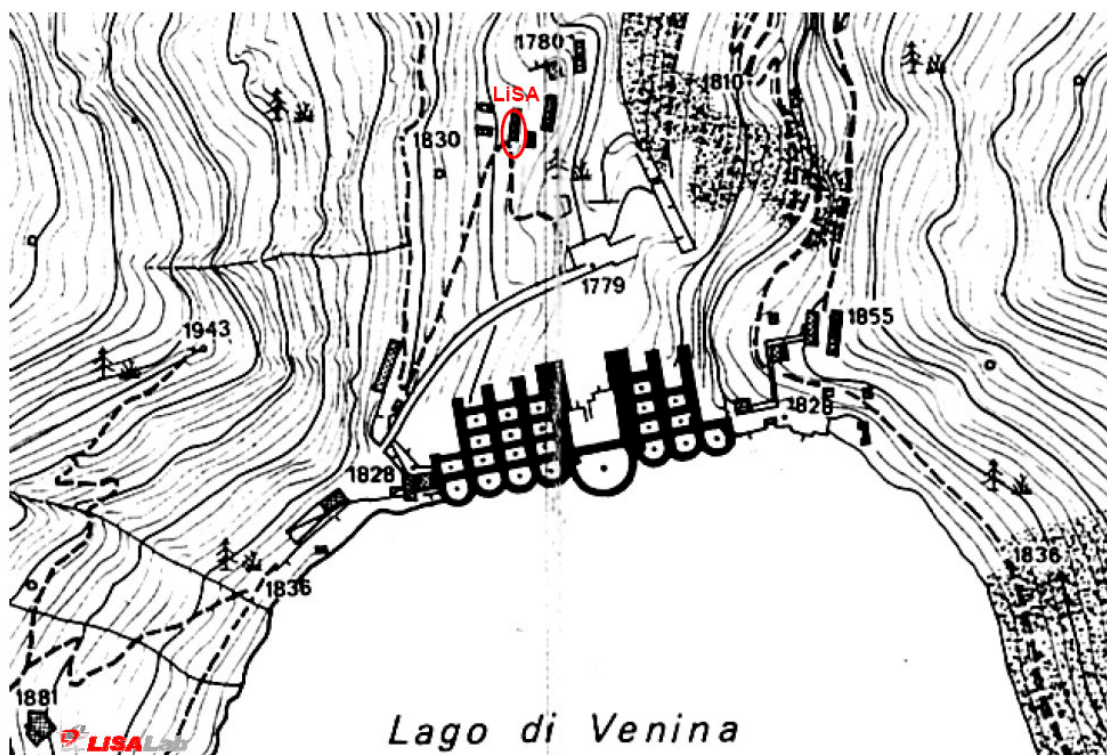
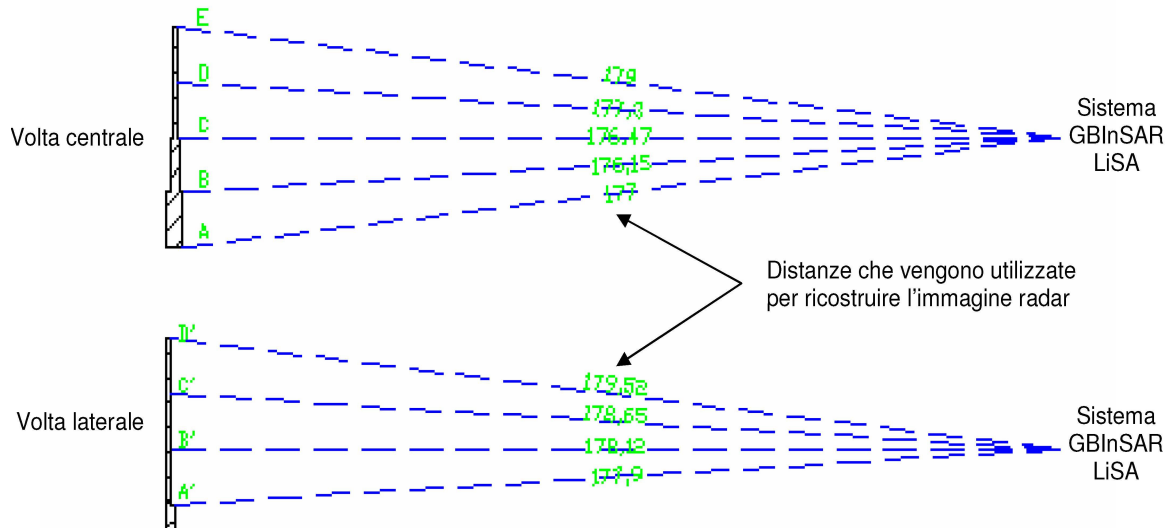
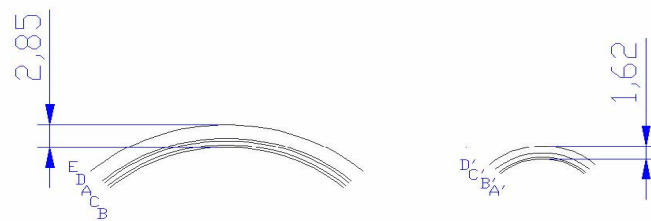


Figura 1 – ubicazione della postazione di misura



Figura 2 – postazione di misura


Figura 3 - Geometria di acquisizione

Figura 4 - Rappresentazione nelle immagini radar

L'utilizzo di un modello di elevazione digitale (DEM) della diga realizzato da CESI - ISMES, su cui è stata effettuata l'elaborazione dei dati, ha consentito di recuperare le distorsioni geometriche presenti nelle immagini SAR planari semplificando notevolmente la comprensione dei risultati.

Sul DEM sono state riferite le mappe di deformazione della diga ottenute dal confronto delle immagini SAR relative a due campagne di misura successive.

Nelle figure 5 e 6 è riportato, a titolo di esempio, il confronto fra le mappe di deformazione rilevate fra le campagne di luglio 2005 e agosto 2006 (con la diga sottoposta ad analoghe condizioni di carico termico e idrostatico) e fra le campagne di agosto e dicembre 2006

La rappresentazione cromatica degli spostamenti va interpretata utilizzando la barra colorata a fianco di ciascuna mappa in cui i valori positivi (allontanamento del bersaglio dal sistema di misura) indicano spostamenti verso monte della struttura e i valori negativi spostamenti verso valle.

Il colore rosso indica spostamenti nulli.

