

UN MODELLO DI VELOCITÀ MULTI-VALORE PER LA LOCALIZZAZIONE DI SORGENTI MICROSISMICHE IN VERSANTI ROCCIOSI INSTABILI

Cristina Occhiena, Marina Pirulli, Claudio Scavia

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino, Italia
e-mail: cristina.occhiena@polito.it, marina.pirulli@polito.it, claudio.scavia@polito.it*

Sommario

L'attività microsismica presente in una determinata regione è strettamente legata al campo di tensioni e deformazioni esistenti a livello locale ed è dovuta alla propagazione nel mezzo dell'energia elastica prodotta per improvviso rilascio tensionale in prossimità di superfici di debolezza del materiale in oggetto. La localizzazione spaziale delle sorgenti microsismiche registrate da una rete di monitoraggio locale, fornisce indicazioni riguardo alla presenza di zone di debolezza all'interno del volume analizzato. Il processo di localizzazione richiede un'accurata conoscenza del campo delle velocità associate alla propagazione delle onde elastiche, sorgenti di attività microsismica.

Nel presente lavoro viene descritta una nuova metodologia per il calcolo di modelli di velocità eterogenei multi-valore e per la localizzazione di sorgenti microsismiche, con sua successiva applicazione al caso del Monte Cervino.

Introduzione

Le frane da crollo in roccia sono fenomeni molto comuni nelle regioni alpine. Esse sono spesso caratterizzate da un elevato grado di imprevedibilità e possono interessare aree in cui la realizzazione di opere di protezione risulta impossibile.

L'installazione di sistemi di monitoraggio che consentano di studiare ed analizzare l'evoluzione spaziale e temporale di questi fenomeni diventa quindi importante e vede oltre ai più consueti sensori di spostamento e deformazione, anche il ricorso a sensori microsismici (o di monitoraggio delle emissioni acustiche).

Infatti gli eventi microsismici (o emissioni acustiche), dovuti alla generazione e alla propagazione di un'onda elastica all'interno di un mezzo, derivando da un improvviso rilascio tensionale a seguito di un accumulo degli sforzi lungo superfici di debolezza del materiale in esame forniscono informazioni sul grado di attività e possibile instabilità dell'area monitorata.

In generale nella letteratura scientifica in materia si parla di Emissioni Acustiche (AE) se si opera alla scala del laboratorio, e quindi per frequenze maggiori di 10^5 Hz, mentre si riserva il termine di monitoraggio dell'Attività Microsismica (MS) operando alla scala del sito, dove l'intervallo di frequenze è tipicamente compreso tra 10Hz e 10^2 Hz.

Tra le possibili tecniche di analisi di dati microsismici registrati in sito la semplice conta del numero di registrazioni nel tempo, e quindi del numero di eventi, permette di distinguere la normale attività microsismica da una possibile anomalia individuabile da un repentino aumento del numero di eventi in un determinato periodo. Tale informazione può infatti contribuire alla comprensione della possibile correlazione tra numero di eventi e fattori che possono averli generati (es. cambiamenti climatici).

Associando l'attività microsismica ad un rilascio tensionale in corrispondenza di zone di debolezza del materiale, la localizzazione degli ipocentri delle sorgenti microsismiche diventa

quindi la tecnica più immediata per l'individuazione delle zone di debolezza e, associata all'informazione di cui sorpa, può contribuire alla comprensione dei fenomeni che determinano la progressione dei microcrack all'interno dell'ammasso roccioso portando eventualmente alla rottura (Lockner, 1993).

In ambito sismico esistono numerosi codici di calcolo che consentono la determinazione della distribuzione spaziale degli ipocentri, mentre nella letteratura scientifica sono riportate poche applicazioni al caso di segnali registrati da piccole reti di monitoraggio quali quelle microsismiche.

