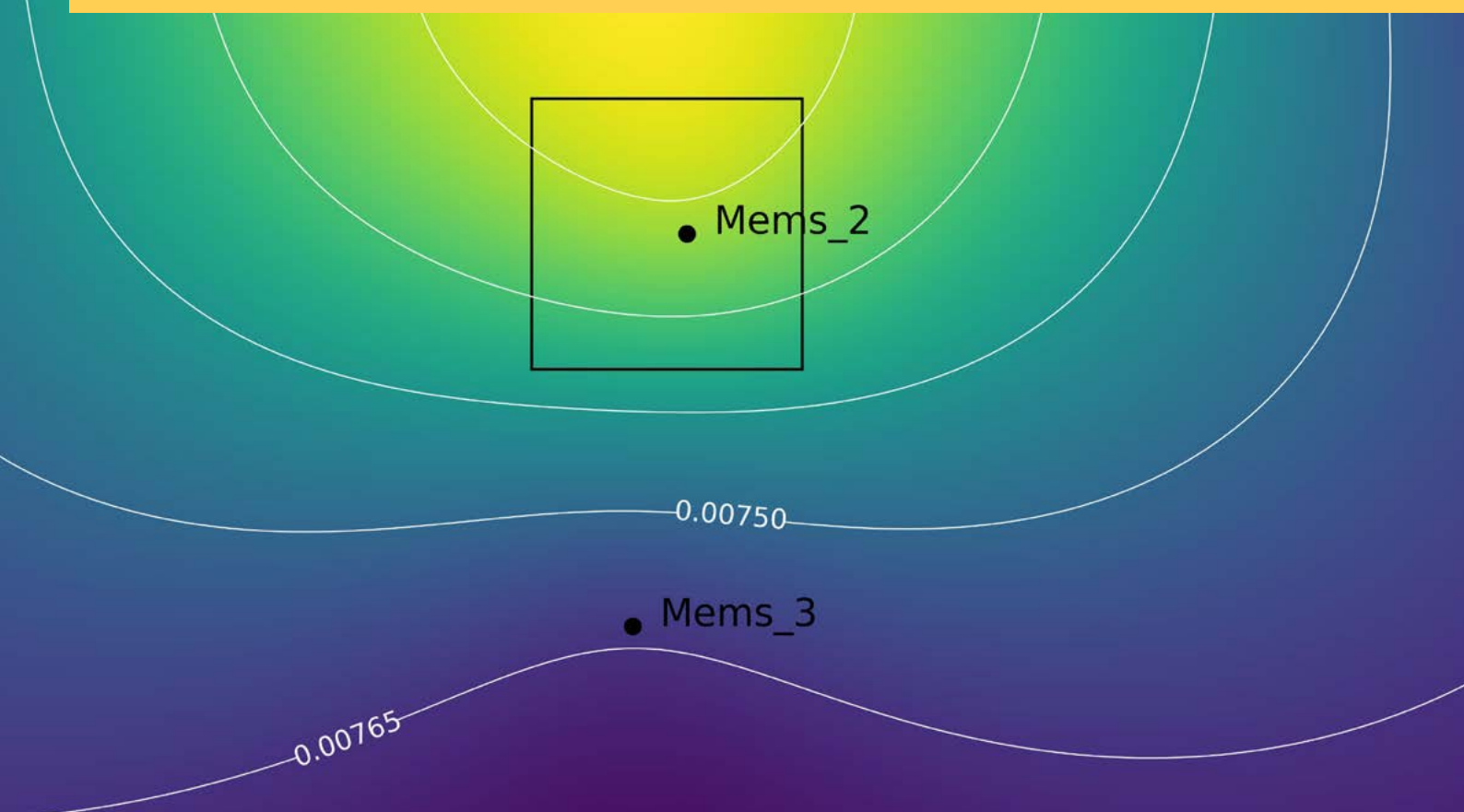




RAPPORTI TECNICI INGV

Rete accelerometrica MEMS ad alta
velocità che imita le reti sismiche
della zona di subduzione naturale per
il monitoraggio di Foamquake



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

509

**Direttore Responsabile**

Daniela VERSACE

Editor in Chief

Milena MORETTI

Editorial Board

Laura ALFONSI

Sofia BARANELLO

Carla BARNABA

Christian BIGNAMI

Simona CARANNANTE

Maria Grazia CIACCIO

Luca COCCHI

Luigi CUCCI

Lorenzo CUGLIARI

Elisabetta D'ANASTASIO

Alessia DI CAPRIO

Roberto DI MARTINO

Domenico DI MAURO

Domenico DORONZO

Filippo GRECO

Alessandro IAROCCI

Mario MATTIA

Daniele MELINI

Anna NARDI

Lucia NARDONE

Marco OLIVIERI

Arianna PESCI

Pierangelo ROMANO

Paola SBARRA

Davide SCAFIDI

Maurizio SOLDANI

Sara STOPPONI

Umberto TAMMARO

David ZULIANI

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.178 | 2014, 23 LUGLIO

© INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Presidente INGV

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma

Tutti i diritti riservati

www.ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Rete accelerometrica MEMS ad alta velocità che imita le reti sismiche della zona di subduzione naturale per il monitoraggio di Foamquake

High-speed MEMS accelerometry network mimicking natural subduction zone seismic networks for Foamquake monitoring

Giuseppe Spinelli^{1,*}, Giovanni Romeo¹, Alessandro Iarocci¹, Giacomo Mastella², Fabio Corbi³,
Francesca Funicello⁴

¹Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, Roma, Italia

²Università La Sapienza, Dip. Scienze della Terra, Roma, Italia

³Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, CNR c/o Università La Sapienza, Dip. Scienze della Terra, Roma, Italia

⁴Università Roma TRE, Dip. di Scienze, Laboratorio di Tettonica Sperimentale, Roma, Italia

*Corresponding author

Accettato 20 ottobre 2025 | Accepted 20 October 2025

Come citare | How to cite Spinelli, G., Romeo, G., Iarocci, A., Mastella, G., Corbi, F., Funicello, F. (2025). Rete accelerometrica MEMS ad alta velocità che imita le reti sismiche della zona di subduzione naturale per il monitoraggio di Foamquake. *Rapporti Tecnici INGV*, 509, 26 pp.
<https://doi.org/10.13127/rpt/509>

In copertina | Mappa di localizzazione di un terremoto analogico generato in Foamquake | Cover | Location map of an analog earthquake generated in Foamquake

509

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Problema scientifico	8
1.1 Modello sismotettonico Foamquake	8
1.2. Descrizione del modello	8
2. Misure preliminari dei terremoti sperimentali	9
2.1. Sensore Colibrys	9
2.2. Accelerometro ADXL354BZ e scheda EVAL-ADXL354BZ	10
3. Acquisizione dei terremoti sperimentali	11
3.1 Versione pilota del filtro	12
3.2 Versione finale del filtro	14
3.2.1 Filtro	14
3.2.2 Motherboard	15
3.2.3 Subrack	16
3.2.4 Alimentazione	17
4. Messa a punto dell’esperimento	18
5. Risultati ottenuti	19
6. Considerazioni finali	22
Bibliografia	22
Sitografia	23

Riassunto

Per ovviare ai limiti imposti dalla frequenza di acquisizione delle telecamere ad alta risoluzione nella caratterizzazione della nucleazione e nella descrizione della propagazione dinamica dei terremoti sperimentali, è stata sviluppata una rete accelerometrica ad alta velocità basata su dispositivi che combinano componenti meccanici ed elettronici in un singolo sistema (*Micro-Electro-Mechanical System*, MEMS) [1]. La rete MEMS è stata progettata come analogo delle reti sismiche presenti nelle zone di subduzione. I risultati preliminari indicano che l'integrazione di questa rete accelerometrica con i dati ottenuti dalle telecamere consente una caratterizzazione più dettagliata della coerenza tra l'attività sismica e la deformazione superficiale osservata. Ciò fornisce nuove evidenze riguardanti il ciclo sismico e lo scorrimento della faglia che caratterizza i terremoti analogici. Sebbene il sistema sia ancora in fase sperimentale, l'integrazione delle reti accelerometriche rappresenta un avanzamento significativo nella comprensione del comportamento sismico dei modelli *Foamquake*, offrendo preziosi spunti per la comprensione dei processi naturali di fagliazione e per il confronto tra differenti metodologie di monitoraggio.