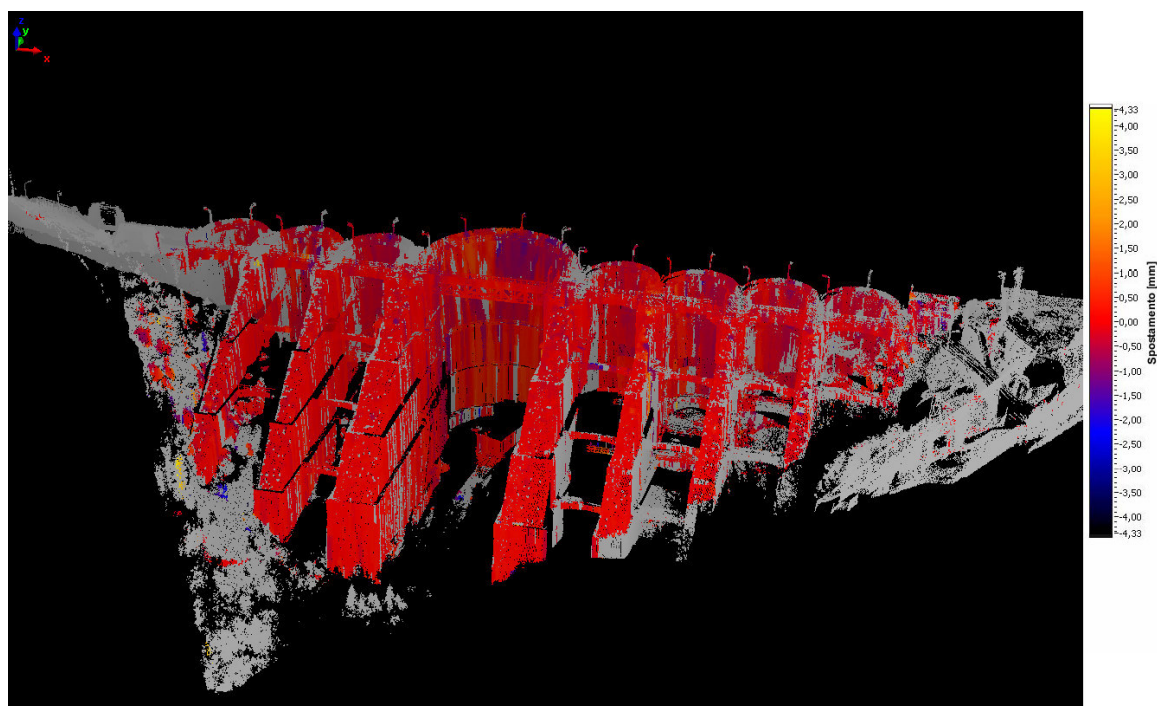


Figura 5 – mappa di deformazione relativa a luglio 2005 – agosto 2006

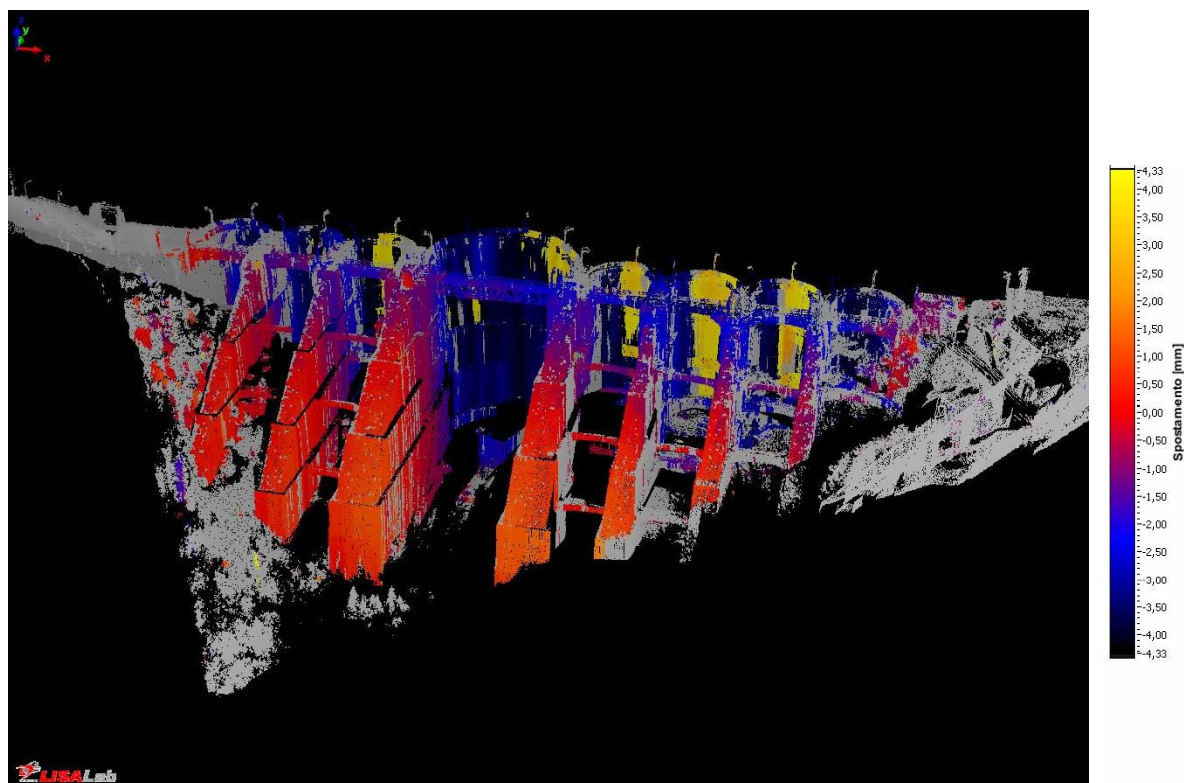


Figura 6 – mappa di deformazione relativa a agosto 2006 – dicembre 2006

Nella figura 6 si osserva chiaramente l'effetto di "ambiguità di fase" di cui sono affette le volte della diga.

Nella scala cromatica i colori giallo e blu scuro sono contigui pertanto, per la ciclicità della fase, se lo spostamento verso l'osservatore eccede il valore di $-1/4 \lambda = -4,33 \text{ mm}$ i successivi valori delle misure ripartono dall'estremità opposta ($+1/4 \lambda = +4,33 \text{ mm}$) determinando l'ambiguità di fase.

7. Validazione dei risultati

Per verificare la validità dei risultati, le misure radar sono state confrontate con le misure dei pendoli installati in corrispondenza dei due speroni centrali della diga (n° IV e V) e con le misure della collimazione delle mire nella sezione in chiave delle voltine e sulla testa degli speroni.

Lo schema delle misure topografiche è rappresentato nella figura seguente.