In generale gli strumenti utilizzati per la localizzazione sismica ricorrono all'implementazione di modelli di velocità di propagazione dell'onda nel mezzo che sono omogenei o stratificati che e ben si prestano a rappresentare la velocità di propagazione delle onde sismiche alla scala dei diversi strati della crosta terrestre.

Nel caso di una rete di monitoraggio microsismico la scala del problema si riduce notevolmente rispetto al caso di una rete sismica: il volume indagato è infatti estremamente ridotto e ne deriva la necessità di una maggiore accuratezza nella determinazione del campo delle velocità, con ricorso quindi a modelli tridimensionali eterogenei. Infatti solo tali modelli possono caratterizzare dettagliatamente una topografia complessa ed in presenza di pareti rocciose particolarmente acclivi sono in grado di distinguere con una precisione sufficiente le porzioni di spazio cui attribuire la velocità dell'aria e quelle cui attribuire la velocità di propagazione nella roccia (o terreno)

Nel presente articolo viene descritta una nuova metodologia per la localizzazione di eventi microsismici con ricorso a modelli di velocità eterogenei. In particolare, la tecnica proposta si basa sull'utilizzo di una versione modificata di NonLinLoc, codice originariamente utilizzato per la localizzazione di sorgenti sismiche.

La metodologia messa a punto viene validata attraverso l'applicazione al caso di studio del Monte Cervino. La particolare forma del Monte Cervino (pseudo piramidale) e le caratteristiche della rete di monitoraggio hanno infatti evidenziato l'importanza di sviluppare una metodologia di calcolo che preveda il ricorso ad un modello tridimensionale eterogeneo delle velocità. A supporto di tale necessità e del miglioramento che ne risulta per il processo di localizzazione, viene ripostato un confronto tra i risultati di tre processi di localizzazione effettuati ri-localizzando con diversi modelli di velocità (omogeneo, eterogeneo bi- e multi-valore) una serie di martellate effettuate nei giorni successivi all'installazione per testare il corretto funzionamento della rete di monitoraggio del Cervino.

Descrizione del caso di studio

Il sito oggetto di indagine si colloca sul versante ovest del Monte Cervino (Figure 1a e b), in prossimità del Rifugio alpino J.A. Carrel (3829 m slm)

Il Rifugio J.A. Carrel (Figura 1c) è posto su uno sperone di roccia in corrispondenza dello spartiacque tra il versante italiano e quello svizzero del Monte Cervino.

L'eccezionale aumento del numero di crolli in roccia verificatisi durante l'estate 2003, ha portato alla selezione di questo sito per l'installazione di un sistema di monitoraggio microsismico, ad opera del CNR-IRPI di Torino, nell'ambito del Progetto Interreg IIIA ALCOTRA "PERMAdataROC". Il sistema di monitoraggio microsismico è costituito da 5 geofoni triassiali con frequenza propria 100 Hz. Due sensori sono installati in superficie (geofoni 1 e 3 in Figura 1d) e tre in foro a diverse profondità (geofoni 2, 4 e 5 in Figura 1d, situati, rispettivamente, a 5.2m, 3m e 6.8m). La registrazione di un evento avviene quando 6 canali del sistema superano una soglia di innesco preimpostata (0.01 mm/s). Completata l'installazione (22 settembre 2007) il sistema è stato testato generando degli eventi artificiali per impatto di un martello strumentato sulla superficie rocciosa in alcuni punti georiferiti.