Abstract

To overcome the limitations imposed by the acquisition frequency of high-resolution cameras in characterizing the nucleation and describing the dynamic propagation of experimental earthquakes, a high-speed accelerometer network based on devices that combine mechanical and electronic components in a single system (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) has been developed [1]. The MEMS network was designed as an analogue of the seismic networks found in subduction zones. Preliminary results indicate that integrating this accelerometer network with camera data allows for a more detailed characterization of the coherence between seismic activity and observed surface deformation. This provides new evidence regarding the seismic cycle and fault slip that characterizes analog earthquakes. Although the system is still in the experimental phase, the integration of accelerometer networks represents a significant advance in understanding the seismic behavior of Foamquake models, offering valuable insights into natural faulting processes and comparing different monitoring methodologies.

Keywords Accelerometro; Filtro; Foamquake | Accelerometer; Filter

Introduzione

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati modelli analogici sismotettonici con l'obiettivo di approfondire la comprensione dei processi che governano la dinamica del ciclo sismico. La sismotettonica, branca delle scienze della Terra, si occupa dello studio delle interazioni tra la sismicità e le strutture geologiche attive in un determinato contesto tettonico. La tettonica, a sua volta, analizza le dislocazioni (spostamenti) e le deformazioni (cambiamenti di forma e di dimensione) che interessano la litosfera.

1. Problema scientifico

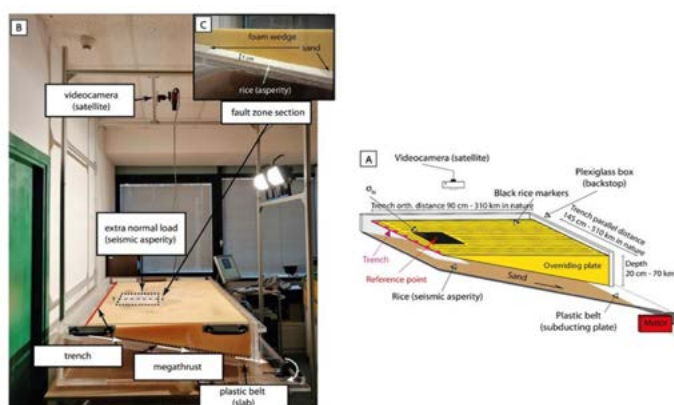
La tecnologia MEMS è già stata ampiamente utilizzata in ambito sismologico [Cascone et al., 2021], anche con applicazioni operative presso l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV [D'Alessandro et al., 2019]). Recentemente, gli accelerometri MEMS hanno acquisito rilevanza grazie alle loro dimensioni ridotte, basso costo e facilità di installazione [Saunders et al., 2016; Tanircan et al., 2018]. In laboratorio, sono stati utilizzati in esperimenti sismici con modelli in gommapiuma per studiare la direttività del moto del suolo vicino alla faglia generato da terremoti trascorrenti [Day et al., 2008]. Solo di recente, gli accelerometri MEMS sono stati applicati al monitoraggio di modelli analogici di megaterremoti sismotettonici [Kosari et al., 2022], inaugurando un approccio pionieristico noto come Sismologia di Laboratorio.

Il presente lavoro apporta un contributo originale, introducendo e descrivendo per la prima volta una rete di accelerometri MEMS installata sul modello sismotettonico *Foamquake*, sviluppato con l'intento di studiare i terremoti generati lungo la faglia di subduzione. Per ottenere una caratterizzazione dinamica accurata, è cruciale ottimizzare le misure accelerometriche, poiché la registrazione dei terremoti sperimentali è indispensabile sia per la validazione del modello sia per la raccolta dei dati del sistema sismotettonico.

1.1 Modello sismotettonico *Foamquake*

Presso il Laboratorio di Tettonica Sperimentale del Dipartimento di Scienze dell'Università Roma Tre, è stato sviluppato *Foamquake* [Mastella et al., 2021; 2022a]. Si tratta di un modello analogico sismotettonico, elastoplastico e tridimensionale, concepito per simulare le fasi del ciclo sismico associate ai *megathrusts* di subduzione in cui fasi di accumulo di deformazione elastica si alternano a fasi di rilascio sismico o asismico. I *megathrusts* [2] costituiscono la superficie di contatto lungo la quale una placca tettonica si immerge sotto un'altra placca, generando i terremoti più energetici del pianeta. *Foamquake* è stato progettato per riprodurre, in condizioni di laboratorio e in scala spazio-temporale ridotta, la dinamica di tali processi (Figura 1).

Figura 1 Configurazione sperimentale del *Foamquake*.
Figure 1 *Foamquake* experimental setup.



1.2. Descrizione del modello

La configurazione sperimentale prevede:

- cuneo in gommapiuma (reologia elastica): analogo della litosfera superiore;
- piastra rigida inclinata (10°): rappresenta la superficie di subduzione;
- sistema di convergenza: un nastro trasportatore plastico, spinto da cinghia motorizzata,

- scorre a velocità costante $v = 0,01 \text{ cm/s}$, simulando il moto della placca in subduzione;
- zona di contatto: interfaccia composita costituita da uno strato di riso (spessore $\approx 1 \text{ cm}$) circondato da sabbia, che conferisce comportamento attritivo eterogeneo e asperità sismogeniche.

Il sistema si comporta come elastoplastico accoppiato, generando cicli quasi-periodici di:

- accumulo di stress;
- rilascio cosismico mediante instabilità spontanee di attrito alla base del cuneo.

Sulla superficie del modello viene applicato un carico normale sopra l'asperità per modulare la resistenza di quest'ultima e, conseguentemente, la quantità di slip cosismico. *Foamquake* genera sequenze di rotture totali e parziali, cicli sovrapposti con diversi tempi di ricorrenza e rotture in sequenze: *pattern* spazio-temporali complessi, simili a quelli osservati nei *megathrust* naturali. Tale caratteristica rende *Foamquake* un banco di prova perfetto per lo sviluppo di nuove metodologie di analisi e potenziali strategie di previsione di eventi sismici.

Il modello è monitorato dall'alto mediante una telecamera ad alta risoluzione che può essere assimilata alla visione satellitare. Tale telecamera è in grado di acquisire 50 immagini al secondo. A partire da queste immagini, attraverso l'applicazione della tecnica di analisi di immagine conosciuta come PIV (*Particle Image Velocimetry*), è possibile tracciare l'evoluzione spazio-temporale della deformazione superficiale del modello. Questa tecnica simula una rete geodetica con stazioni dense ed equispaziate, analoghe a quelle utilizzate nelle zone di subduzione del prototipo naturale.

Grazie alla capacità di *Foamquake* di generare centinaia di terremoti analogici in pochi minuti di esperimento, è stato possibile applicare tecniche di intelligenza artificiale per la previsione degli eventi sismici di laboratorio [Corbi et al., 2019; Mastella et al., 2022b]. I terremoti possono essere previsti con una buona precisione, su orizzonti temporali che corrispondono alla durata degli eventi sismici stessi. Questi studi hanno introdotto un nuovo approccio nella previsione dei terremoti, fornendo prospettive innovative per l'applicazione di tali metodologie nelle osservazioni naturali.