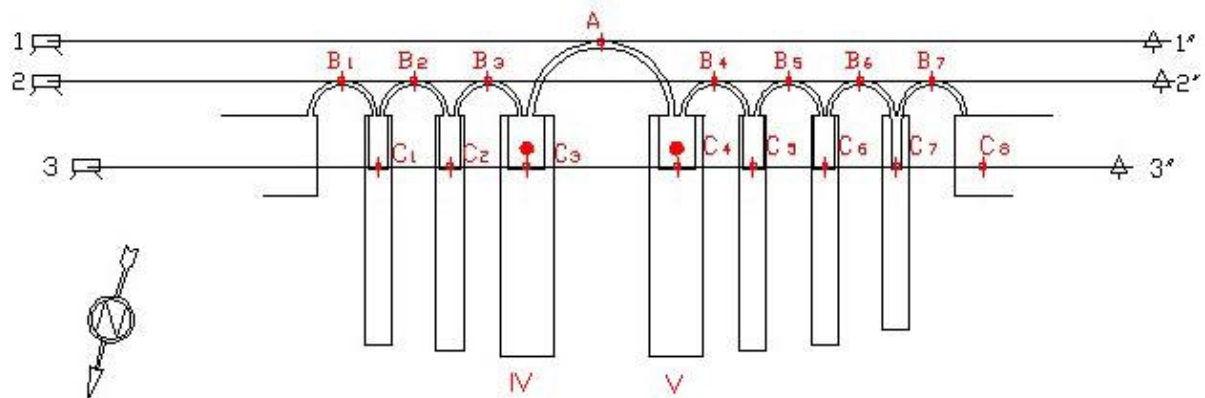


Figura 7 – Schema della collimazione e pendoli

I risultati sono riportati nei grafici delle figure seguenti.

Nella tabella seguente vengono confrontati i valori numerici delle misure dei pendoli con i corrispondenti valori delle misure radar, riferiti tutti alla misura iniziale del 8 dicembre 2004, da cui risultano differenze quasi sempre inferiori a 0,5 mm.

Il valore di zero delle misure coordinometriche è stato ricavato artificialmente interpolando fra le misure del 26 novembre e del 29 dicembre 2004.

Misure pendoli (mm)			Misure radar (mm)			Differenza	
DATA	C3	C4	DATA	C3	C4	$\Delta C3$	$\Delta C4$
30 lug 2005	1,3	1,3	27 lug 2005	1,6	2,1	0,3	0,8
16 dic 2005	0,2	0,2	15 dic 2005	0,7	0,5	0,5	0,3
28 lug 2006	1,4	1,3	5 ago 2006	1,4	1,5	0,0	0,2
23 nov 2006	0,6	0,3	2 dic 2006	0,5	0,1	-0,1	-0,2
25 lug 2007	1,1	1,1	29 lug 2007	1,0	0,9	-0,1	-0,2

	<p style="text-align: center;">INTERFEROMETRIA RILIEVI GROUND SAR</p>	 Pag. 13 di 23

Tabella 1 – Confronto fra le misure dei pendoli e le misure radar

Dall'analisi dei diagrammi cronologici allegati (da fig.8 a fig.24) è possibile osservare che:

- ⇒ Vi è un ottimo accordo fra le misure radar e le misure coordinometriche (peraltro già evidenziato dalla tabella 1)
- ⇒ L'accordo fra le misure della collimazione sulle volte e le corrispondenti misure radar è meno evidente. La frequenza delle misure radar non consente di cogliere sempre i valori estremi degli spostamenti degli archi della diga che invece sono ben rappresentati dalle misure della collimazione
- ⇒ In alcuni casi le misure radar sembrano sottostimare lo spostamento monte-valle delle voltine rispetto a quello misurato dalla collimazione
- ⇒ La corrispondenza fra le misure radar e le misure di collimazione sulla testa degli speroni è molto più scadente.
Le misure radar appaiono meno disperse e più allineate delle analoghe misure topografiche, come si può osservare anche dalle figg. 25 – 26 – 27 in cui è rappresentata la deformata planimetrica della diga.
Questa differenza di comportamento si ritiene imputabile per lo più alle difficoltà operative della collimazione eseguita ad alta quota spesso in condizioni di visibilità non ottimali (fenomeni di rifrazione e convettivi) avallata dal fatto che le maggiori incongruenze si verificano in corrispondenza delle mire più lontane dalla postazione del collimatore.
I valori molto piccoli degli spostamenti misurati rendono inoltre l'errore di misura percentualmente molto rilevante.
- ⇒ La non perfetta coincidenza delle date e il numero ancora troppo limitato delle misure radar disponibili condizionano inevitabilmente le osservazioni non consentendo di formulare un giudizio definitivo

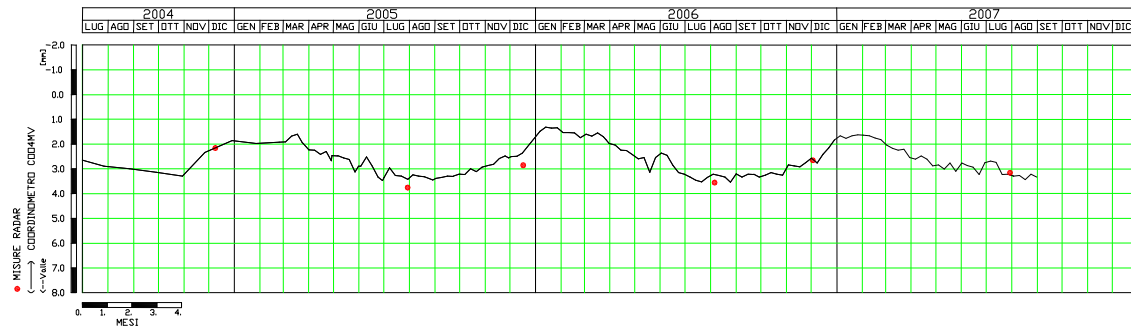


Fig. 8 - Spostamento sperone IV - Confronto fra le misure del pendolo C3 e le misure radar

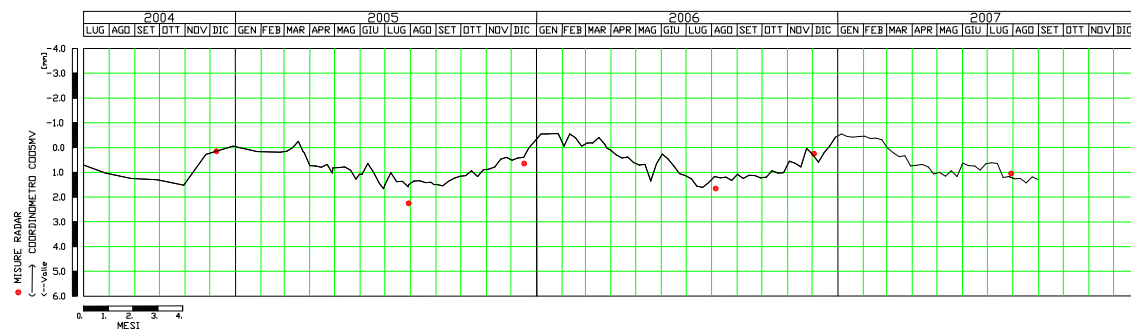


Fig. 9 - Spostamento sperone V - Confronto fra le misure del pendolo C4 e le misure radar