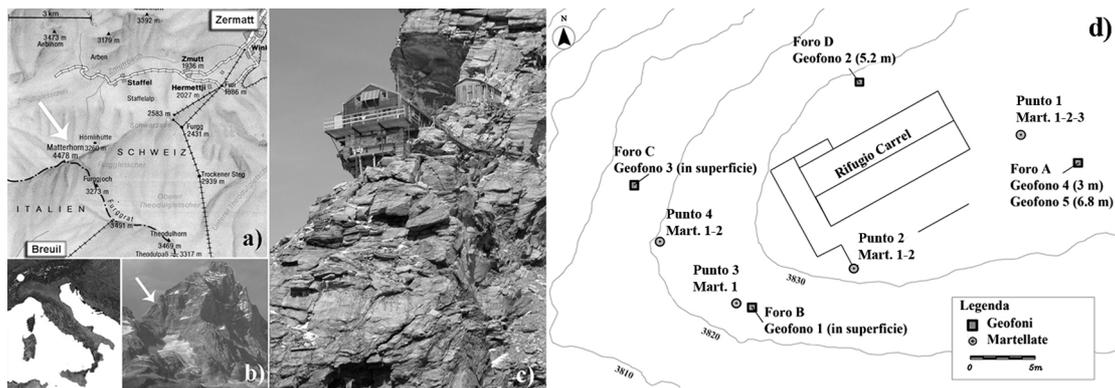


Figura 1. a) Inquadramento geografico dell'area d'indagine; b) vista del versante italiano del Monte Cervino con indicazione della posizione del rifugio; c) il Rifugio J. A. Carrel (Fonte: Arpa Valle d'Aosta, Italia); d) schema della rete di monitoraggio installata.

I dati raccolti sono stati successivamente utilizzati per il calcolo delle velocità medie lungo la congiungente geofono-sorgente e per valutare la bontà del modello delle velocità tramite rilocalizzazione delle sorgenti artificiali le cui coordinate sono infatti note.

Descrizione del codice NonLinLoc modificato

Il pacchetto NonLinLoc (Non Linear Location) è costituito da un insieme di programmi, disponibili on-line, utili per la localizzazione sismica (Lomax et al., 2000; Lomax et al., 2001). Il calcolo dell'ipocentro di un evento può essere fatto ricorrendo ad un metodo lineare di ricerca della sorgente lungo una griglia tridimensionale o ad un metodo non lineare che può essere basato o sull'algoritmo di campionamento di Metropolis-Gibbs e sul metodo Oct-Tree.

Il principale vantaggio di NonLinLoc è rappresentato dalla possibilità di descrivere i dati di input attraverso una funzione di densità di probabilità a cui è associata una funzione che descrive le incertezze legate alla determinazione di ciascun parametro (errori connessi alla lettura dei tempi di primo arrivo, errori nella determinazione della posizione dei sensori ecc.). Il processo di localizzazione segue l'approccio di inversione di Tarantola e Vallette (1982), mentre il calcolo del tempo di percorrenza delle onde all'interno del mezzo attraversato è calcolato in base all'algoritmo di Podvin e Lecomte (1991). Tale algoritmo prevede l'applicazione sistematica del principio di Huygens in corrispondenza di ogni repentino cambiamento di valori all'interno del modello di velocità. In tal modo il percorso seguito dalle onde risulta non lineare e il tempo di arrivo letto su ciascun sensore è il risultato dell'arrivo sia delle componenti dirette trasmesse sia di quelle riflesse e rifratte in corrispondenza di ogni forte contrasto del campo delle velocità.

All'interno del pacchetto NonLinLoc un programma specifico, Vel2Grid, costituisce il pre-processore volto alla definizione del modello delle velocità come:

1. una successione di strati orizzontali caratterizzati ciascuno da una velocità costante o da un gradiente di velocità costante;
2. un modello bidimensionale descritto da una successione di poligoni e trasformato in un modello pseudo-tridimensionale attraverso la sua estensione lungo la terza direzione.

Attraverso il programma Vel2Grid i valori di velocità che caratterizzano ciascuno strato, o ciascun poligono, vengono scritti all'interno di un file binario successivamente usato da NonLinLoc per la localizzazione. Al fine di definire un modello di velocità eterogeneo, in grado di rappresentare meglio le caratteristiche del caso di studio in ambito microsismico, Vel2Grid è stato sostituito da un codice di calcolo scritto appositamente in MATLAB, che

definisce il modello delle velocità suddividendo il volume analizzato in sottovolumi cubici aventi ciascuno un valore diverso di velocità. Il nuovo file binario, equivalente all'output di Vel2Grid contiene i valori di velocità associati a ciascun punto che identifica il centro di ogni cella.