2. Misure preliminari dei terremoti sperimentali

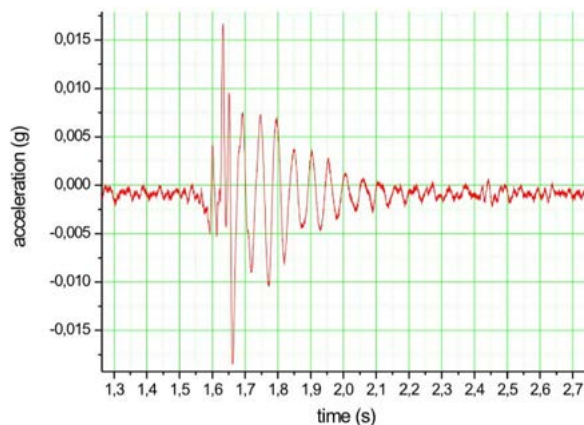
Il cuneo che simula la placca superiore nel modello *Foamquake* è realizzato in gommapiuma a comportamento elastico. Tale materiale, caratterizzato da bassa densità e moduli elastici ridotti, impone come vincolo primario alla strumentazione la leggerezza, per evitare alterazioni significative della risposta meccanica del sistema. In questa prospettiva, la scelta è ricaduta su accelerometri MEMS, i quali, oltre alla ridotta massa, offrono un buon compromesso tra sensibilità, costo e facilità di integrazione. Gli accelerometri MEMS sfruttano principi di rilevazione capacitiva o piezoresistiva: microstrutture sospese subiscono deformazioni elastiche quando sollecitate da un'accelerazione, con conseguente variazione della capacità o resistenza elettrica. Tali variazioni vengono successivamente convertite in segnale di accelerazione.

2.1. Sensore Colibrys

Per le prime misurazioni è stato utilizzato un accelerometro Colibrys [3], dispositivo ad alte prestazioni, montato su un supporto cubico realizzato presso il nostro Istituto in PLA (acronimo di acido polilattico) mediante stampa 3D. Tale supporto ha consentito l'applicazione del sensore sulla superficie della gommapiuma tramite semplice incollaggio. Questa configurazione, tuttavia,

non si è rivelata ottimale: l'interazione tra la rigidità del cubetto in PLA e la risposta elastica della gommapiuma ha generato un sistema risonante accoppiato, compromettendo la qualità della misura. Nonostante ciò, le acquisizioni preliminari hanno permesso di stimare l'ordine di grandezza delle accelerazioni generate dagli eventi analogici (Figura 2).

Figura 2 Misura dell'accelerazione prodotta da un terremoto sperimentale.
Figure 2 Measurement of the acceleration produced by an experimental-earthquake.



Le principali caratteristiche rilevate sono:

- frequenza caratteristica dell'evento superiore al limite proprio del sensore;
- rumore strumentale ≈ 2 mg (pp);
- segnale registrato ≈ 30 mg (pp).

La frequenza dominante di 20 Hz corrisponde all'oscillazione del sistema gommapiuma + massa del sensore, assimilabile a un pendolo rovesciato. Tentativi di ridurre tale effetto mediante incremento della superficie di appoggio avrebbero compromesso la risoluzione spaziale, incompatibile con le dimensioni ridotte del modello. Si osservi che la velocità del suono nella gommapiuma (50–100 m/s) è significativamente inferiore a quella del PLA (≈ 2000 m/s). Una piattaforma rigida in PLA accoppiata alla gommapiuma determina un effetto di cortocircuito acustico, con mediazione del segnale su un'area più ampia e conseguente perdita di risoluzione spaziale.

2.2. Accelerometro ADXL354BZ e scheda EVAL-ADXL354BZ

Successivamente, è stato implementato un secondo sistema basato su accelerometro triassiale ADXL354 [4], inserito in un alloggiamento ricavato direttamente nella gommapiuma. Rispetto al Colibrys, l'ADXL354 presenta:

- guadagno: 400 mV/g (vs. 1350 mV/g);
- rumore: $22 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ($\approx 3\times$ Colibrys, ma trascurabile per gli scopi sperimentali);
- configurazione triassiale;
- costo sensibilmente inferiore, con vantaggi nella prospettiva di implementazione in rete distribuita.

Le caratteristiche di guadagno e rumore del sensore ADXL354 risultano quindi adeguate alla rivelazione dei terremoti sperimentali. Il sensore utilizza tre rivelatori capacitivi differenziali, ciascuno associato a una massa sospesa elasticamente. È fornito già montato sulla scheda di valutazione EVAL-ADXL354BZ [5], caratterizzata da peso e dimensioni contenute, tali

da consentirne l'integrazione diretta in *Foamquake* senza necessità di supporti aggiuntivi. L'installazione è stata realizzata mediante inserimento in taglio verticale nella gommapiuma, evitando l'incollaggio e preservando la risposta meccanica locale (Figura 3).

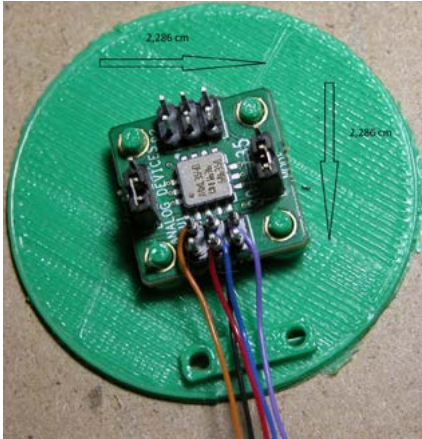


Figura 3 Accelerometro ADXL354BZ (su scheda EVAL-ADXL354BZ) su base PLA.

Figure 3 ADXL354BZ accelerometer (on EVAL-ADXL354BZ board) on PLA base.

Le acquisizioni (Figura 4) mostrano la risposta del sensore lungo i tre assi a seguito di un impulso. Le componenti dell'accelerazione differiscono in ampiezza e fase, in funzione della direzione di sollecitazione.

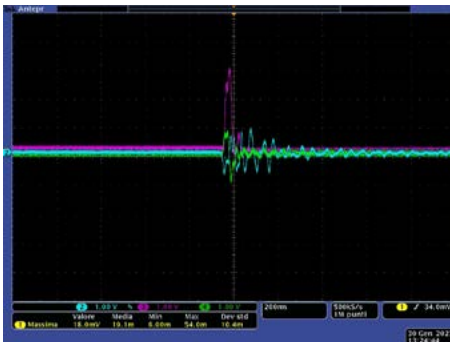


Figura 4 Accelerazione misurata nelle tre direzioni in seguito ad un impulso.

Figure 4 Acceleration measured in three directions following an impulse.

3. Acquisizione dei terremoti sperimentali

Per l'acquisizione dei segnali accelerometrici generati da *Foamquake* è stato progettato e implementato un sistema di condizionamento del segnale comprendente un filtro anti-aliasing, necessario a soddisfare il teorema di campionamento di *Nyquist-Shannon*. Il circuito di condizionamento ha le seguenti funzioni principali:

- realizzazione del filtro *anti-aliasing* mediante una rete passa-basso attiva;
- rimozione della componente continua attraverso un filtro passa-alto attivo, indispensabile per l'impiego di accelerometri MEMS;
- adattamento di livello e offset del segnale mediante due *trimmer*, in modo da garantire compatibilità con un convertitore analogico-digitale (ADC) a range 0–5 V.