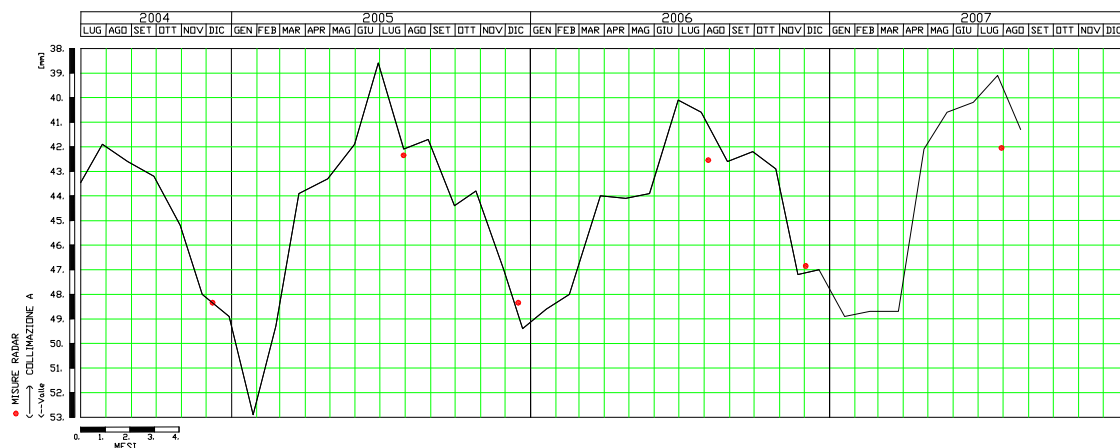


Fig. 10 - Spostamento voltina A - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

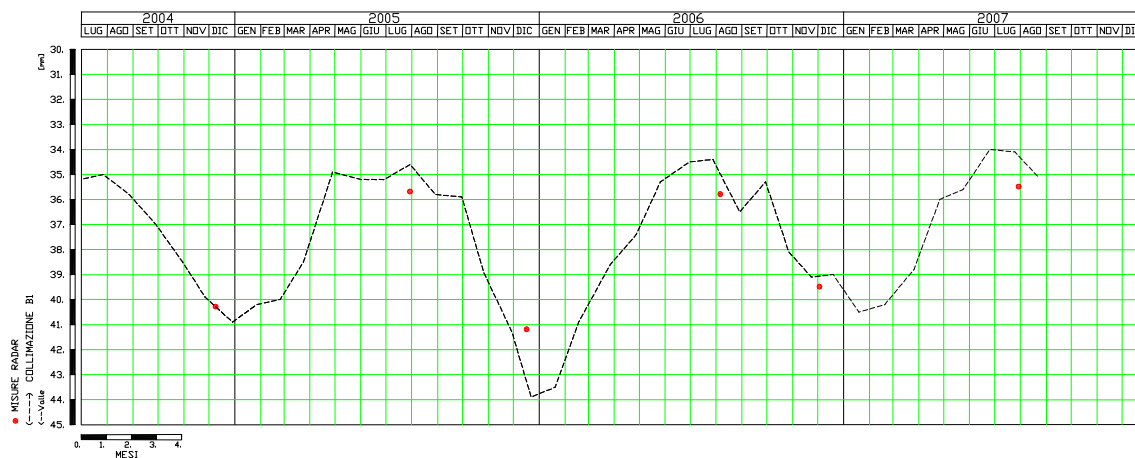


Fig. 11 - Spostamento voltina B1 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

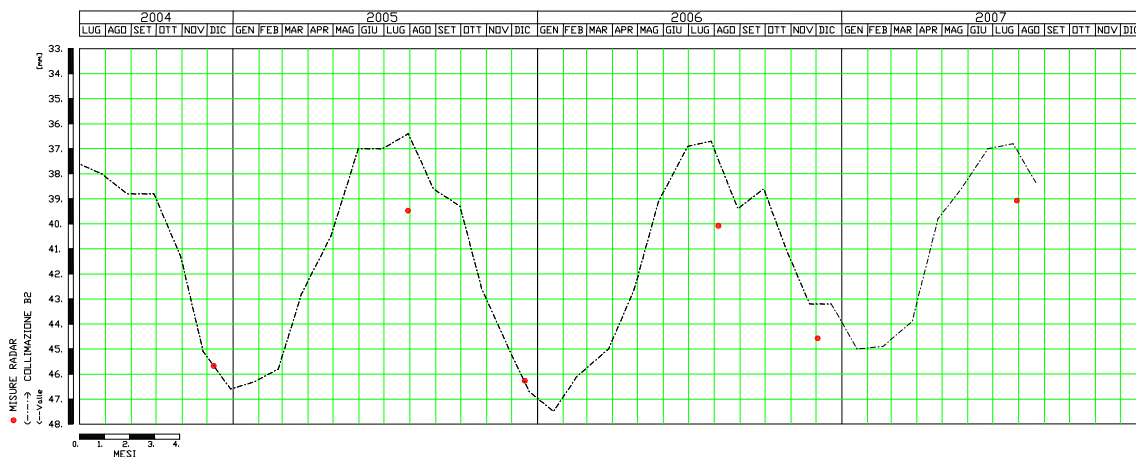


Fig. 12 - Spostamento voltina B2 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

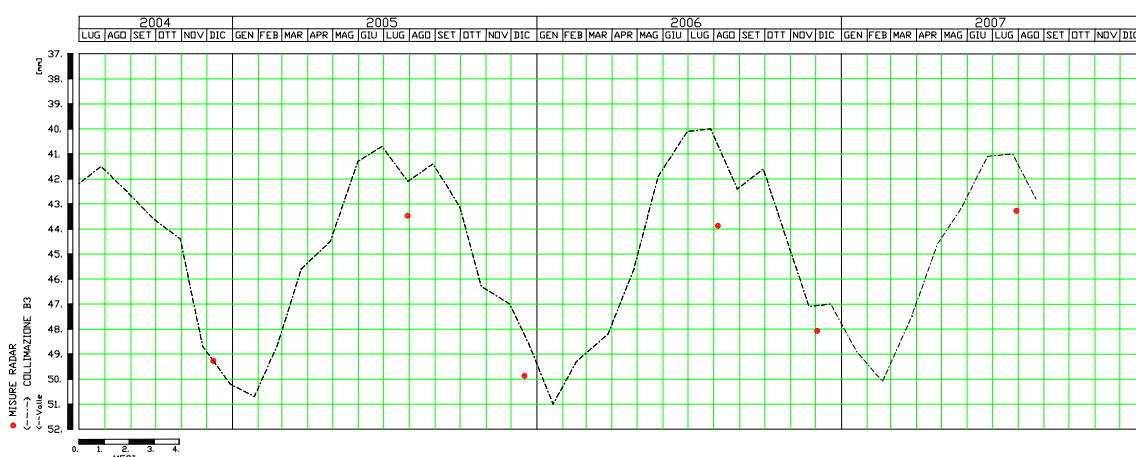


Fig. 13 - Spostamento voltina B3 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