Tale approccio consente, eventualmente, la rapida sostituzione del modello eterogeneo con i risultati di una tomografia.

Il caso di studio del Monte Cervino: modello di velocità eterogeneo e localizzazione di eventi

Al fine di evidenziare e discutere i vantaggi dell'introduzione del modello eterogeneo delle velocità, sono riportati nel seguito i risultati della ri-localizzazione delle martellate, utilizzate per testare il corretto funzionamento del sistema di monitoraggio, ottenuti utilizzando tre diversi modelli di velocità:

- 1) modello omogeneo delle velocità (senza alcuna distinzione tra aria e roccia);
- 2) modello eterogeneo bi-valore (un unico valore per la roccia e uno differente per l'aria);
- 3) modello eterogeneo multi-valore (un unico valore per l'aria e diversi valori per la roccia in funzione della posizione di ogni cella rispetto alla posizione dei raggi che uniscono ciascuna sorgente con ciascun geofono).

Il modello 1) è stato calcolato tramite Vel2Grid considerando l'intera rete di monitoraggio all'interno di un unico strato omogeneo caratterizzato da un valore di velocità pari a 2958 m/s. I modelli 2) e 3) sono stati calcolati con MATLAB. In Figura 2a sono visibili i risultati della localizzazione ottenuta con il modello 1). È possibile notare che soltanto una delle sorgenti è localizzata all'interno dell'ammasso roccioso, mentre tutte le altre (rappresentate dai triangoli neri) risultano nell'aria.

Di conseguenza il primo miglioramento necessario è rappresentato dall'introduzione di un valore di velocità differente nella porzione di modello occupata dall'aria, da cui il modello 2): il cubo del modello delle velocità è stato quindi discretizzato in 50x50x50 celle cubiche di 4m di lato. La porzione occupata dall'aria è stata individuata calcolando la posizione del centro di ciascuna cella rispetto alla superficie topografica fornita dal DEM. A ciascun centro è stato assegnato un valore di velocità pari a 2958 m/s nel caso in cui la cella ricadesse all'interno dell'ammasso roccioso e 352.2 m/s per le celle appartenenti all'aria. Il valore assegnato alle celle situate nella porzione di aria deriva dal calcolo della velocità del suono nell'aria in funzione della temperatura media annuale registrata nei dintorni del Rifugio Carrel. I risultati della localizzazione ottenuti utilizzando il modello eterogeneo bi-valore sono visibili in Figura 2b; il miglioramento ottenuto introducendo la presenza dell'aria è evidenziato dal fatto che tutte le martellate sono ora situate all'interno dell'ammasso roccioso.

Per migliorare ulteriormente la qualità della localizzazione è stato calcolato un modello più complesso, considerando la possibilità di differenziare all'interno dell'ammasso roccioso il valore di velocità associato ad ogni cella: nel modello 3) a ciascuna cella è stato quindi assegnato un valore di velocità pari alla media delle velocità calcolate lungo le congiungenti sorgente-geofono e distanti dal centro della cella in esame meno di 4m. Le celle situate ad una maggiore distanza sono state successivamente riempite con valori di velocità pari alla media dei valori assegnati alle celle adiacenti.