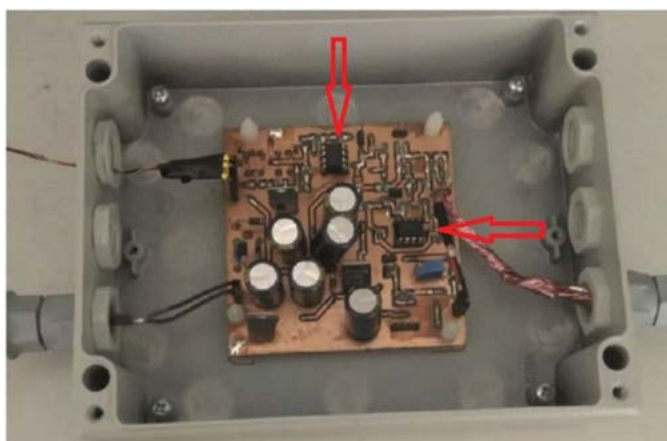
È stato adottato un filtro *Butterworth-Bessel* per privilegiare la linearità di fase e l'integrità della banda passante. Il sistema di acquisizione, a valle del filtro, opera con frequenza di campionamento pari a 1 kHz e risoluzione di 12 bit, corrispondente a una dinamica teorica di $[20 \log(2) \cdot 12] + 1,76 = 74$ dB. Alla frequenza di *Nyquist* (500 Hz) il filtro garantisce un'attenuazione superiore a 74 dB. Un filtro a sei poli con frequenza di taglio pari a 30 Hz assicura un'attenuazione pari a

$20 \cdot 6 \cdot \log(500/30) = 146 \text{ dB}$, superiore alla soglia minima richiesta di 74 dB. Un filtro a sei poli con frequenza di taglio pari a 60 Hz assicura un'attenuazione pari a $20 \cdot 6 \cdot \log(500/60) = 110,5 \text{ dB}$, ancora superiore alla soglia minima richiesta. Vedremo successivamente il motivo per il quale il filtro è stato progettato per funzionare con due frequenze di taglio diverse. La scelta di un ordine pari a sei consente la compatibilità con ADC fino a 18 bit ($\approx 108 \text{ dB}$).

3.1 Versione pilota del filtro

Il prototipo iniziale del filtro è stato assemblato in un contenitore metallico schermato per minimizzare i disturbi elettromagnetici (Figura 5).

Figura 5 Filtro all'interno della scatola metallica.
Figure 5 Filter inside the metal box.



I componenti fondamentali di questo filtro sono i due amplificatori operazionali LM358, evidenziati nella scatola con le frecce. La figura successiva (Figura 6) mostra lo schema elettrico del filtro.

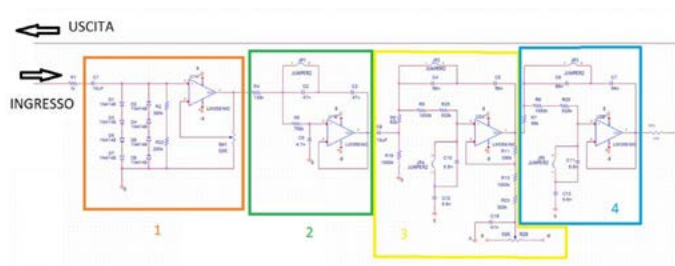


Figura 6 Schema elettrico del filtro.
Figure 6 Electrical diagram of the filter.

Nello schema elettrico i due amplificatori LM358 vengono mostrati evidenziando gli operazionali che li costituiscono, U1A/U1B e U2A/U2B. Questi quattro operazionali in sequenza implementano un filtro passa-alto del 1° ordine seguito da tre filtri Sallen-Key passa-basso del 2° ordine. Nel primo blocco è presente, a parte i diodi di protezione, un filtro attivo passa-alto del primo ordine in configurazione non invertente (Figura 7).

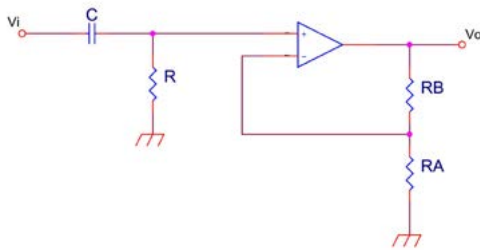


Figura 7 Filtro attivo passa-alto del primo ordine in configurazione non invertente.

Figure 7 First-order active high-pass filter in non-inverting configuration.

Il valore $1/RC$ corrisponde a ω_0 , frequenza di taglio del filtro, che nel nostro caso vale 0,2 Hz. Il filtro realizza così il passa-alto in ingresso che blocca la componente di corrente continua in modo da rendere possibile l'uso degli accelerometri MEMS. I resistori R_B e R_A corrispondono, nella realtà, al potenziometro R41, che permette di regolare il guadagno del filtro.

Nei tre blocchi successivi sono presenti tre filtri *Sallen-Key*, (Figura 8). Il potenziometro R39 nel blocco 3 è previsto per introdurre un *offset* in uscita, utile per permettere l'interfacciamento ad ADC unipolari.

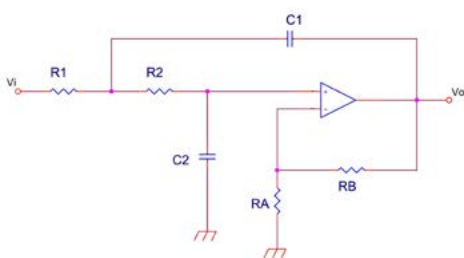


Figura 8 Filtro attivo passa-basso del secondo ordine in configurazione non invertente.

Figure 8 Second order active low-pass filter in non-inverting configuration.

La scelta dei parametri in ognuno di questi tre filtri è tale da produrre, complessivamente, un passa-basso del 6° ordine *Butterworth-Bessel* con le seguenti caratteristiche:

- guadagno complessivo: 15;
- banda passante: -20 dB @ 40 Hz;
- banda di reiezione: -70 dB @ 100 Hz.

La simulazione SPICE [6] condotta su un filtro con taglio a 30 Hz eccitato da gradino di 2V ha fornito una risposta coerente con le previsioni di progetto (Figura 9).

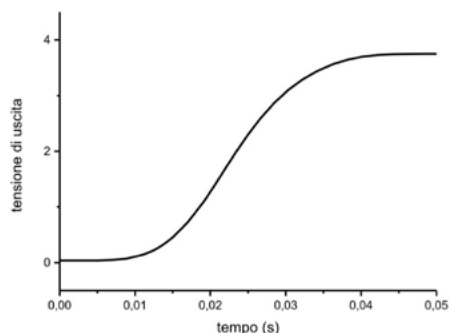


Figura 9 Risposta teorica del filtro eccitato con un gradino in ingresso di intensità 2V.

Figure 9 Theoretical response of the filter excited with an input step of 2V intensity.

3.2 Versione finale del filtro

Il sistema finale prevede l'acquisizione simultanea di cinque accelerometri triassiali, per un totale di quindici canali. Ogni filtro è realizzato su PCB dedicato; tre filtri sono raggruppati su una scheda madre (*motherboard*), che include anche lo stadio di stabilizzazione dell'alimentazione. Sono necessarie cinque *motherboard* per la gestione complessiva dei sensori.

3.2.1 Filtro

Il circuito base (Figura 10) è equivalente a quello del prototipo (Figura 5), con differenze limitate alla disposizione dei componenti.



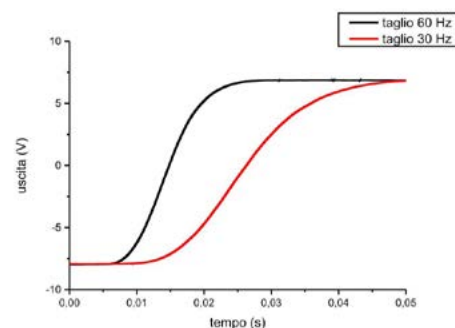
Figura 10 Filtro passa-basso.