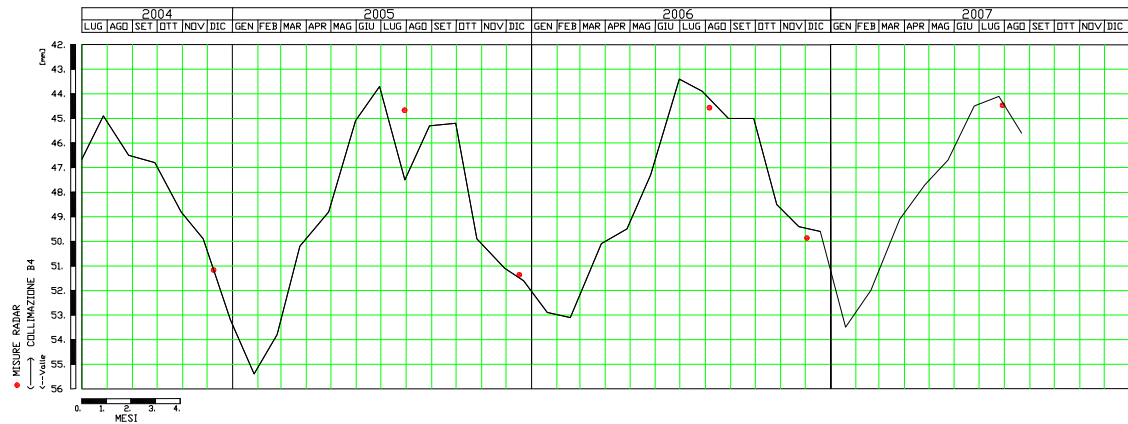


Fig. 14 - Spostamento voltina B4 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

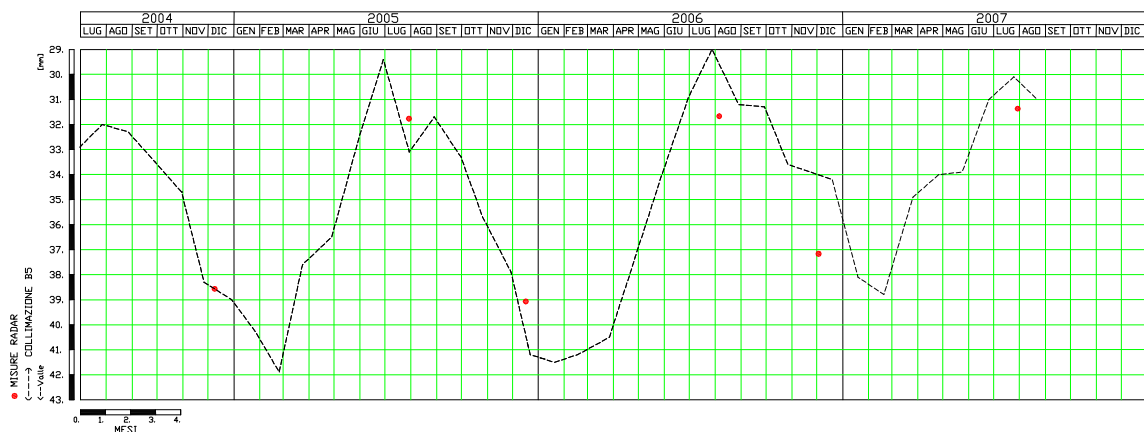


Fig. 15 - Spostamento voltina B5 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

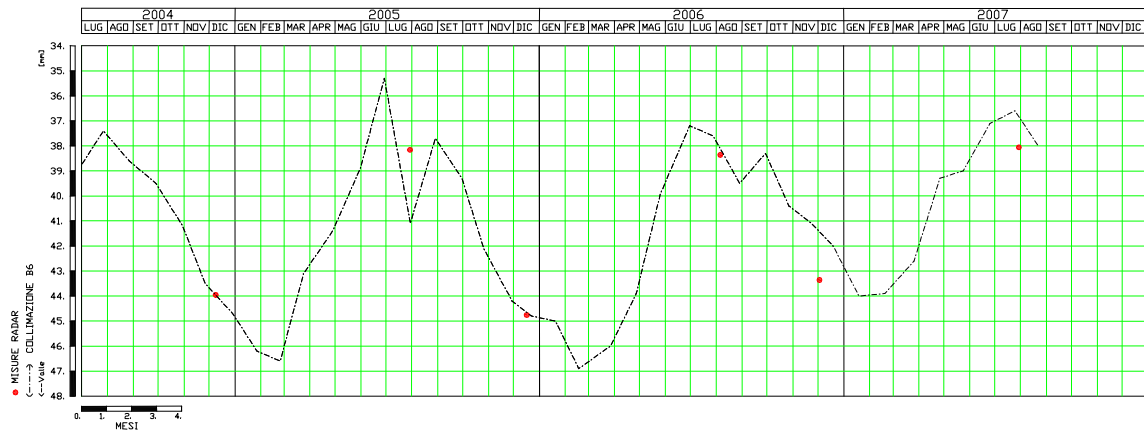


Fig. 16 - Spostamento voltina B6 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

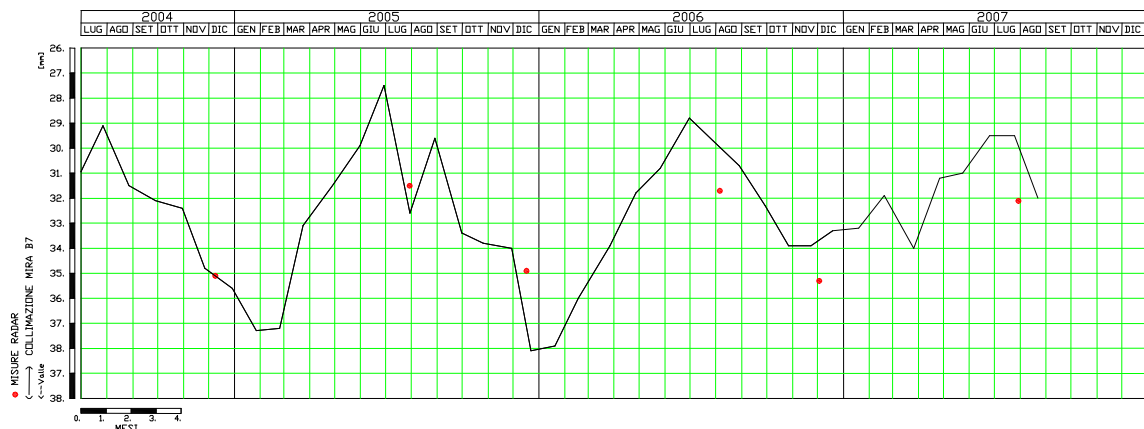


Fig. 17 - Spostamento voltina B7 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