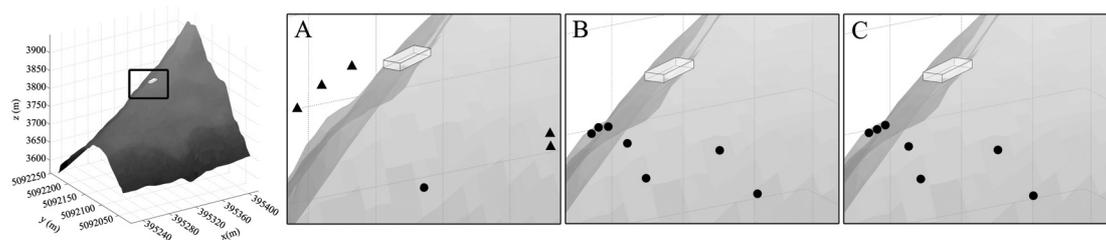


Figura 2. Risultati della ri-localizzazione delle martellate utilizzando (A) un modello omogeneo delle velocità, (B) un modello eterogeneo bi-valore e (C) un modello eterogeneo multi-valore. Il parallelepipedo bianco rappresenta il Rifugio J. A. Carrel, i triangoli rappresentano le martellate ri-localizzate nella porzione di modello occupata da aria, mentre i cerchi rappresentano le martellate ri-localizzate all'interno dell'ammasso roccioso.

Analisi dei risultati

I risultati della ri-localizzazione delle martellate sono riportati nella Tabella 1. In particolare, per ogni martellata è riportata la differenza (Δx , Δy , Δz) tra la posizione reale della martellata e la posizione calcolata, lungo ciascuna direzione (x positiva nella direzione Est, y nella direzione Nord e z dal basso verso l'alto).

Tabella 1. Analisi dei risultati della ri-localizzazione delle martellate in funzione del modello di velocità utilizzato. La colonna 'Punto' identifica il punto in cui è stata data la martellata, mentre la colonna 'Mart.' identifica ciascuna martellata data nel punto (Figura 1d). Δx , Δy , Δz : differenza tra la posizione reale di ciascuna martellata e quella calcolata lungo i tre assi cartesiani.

Punto	Mart.	Δx (m)			Δy (m)			Δz (m)			$\sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}$ (m)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	17.89	3.58	3.82	59.06	33.60	21.25	25.20	48.37	34.87	66.66	59.01	41.01
	2	12.89	8.30	0.40	44.06	24.15	17.04	30.18	29.47	27.84	54.94	39.00	32.64
	3	12.89	8.30	0.40	44.06	24.15	17.04	25.20	29.47	27.84	52.37	39.00	32.64
2	1	2.48	12.61	0.14	2.50	7.86	8.29	56.89	35.78	27.51	57.00	38.75	28.74
	2	27.52	17.33	5.49	22.50	7.86	8.29	27.68	16.88	24.70	45.05	25.77	26.62
3	1	12.27	8.26	3.68	30.52	12.88	14.42	10.35	6.36	18.61	34.48	16.57	23.83
4	1	0.56	4.29	2.75	20.87	10.59	16.80	1.39	4.57	6.98	20.92	12.30	18.40
	2	0.56	1.93	4.28	20.87	10.59	15.40	1.39	5.41	5.57	20.92	12.04	16.92
Err. med (m)		10.88	8.07	2.62	30.56	16.46	14.81	22.28	22.04	21.74	44.04	30.26	27.60
Err. max (m)		27.52	17.33	5.49	59.06	33.60	21.25	56.89	48.37	34.87	66.66	59.01	41.01
Err. min (m)		0.56	1.93	0.14	2.50	7.86	8.29	1.39	4.57	5.57	20.92	12.04	16.92
Dev. st. (m)		9.40	5.05	2.06	17.80	9.57	4.49	18.21	16.25	10.54	17.02	16.54	7.98

LEGENDA: A. Modello omogeneo delle velocità, nessuna distinzione aria-roccia;

B. Modello eterogeneo bi-valore, un valore di velocità per la roccia, uno per l'aria;

C. Modello eterogeneo multi-valore, un valore diverso per ogni cella per la roccia e un valore unico per l'aria.

Osservando i valori dell'errore medio nelle diverse direzioni così come riportati in Tabella 1 è possibile notare come passando dal modello omogeneo (A) al modello eterogeneo (C), attraverso il modello (B), si ottenga gradualmente un progressivo miglioramento della localizzazione. Nella direzione x l'errore medio passa da 10.88m a 2.62m, mostrando un incremento dell'accuratezza della localizzazione pari al 76%. Nella direzione y l'errore passa da 30.56m a 14.81m, con un incremento di precisione del 51%. Nella direzione z, invece, la precisione di localizzazione aumenta solo del 2%, dal momento che l'errore passa da 22.21m

a 21.74m.