Figure 10 Low-pass filter.

Tramite connettore a 5 *pin* è fornita l'alimentazione (massa e ± 8 V). Inoltre viene fornito in ingresso il segnale prodotto dall'accelerometro e prelevato in uscita il segnale filtrato dal passa-basso. Due *trimmer* regolano guadagno e *offset* in uscita. La frequenza di taglio è selezionabile: il valore nominale di 30 Hz è ottenuto tramite *jumper*; la loro rimozione raddoppia la frequenza di taglio a 60 Hz. Le risposte ai gradini unitari per le due configurazioni sono riportate in Figura 11.

Figura 11 Confronto risposta filtro con taglio a 60Hz e filtro con taglio a 30Hz.

Figure 11 Comparison of filter response with 60Hz cutoff and filter with 30Hz cutoff.



Il confronto tra risposta simulata (SPICE, rosso) e misura reale a 60 Hz (nera), è mostrato, con ottimo accordo, nella figura successiva.

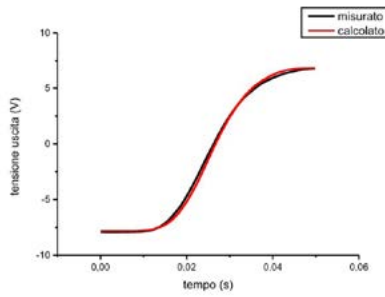


Figura 12 Confronto risposta filtro con taglio a 30Hz e risposta teorica fornita da SPICE.

Figure 12 Comparison of filter response with cutoff at 30Hz and theoretical response provided by SPICE.

3.2.2 Motherboard

La *motherboard* (Figura 13) ospita tre moduli filtro indipendenti e dispone di regolatori e condensatori per la stabilizzazione locale delle tensioni di alimentazione (± 8 V per i filtri e 3,3 V per l'accelerometro).

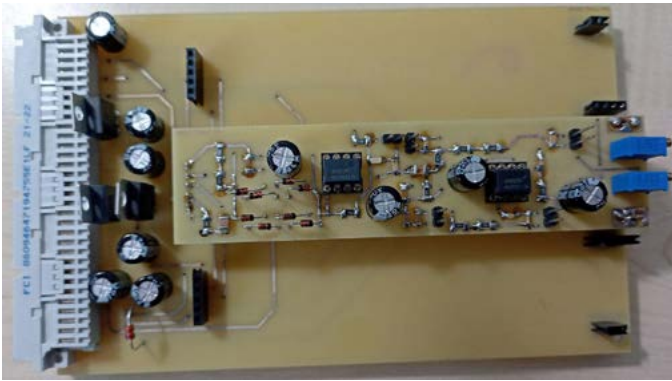


Figura 13 Motherboard con uno dei tre filtri montato e l'alloggiamento per altri due filtri.

Figure 13 Motherboard with one of the three filters mounted and the housing for two more filters.

Attraverso il connettore a 64 pin transitano:

- ingressi: massa e ± 12 V;
- uscite: segnali filtrati delle accelerazioni (tre per scheda), alimentazione 3,3 V per accelerometro.

Nella Figura 14 viene mostrato il retro della *motherboard*.

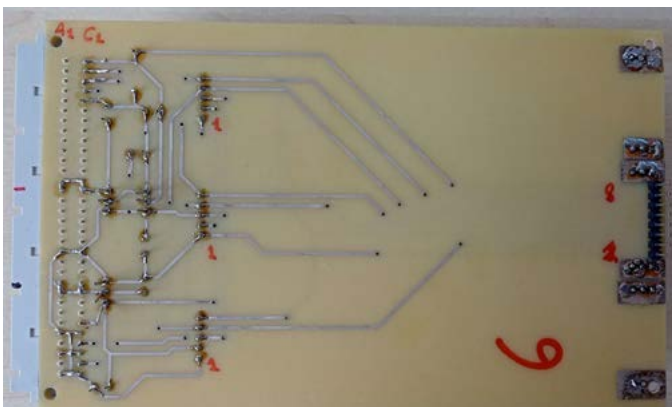


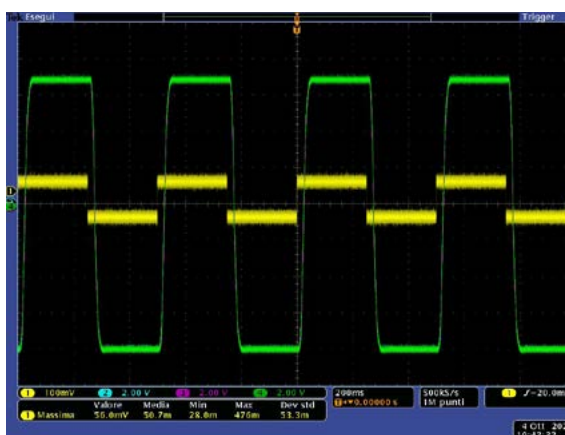
Figura 14 Retro della motherboard.

Figure 14 Motherboard's back.

- in uscita la tensione 3.3 V e la massa che alimentano l'accelerometro;
- in ingresso i segnali prodotti dall'accelerometro prima di essere elaborati dal filtro;
- in uscita i segnali prodotti dall'accelerometro dopo essere stati elaborati dal filtro.

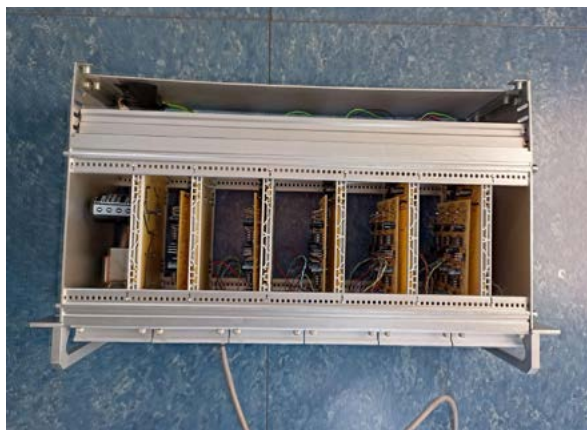
Il corretto funzionamento e l'identità delle tre catene di filtraggio sono verificati in Figura 15 che mostra la perfetta sovrapposizione delle risposte all'onda quadra di intensità 100 mV e frequenza 2 Hz.

Figure 15 Three filters' response, 30 Hz cutoff, mounted on the motherboard to the same input signal.



Le *motherboard* sono in formato *Eurocard* (100 × 160 mm) e alloggiato in *subrack* (Figura 16), dotato di guide per il fissaggio verticale delle schede. Sono presenti sei schede: cinque di acquisizione e una di alimentazione.

Figura 16 Subrack con 6 schede inserite al suo interno.
Figure 16 Subrack with 6 cards inserted inside.



Sul retro di ciascuna scheda si trova il connettore a 64 *pin*, a sinistra in Figura 13, da cui vengono prelevati i segnali prodotti dall'accelerometro dopo il filtraggio. I segnali filtrati, quindici in totale, più la massa convergono su un connettore DB25 fissato sul retro del *subrack* (Figura 17).

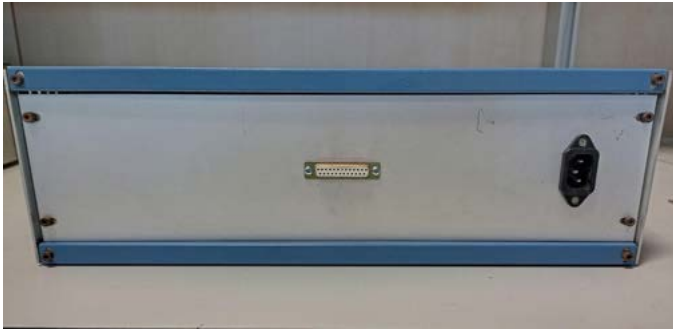


Figura 17 Retro del *subrack*, a sinistra il connettore DB25, a destra il connettore dell'alimentazione.