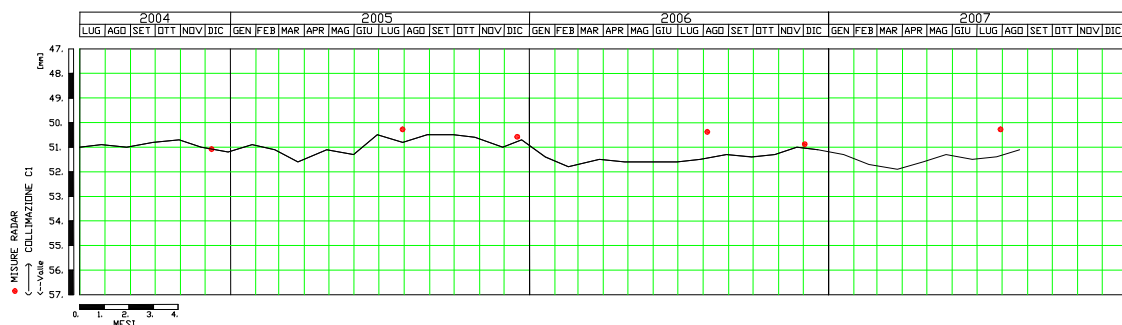


Fig.18 – Spostam. sperone C1 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

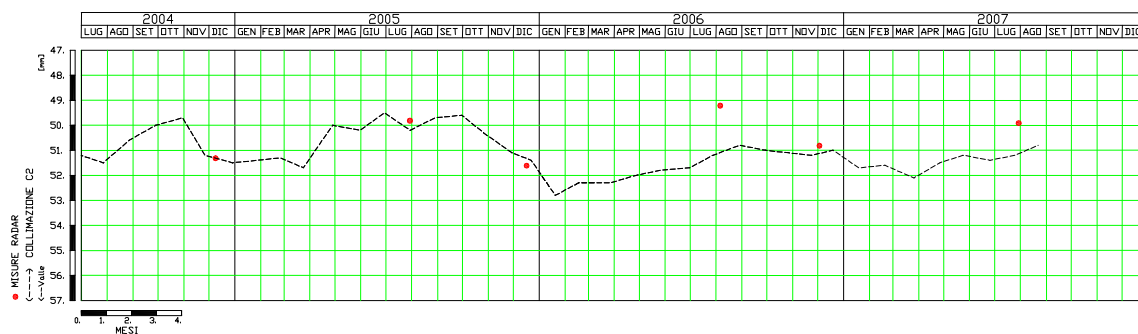


Fig.19 – Spostam. sperone C2 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

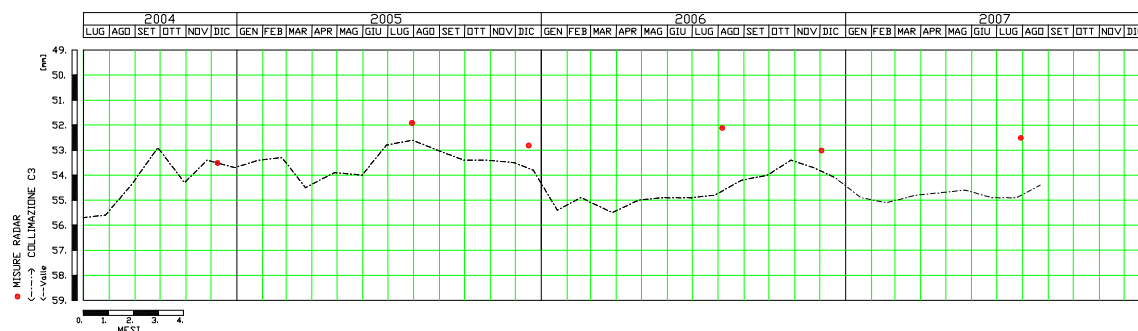


Fig.20 – Spostam. sperone C3 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

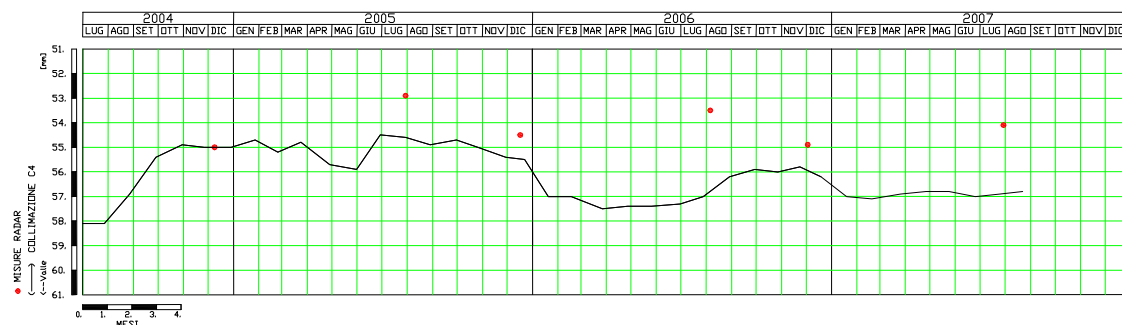


Fig.21 – Spostam. sperone C4 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

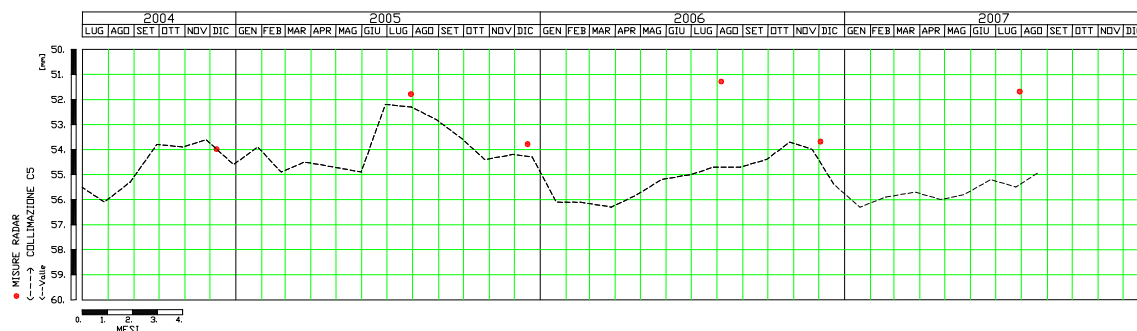


Fig.22 – Spostam. sperone C5 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