Si osserva che la ridotta precisione ottenibile lungo la direzione z è dovuta alla cattiva distribuzione dei sensori lungo l'asse verticale. Infatti, a causa della piccola differenza di quota tra i due geofoni che lungo la z risultano più distanti, l'intera rete di monitoraggio risulta quasi allineata lungo un piano. Questo allineamento determina l'impossibilità di ottenere un netto miglioramento dei risultati lungo la direzione verticale, pur introducendo un modello di velocità più complesso.

Tuttavia i valori della deviazione standard mostrano una generale diminuzione della dispersione dell'errore adottando il modello (C). La deviazione standard passa infatti da 9.40m a 2.06m lungo la x, da 17.80m a 4.49m lungo la y e da 18.21m a 10.54m lungo la z, confermando in media un progressivo avvicinamento alla posizione reale della sorgente.

Conclusioni molto simili possono essere tratte osservando l'errore complessivo calcolato come distanza tra il punto localizzato e il punto reale e riportato nelle ultime tre colonne della Tabella 1. Infatti la differenza tra posizione calcolata e posizione reale passa da 44.04m a 27.60m, mentre la deviazione standard passa da 17.02m a 7.98m, passando dal modello (A) al modello (C).

Conclusioni

Nel trattamento di dati microsismici una precisa localizzazione richiede l'accurata conoscenza del campo delle velocità. In questo ambito l'utilizzo di un modello delle velocità che consenta di cambiare valore in funzione delle caratteristiche del mezzo attraversato (presenza di aria o di roccia, caratteristiche medie dell'ammasso roccioso ecc.) è risultato particolarmente importante.

Nel presente lavoro l'accoppiamento di un nuovo strumento per il calcolo di modelli eterogenei di velocità, con il software di localizzazione NonLinLoc ha permesso di fare fronte alla suddetta necessità. La validità della metodologia messa a punto è stata infatti esplicitata attraverso l'applicazione al caso di studio del Monte Cervino dove una rete di monitoraggio microsismico è stata installata nell'ambito del Progetto Interreg IIIA ALCOTRA "PERMAdataRoc". La ri-localizzazione di una serie di martellate realizzate per testare il corretto funzionamento del sistema di monitoraggio, ha evidenziato che il modello eterogeneo consente un miglioramento della qualità della localizzazione delle sorgenti microsismiche, evidenziando anche l'importanza della corretta distribuzione spaziale dei sensori che costituiscono la rete di monitoraggio.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Marta Chiarle, Massimo Arattano e Giovanni Mortara (CNR-IRPI di Torino) per il coinvolgimento nel progetto Interreg IIIA Alcotra n°196, PERMAdataROC, e per aver condiviso i dati microsismici registrati.

Bibliografia

- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P. & Thierry-Berge, C. (2000). Probabilistic earthquake location in 3D and layered models. In *Advances in seismic event location*, edited by C.H. Thurber and N. Rabinowitz, pp. 101-134, Kluwer Acad. Norwell, Mass.
- Lomax, A. & Curtis, A. (2001). Fast probabilistic earthquake location in 3D models using Oct-Tree Importance Sampling, *Geophys. Res. Abstr.*, 3.
- Lockner, D. (1993). The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30 (7), 883-899.
- Podvin, P. & Lecomte, I. (1991) Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools, *Geoph. J. Int.*, 105, 271-284.
- Tarantola, A. & Vallette, B. (1982). Inverse problem=quest for information, *J. Geophys.*, 50,159-170.