Figure 17 Back of the *subrack*, on the left the DB25 connector, on the right the power connector.

Il frontale del *subrack* (Figura 18) è suddiviso in sei sezioni, estraibili in maniera indipendente una dall'altra, di cui una, quella relativa all'alimentazione, non accessibile dall'esterno.



Figura 18 Frontale del *subrack*.

Figure 18 Front of the *subrack*.

Ognuno dei cinque frontalini è dotato di sei fori e di un connettore circolare a 8 *pin*, di cui avevamo già parlato nel paragrafo 3.2.2, ed è associato a uno dei cinque accelerometri attivi contemporaneamente. I fori permettono di regolare i *trimmer*, due per filtro come mostrato a destra nella Figura 13, che controllano il guadagno e l'*offset* per ogni componente x, y, z dell'accelerometro associato alla scheda. Il connettore circolare a 8 *pin*, invece, è collegato al connettore *berg* a 8 *pin* che abbiamo visto in Figura 14. Attraverso questo connettore transitano:

- in uscita la massa e la tensione che alimenta l'accelerometro;
- in ingresso i segnali delle accelerazioni prodotte dall'accelerometro;
- in uscita i segnali delle accelerazioni elaborati dal filtro passa-basso.

La Figura 19 mostra il collegamento tra il *berg* a 8 *pin* della *motherboard* e il connettore circolare a 8 *pin* del frontalino estraibile.

3.2.4 Alimentazione

La scheda di alimentazione, non accessibile dall'esterno, include un trasformatore 12 VA (primario 230 V, secondario 12 V AC $\times 2$), un raddrizzatore a ponte e i regolatori di tensione; fornisce al *subrack* i livelli ± 12 V necessari al funzionamento delle *motherboard* (Figura 20).

Figura 19 Motherboard con frontalino.
Figure 19 Motherboard with front panel.

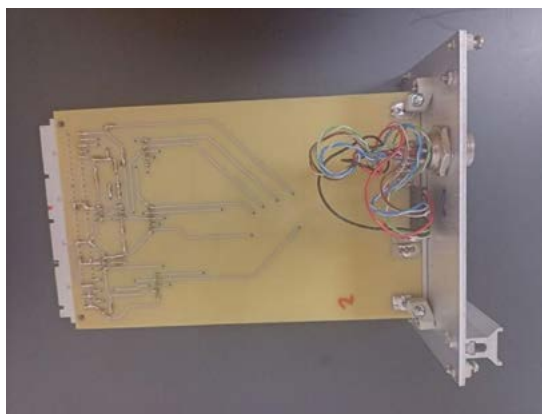


Figura 20 Scheda dell'alimentazione.
Figure 20 Power supply board.



4. Messa a punto dell'esperimento

Cinque accelerometri sono stati posizionati sulla superficie del cuneo di gommapiuma mostrato nella Figura 21 in cui è visibile anche la puleggia che, azionata da un motore, controlla lo spostamento costante del telo di nylon.

Figura 21 Accelerometri posizionati sulla superficie del cuneo di gommapiuma e puleggia che muove il telo di nylon.

Figure 21 Accelerometers placed on the foam wedge and pulley that moves the nylon sheet.



In prossimità delle *patch* di riso, il cuneo in gommapiuma risulta frizionalmente accoppiato con la superficie sottostante, accumulando stress elastico durante le fasi di caricamento intersismico. Quando lo sforzo di taglio all'interfaccia supera una soglia critica, si innesca un'instabilità frizionale (terremoto sperimentale) che comporta il rilascio improvviso dell'energia elastica accumulata. Le accelerazioni generate da tali eventi vengono registrate in continuo dalla rete

accelerometrica, consentendo, tra le altre applicazioni, la localizzazione dell'ipocentro e la ricostruzione dell'evoluzione spazio-temporale della rottura.

La Figura 22 mostra il *set-up* già illustrato in Figura 1, questa volta durante l'esecuzione di un esperimento. Oltre ai componenti principali già descritti, sono visibili il *rack* contenente i filtri, il *datalogger* PicoLog 1216 (che verrà approfondito nel capitolo successivo) e un PC dedicato all'acquisizione dei dati.

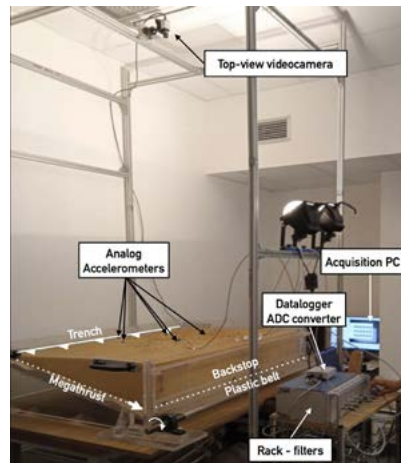


Figura 22 Esperimento in corso.

Figure 22 Experiment in progress.

5. Risultati ottenuti

Gli accelerometri sono stati collegati a un *datalogger* della serie *PicoLog 1000*, un sistema multicanale di acquisizione e registrazione di tensioni progettato per un'ampia gamma di applicazioni. Considerata la necessità di acquisire tre segnali per accelerometro (per un totale di 15 segnali), è stato adottato il modello *PicoLog 1216*, che dispone di 16 canali e di una risoluzione di 12 *bit* (Figura 23).



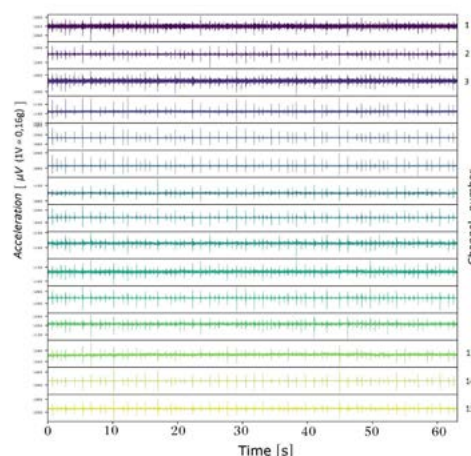
Figura 23 PicoLog 1216 collegato attraverso morsetti al connettore DB25 sul retro del *subrack*.

Figure 23 PicoLog 1216 connected via terminal block to the DB25 connector on the rear of the *subrack*.

La morsettiatura esterna, collegata al connettore a 25 vie del *datalogger*, è dotata di terminali a vite che consentono il fissaggio diretto dei cavi dei sensori, eliminando la necessità di saldature. La Figura 24 mostra una panoramica dell'accelerazione acquisita dal *PicoLog* sui 15 canali presenti all'interno del *subrack*. In particolare, è riportato un esempio di registrazione ottenuta con 5 accelerometri su un intervallo di 65 s, relativo a un modello caratterizzato dalla presenza

di una singola asperità sismogenetica con dimensioni di 40 cm lungo il *trench* e 30 cm nella direzione ortogonale al *trench*. In questo intervallo temporale si possono riconoscere circa 60 eventi. La componente ortogonale al *trench* (canali 2, 5, 8, 11, 14) presenta il rapporto segnale/ rumore più elevato, come atteso, poiché la convergenza imposta è puramente ortogonale al *trench*. I singoli eventi sismici analogici si manifestano come picchi distinti nel tracciato. L'analisi evidenzia come i dati accelerometrici consentano di identificare un comportamento quasi-periodico dei terremoti analogici, caratterizzati da un tempo di ritorno intersismico medio di circa 1,5 s. Tale valore risulta coerente con le stime indipendenti ottenute dall'elaborazione delle immagini acquisite con la fotocamera ad alta risoluzione [Mastella et al., 2022b], evidenziando l'efficacia del sistema di misura accelerometrico.