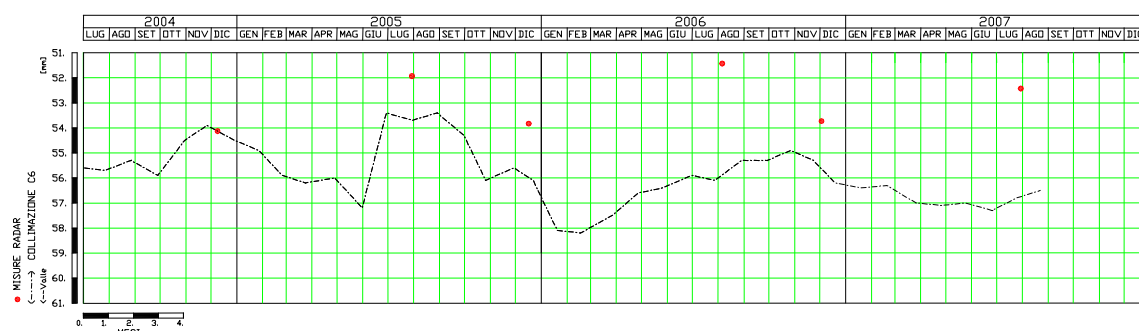


Fig.23 – Spostam. sperone C6 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

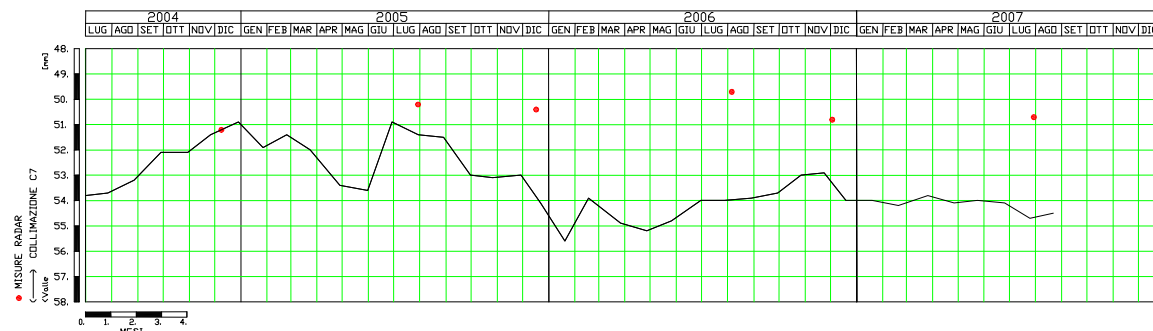


Fig.24 – Spostam. sperone C7 - Confronto fra le misure della collimazione e le misure radar

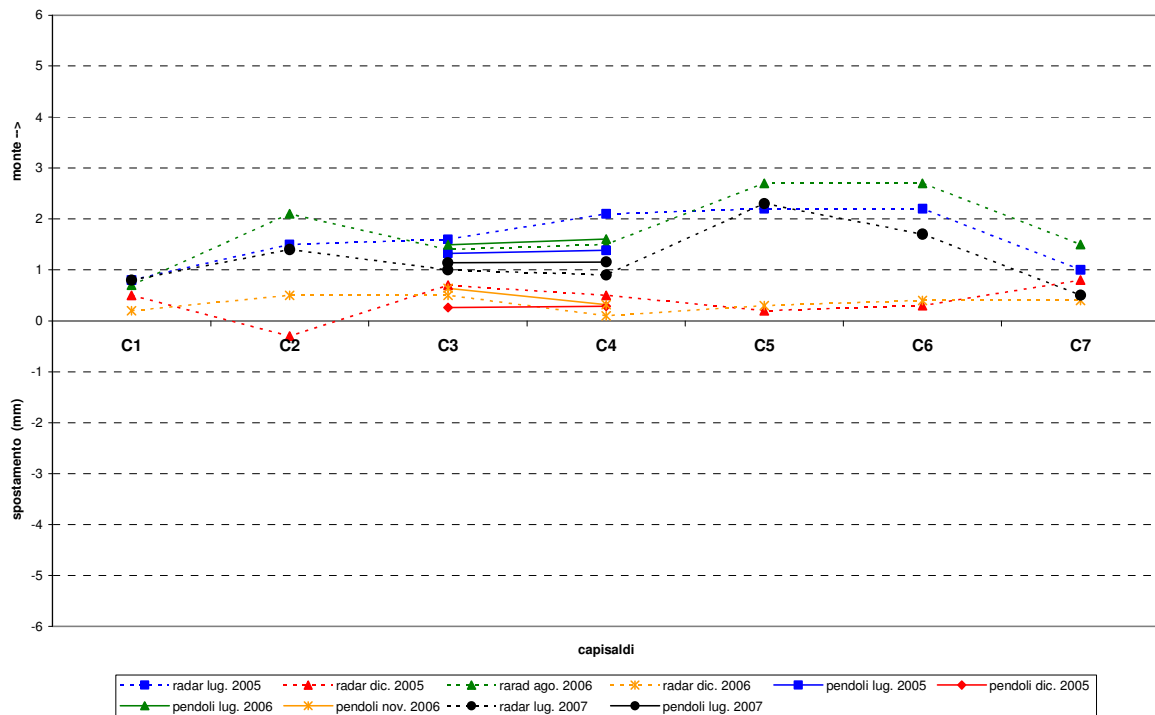


Fig.25 - Spostamento degli speroni - Confronto fra le misure dei pendoli e le misure radar

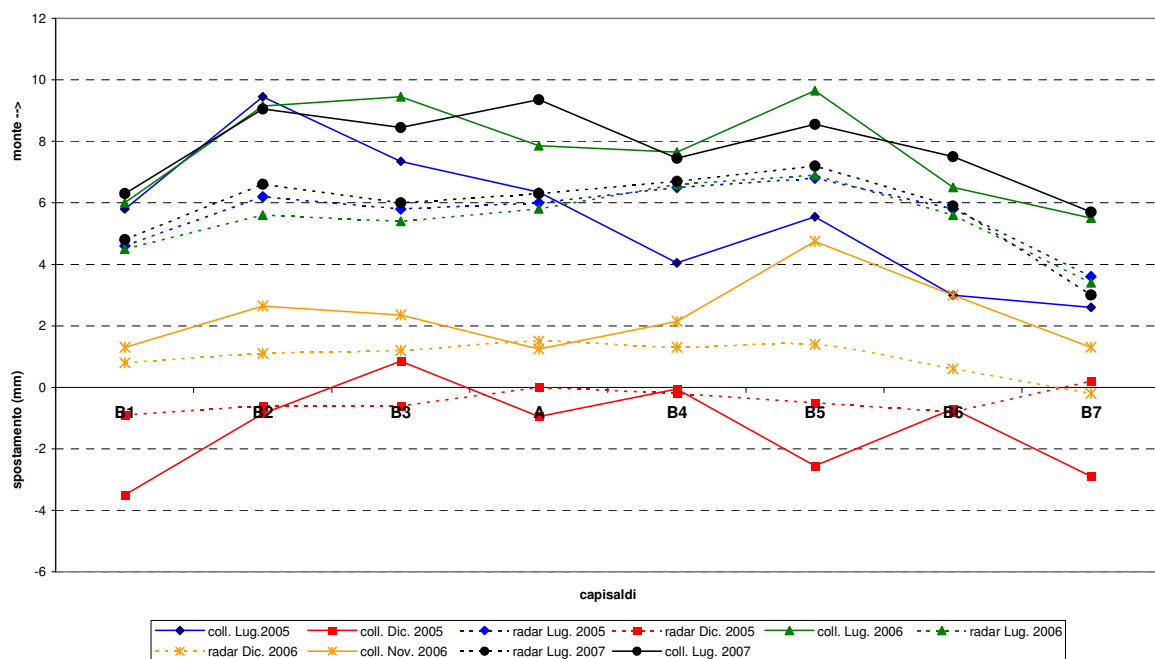


Fig.26 - Spostamenti delle voltine - Confronto fra le misure di collimazione e le misure radar