Figura 24 Accelerazioni acquisite dal PicoLog.
Figure 24 Acceleration signals acquired by PicoLog.



Nella Figura 25 è riportato un segmento di 20 secondi, selezionato casualmente da un'acquisizione effettuata durante lo stesso esperimento. L'evento cerchiato è stato ingrandito scegliendo il canale con il miglior rapporto segnale/rumore, in modo da evidenziarne i dettagli e mettere in risalto la qualità del sistema di acquisizione. Data la frequenza di campionamento degli accelerometri di 1 kHz, è possibile raccogliere fino a 50 campioni per ciascun evento cosismico, rispetto ai soli 2–3 fotogrammi ottenibili con il sistema di acquisizione della fotocamera ad alta risoluzione, che opera a 50 Hz. Questo garantisce una risoluzione temporale significativamente più elevata, consentendo una caratterizzazione più accurata della dinamica degli eventi. L'intervallo caratteristico di frequenze delle instabilità di *Foamquake* è simile a quello osservato nei modelli analogici [Kosari et al., 2022], in cui le instabilità frizionali si sviluppano all'interno di uno strato di riso, analogamente a quanto avviene in *Foamquake*, sebbene il prisma superiore analogo sia costituito da un materiale differente. Per la rilevazione dei terremoti analogici è stato utilizzato un metodo di base come l'approccio STA/LTA (*Short Time Average to Long Time Average*), che calcola il rapporto tra l'energia media a breve termine e quella a lungo termine nel segnale continuo. Confrontando queste due medie, il metodo consente di individuare variazioni significative nell'energia del segnale, indicative della presenza di eventi sismici.

Considerate le velocità relativamente basse con cui le onde elastiche si propagano all'interno della gommapiuma, 30 m/s per le onde di compressione P [Mastella et al., 2021], questa configurazione consente una chiara identificazione dell'onda di compressione in ciascun sensore, che si manifesta con tempi di arrivo differenziati. L'analisi dei tempi di primo arrivo nei vari sensori ha quindi reso possibile la localizzazione della sorgente lungo il piano di faglia. La Figura 26 mostra un esempio della localizzazione di un terremoto sperimentale ottenuto utilizzando cinque accelerometri. L'ipocentro dell'evento è stato determinato attraverso una ricerca a griglia variando la sorgente ipotetica lungo un punto della faglia analogica e minimizzando la norma L2 della differenza tra i

tempi di arrivo teorici dell'onda P e quelli osservati per tutte le 10 possibili combinazioni di coppie di accelerometri (i, j) assumendo un valore costante di velocità delle onde P nella gommapiuma. Il valore della norma L2 per questo evento è rappresentato nell'immagine di Figura 26 come $L2(x, y)$. Il confronto tra gli ipocentri stimati dai dati degli accelerometri e i dati di deformazione superficiale quasi-statici ottenuti tramite tecniche l'applicazione della tecnica PIV alle immagini acquisite dalla fotocamera posizionata al di sopra del modello, consente di analizzare in dettaglio il rapporto tra deformazione sismica e asismica (ottenuta da dati geodetici) che caratterizza il processo di enucleazione dei terremoti sperimentali.

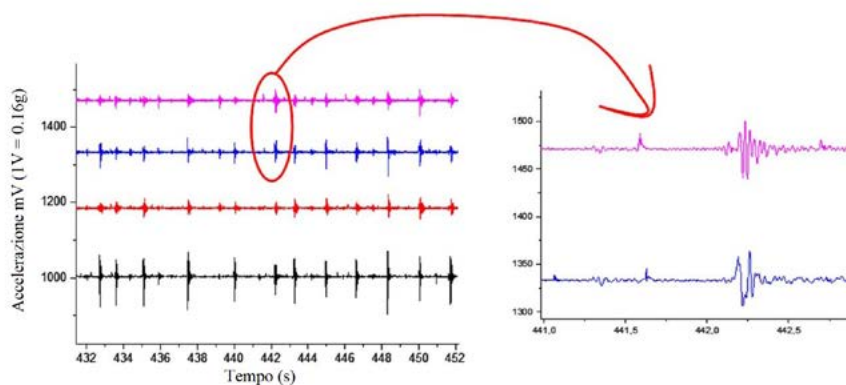


Figura 25 Dettaglio dell'evento selezionato.

Figure 25 Zoom of the selected event.

La mappa riporta i valori della norma L2 ottenuti dal confronto tra tempi teorici e osservati per ciascun punto lungo la faglia. La stella rossa indica la posizione dell'ipocentro, corrispondente al minimo di L2, mentre i rettangoli neri rappresentano la proiezione superficiale delle asperità artificiali (*patch* di riso) posizionate sul *megathrust* analogico. Il confronto tra gli ipocentri ricavati dai dati accelerometrici e la deformazione quasi-statica stimata tramite analisi PIV delle immagini acquisite dall'alto consente di indagare il rapporto tra deformazione sismica e asismica, fornendo nuove informazioni sulla fase di nucleazione dei terremoti sperimentali.

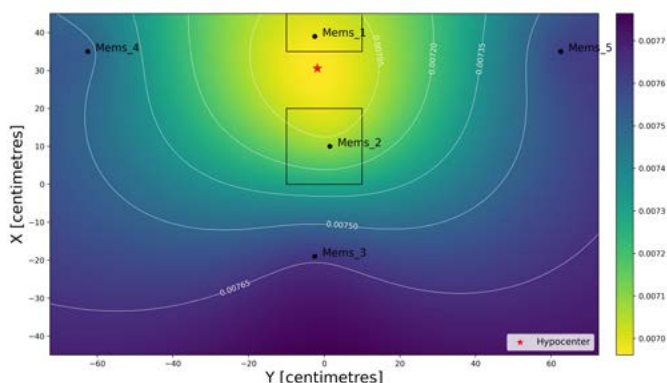


Figura 26 Mappa di localizzazione di un terremoto analogico generato in Foamquake.

Figure 26 Location map of an analog earthquake generated in Foamquake.

6. Considerazioni finali

Il monitoraggio del modello *Foamquake* è stato inizialmente realizzato mediante acquisizione ottica ad alta risoluzione, con analisi velocimetrica basata su PIV. Tale metodologia, pur fornendo informazioni quantitative sul campo di spostamento superficiale, presenta limitazioni intrinseche legate al frame rate delle videocamere commerciali impiegate, che non consentono una caratterizzazione completa dei transitori dinamici associati alla nucleazione e alla propagazione rapida degli eventi sismici analogici.

L'integrazione di una rete accelerometrica MEMS nel sistema *Foamquake* ha consentito di superare tali vincoli sperimentali, fornendo misure dirette di accelerazione con risoluzione temporale superiore e ampliando il range dinamico osservabile. Questa configurazione ha permesso di descrivere con maggiore dettaglio i processi di nucleazione e propagazione delle rotture analogiche.

Esperimenti preliminari condotti in configurazione ibrida (accelerometri + acquisizione *top-view*) hanno evidenziato la potenzialità dell'approccio multi-sensore nell'indagare la correlazione tra sismicità continua e scorrimento della faglia a differenti profondità, tematica di rilevante interesse per la sismotettonica. In particolare, l'analisi congiunta dei *dataset* ha mostrato che l'attività sismica registrata in superficie non sempre fornisce univoche informazioni sullo scorrimento profondo, confermando la complessità della relazione tra deformazione sismica e asismica.

Foamquake, pur basandosi su un modello semplificato con ipotesi riduttive rispetto ai sistemi naturali, costituisce un banco di prova efficace per:

- analizzare la relazione spazio-temporale tra microsismicità e deformazione;
- valutare il grado di prevedibilità della cinematica di faglia sulla base di parametri sismici e geodetici;
- testare protocolli di monitoraggio integrati.

In conclusione, l'introduzione della rete accelerometrica ha incrementato significativamente la capacità osservativa del sistema, con particolare riferimento alle fasi di nucleazione e propagazione dei terremoti analogici. I risultati ottenuti aprono prospettive per l'applicazione di metodologie analoghe allo studio dei processi nucleativi e dei meccanismi di propagazione dei *megathrust earthquakes* nelle zone di subduzione. Inoltre, l'approccio multi-sensore fornisce un quadro comparativo utile per valutare l'affidabilità relativa delle osservazioni sismiche e geodetiche, rafforzando la capacità interpretativa nei sistemi naturali.

Bibliografia

- Cascone, V., Boaga, J., Cassiani, G. (2021). *Small Local Earthquake Detection Using Low-Cost MEMS Accelerometers: Examples in Northern and Central Italy*. The Seismic Record, 1 (1): 20–26. <https://doi.org/10.1785/0320210007>
- Corbi, F., Sandri, L., Bedford, J., Funicello, F., Brizzi, S., Rosenau, M., Lellemand, S. (2019). *Machine learning can predict the timing and size of analog earthquakes*. Geophysical Research Letters, 46(3), 1303–1311. <https://doi.org/10.1029/2018GL081251>
- D'Alessandro, A., Greco, L., Scudero, S., Siino, M., Vitale, G., D'Anna, R., Di Gangi, F., Nicolosi, D., Passafiume, G., Speciale, S., Catania, M., Cosenza, P., Foresta Martin, L., Patanè, D., Martorana, R., Rao, S., & Stramondo, S. (2019). *Sviluppo di una stazione sismica low-cost basata su tecnologia MEMS*. Quad. Geofis., 153: 1-60. <https://doi.org/10.13127/QDG/153>
- Day, S., Gonzales, S., Anooshehpour, R., Brune, J. (2008). *Scale-Model and Numerical Simulations of Near-Fault Seismic Directivity*. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(3),

1186–1206. <https://doi.org/10.1785/0120070190>

- Kosari, E., Rosenau, M., Ziegenhagen, T., Oncken, O. (2022). *Upper Plate Response to a Sequential Elastic Rebound and Slab Acceleration During Laboratory-Scale Subduction Megathrust Earthquakes*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(9). <https://doi.org/10.1029/2022JB024143>
- Mastella, G., Corbi, F., Funiciello, F., Rosenau, M., Rudolf, M., Kosari, E. (2021). *Properties of rock analogue materials used for foamquake: A novel seismotectonic analog model mimicking the megathrust seismic cycle at RomaTre university (Italy)*. *GFZ data Services*. 2021. <https://doi.org/10.5880/fidgeo.2021.047>
- Mastella, G., Corbi, F., Funiciello, F., Rosenau, M. (2022a). *Foamquake: A novel analog model mimicking megathrust seismic cycles*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3). <https://doi.org/10.1029/2021JB022789>
- Mastella, G., Corbi, F., Bedford, J., Funiciello, F., Rosenau, M. (2022b). *Forecasting surface velocity fields associated with laboratory seismic cycles using Deep Learning*. *Geophysical Research Letters*, 49(15). <https://doi.org/10.1029/2022GL099632>
- Saunders, J.K., Goldberg, D.E., Haase, J.S., Bock, Y., Offield, D.G., Melgar, D., Restrepo, J., Fleischman, R.B., Nema, A., Geng, J., Walls, C., Mann, D., Mattioli, G.S. (2016). *Seismogeodesy Using GPS and Low-Cost MEMS Accelerometers: Perspectives for Earthquake Early Warning and Rapid Response*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (6): 2469–2489. <https://doi.org/10.1785/0120160062>
- Tanircan, G., Alcik, H., Beyen, K. (2018). *Reliability of MEMS accelerometers for instrumental intensity mapping of earthquakes*. 2017, *Ann. Geophys.* 2018, 60 (6 Sup), SE673. <https://doi.org/10.4401/ag-7501>

Sitografia

- [1] <https://www.ansys.com/it-it/simulation-topics/what-are-mems-devices>
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Megathrust_earthquake
- [3] <https://safran-navigation-timing.com/solution/mems-accelerometers/>
- [4] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl354_adxl355.pdf
- [5] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/EVAL-ADXL354-355-UG-1030.pdf>
- [6] <https://it.wikipedia.org/wiki/SPICE>



QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/qdg/it/index/>

QUADERNI di GEOFISICA è una rivista scientifica che pubblica dati, misurazioni e osservazioni geofisiche (anche preliminari) in italiano e inglese. L'obiettivo è una diffusione rapida e gratuita per la comunità scientifica, garantita da un processo di peer-review e da un Editorial Board multidisciplinare. La rivista è inclusa in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics e "Open Access Journals" di Scopus, e adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

QUADERNI di GEOFISICA is a scientific journal that publishes geophysical data, measurements and observations, including preliminary results, in Italian and English. Its aim is to ensure rapid and free dissemination to the research community, supported by a peer-review process and by a multidisciplinary Editorial Board. The journal is included in the Emerging Sources Citation Index of Clarivate Analytics and it's included in the Open Access journals of Scopus. It follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/rt/it/index>

RAPPORTI TECNICI INGV è una rivista tecnico-scientifica che mette in mostra le numerose attività tecnologiche e di ricerca condotte dai ricercatori e tecnici INGV, e non solo. Pubblicata in italiano e inglese, RAPPORTI TECNICI INGV è ideata per valorizzare anche quei lavori che offrono un contributo significativo dal punto di vista tecnico, operativo o documentale fondamentale per lo sviluppo dell'Ente. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

RAPPORTI TECNICI INGV is a technical-scientific journal that showcases the wide range of technological and research activities carried out by INGV researchers and technical staff, as well as by external contributors. Published in Italian and English, RAPPORTI TECNICI INGV is designed to highlight works that provide a significant contribution from a technical, operational, or documentary perspective, and that are essential to INGV development. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.



MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

<https://collane-editoriali.ingv.it/index.php/mi/it/index>

MISCELLANEA INGV rappresenta una tipologia di editoria non tradizionalmente catalogabile nelle ordinarie riviste scientifiche di settore. Pubblicata in lingua italiana e inglese, MISCELLANEA INGV offre uno spazio per la pubblicazione di materiali eterogenei che, pur non rientrando nei formati più strutturati delle altre Collane editoriali INGV, rivestono un interesse scientifico, tecnico o divulgativo. La rivista adotta il modello Diamond Open Access, che non prevede costi né per gli autori né per i lettori.

MISCELLANEA INGV represents a form of publishing that cannot be classified within the standard scientific journals. Published in Italian and English, MISCELLANEA INGV provides a venue for the publication of heterogeneous materials that are of scientific, technical or outreach interest, even though they do not fall within the more structured formats of the other INGV editorial series. The journal follows the Diamond Open Access model, with no charges for either authors or readers.

Progetto grafico
Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Ufficio Editoriale
Francesca DI STEFANO | Coordinatore

Segreteria di redazione
segreteria.collane-editoriali@ingv.it

Editing | Produzione | Grafica redazionale
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

© 2026 the Author(s). All rights reserved. Open Access



Creative Commons Attribution 4.0 International