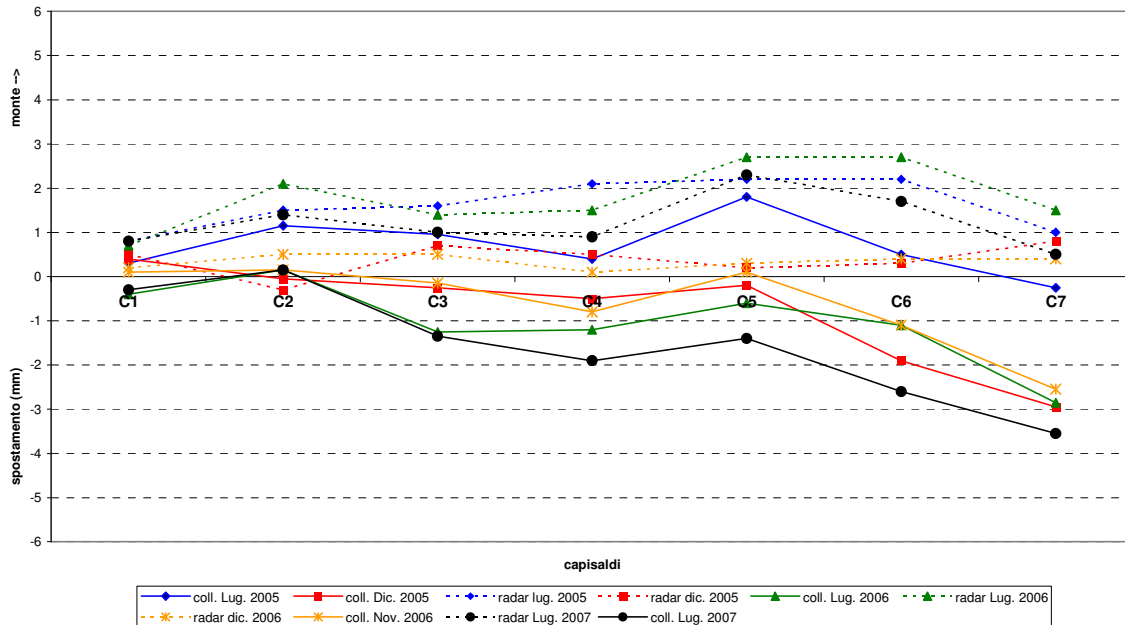


Fig.27 - Spostamenti degli speroni - Confronto fra le misure di collimazione e le misure radar

8. Conclusioni

La campagna di sperimentazione, avviata nel dicembre 2004 e tuttora in corso, non consente ovviamente di esprimere un giudizio definitivo sulla tecnologia SAR da terra a causa del numero ancora troppo limitato di misure effettuate.

Ciononostante, i primi risultati disponibili, relativi a quasi tre anni di misure, evidenziano un buon accordo con le misure coordinometriche dei due pendoli rovesci mentre dal confronto con le misure di collimazione, soprattutto sugli speroni, si osserva invece una certa discrepanza di valori che però sembrerebbe attribuibile più ad imprecisioni della collimazione piuttosto che delle misure radar.

Il prosieguo della sperimentazione e ulteriori approfondimenti sulle misure forniranno un quadro più completo della situazione consentendo un giudizio più meditato sulla possibilità dell'utilizzo della tecnologia SAR applicata al controllo delle dighe.

Le caratteristiche dell'apparecchiatura di misura, la complessità della elaborazione dei dati ed i costi piuttosto elevati inducono comunque a ritenere, allo stato attuale, la tecnologia più idonea ad un monitoraggio di supporto e temporaneo piuttosto che sostitutivo delle tradizionali misure di controllo delle dighe.

9. Riferimenti bibliografici

- A. Ferretti, A. Monti Guarnirei, C. Prati, F. Rocca, "Studi sul Radar ad Apertura Sintetica (SAR)" - Dipartimento di Elettronica ed Informazione – aprile 1998
- D. Tarchi, H. Rudolf, G. Luzi, L. Chiarantini, P. Coppo, A.J. Sieberg, "SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam", Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) - 1999
- D. Leva, G. Nico, C. Rivolta, "Interferometria SAR da terra per il monitoraggio di frane e deformazioni strutturali" – Atti della 7^a Conferenza Nazionale ASITA – Verona, 28 – 31 ottobre 2003
- D. Tarchi, N. Casagli, R. Fanti, D. Leva, G. Luzi, A. Pasuto, M. Pieraccini, S. Silvano, "Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy", Engineering Geology, 68 – 2003
- G. Antonello, N. Casagli, P. Farina, J. Fortuny, D. Leva, G. Nico, A.J. Sieber, D. Tarchi, "A ground-based interferometer for the safety monitoring of landslides and structural deformations", Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) - 2003
- D. Tarchi, D. Leva, A.J. Sieber, N. Casagli, S. Moretti, "Monitoring landslide displacements by using ground-based synthetic aperture radar interferometry: Application to Ruinon landslide in Italian Alps", Journal of geophysical Research, Vol. 108 n° B8, 2387 – 2003
- N. Casagli, P. Farina, L. Guerri, D. Tarchi, J. Fortuny, D. Leva, G. Nico, "Preliminary results of SAR monitoring of the Sciara del Fuoco on the Stromboli volcano", International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flow in Natural Slopes and Earthfills (IW-Flows2003, Sorrento, May 14 – 16 2003)
- D. Leva, C. Rivolta, I. Binda Rossetti, T. Mizuno, S. KuzuoKa, "Using a ground based interferometric synthetic aperture radar (GBinSAR) sensor to monitor a landslide in Japan", Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) - 2005
- V. Buchignani, M. Di Filippo, D. Leva, S. Lombardi, C. Rivolta, S. Rizzo, B. Toro, "Memoria tecnica: Il sinkhole di Camaione (Lucca – Regione Toscana) – 2 marzo 2007