

Rapporti tecnici

INGV

**Monitoraggio del Pontelungo (Bologna)
durante l'esplosione controllata di un
ordigno bellico**

359



Direttore Responsabile

Silvia MATTONI

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



Rapporti tecnici

INGV

MONITORAGGIO DEL PONTELUNGO (BOLOGNA) DURANTE L'ESPLOSIONE CONTROLLATA DI UN ORDIGNO BELLICO

Lucia Zaccarelli¹, Romano Camassi¹, Gilberto Saccorotti², Silvia Pondrelli¹, Adriano Cavaliere¹,
Arianna Pesci¹, Fabiana Loddo¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa)

359

Indice

Introduzione	7
1. Il Pontelungo	7
2. Monitoraggio sismico	9
2.1 Dati	9
2.2 Analisi temporale: l'esplosione	10
2.3 Analisi spettrale: il ponte	12
3. Rilievo con laser scanner terrestre	15
4. Conclusioni	16
Ringraziamenti	17
Bibliografia	17

Introduzione

Durante la preparazione dei cantieri per i lavori di consolidamento del Pontelungo, in via Emilia Ponente a Bologna (luglio 2015), è stata ritrovata una bomba americana della Seconda Guerra mondiale nell'alveo del fiume Reno. Il pessimo stato di conservazione dell'ordigno non ne ha permesso il trasferimento in luogo più isolato, costringendo quindi il Comune di Bologna ad organizzare le operazioni di brillamento in loco, ovvero in piena area metropolitana (Fig. 1). L'ordigno era un residuo bellico del peso di 100 libbre, ancora attivo e carico con 30 kg di tritolo.

I militari dell'esercito hanno effettuato i lavori per la realizzazione sia di una struttura di contenimento (una piramide di metallo e sabbia) che di trinceramenti, atti a contenere gli effetti dell'esplosione. La data per la detonazione dell'ordigno è stata fissata per la domenica 23 agosto 2015. Per quel giorno il Comune di Bologna ha dovuto organizzare l'evacuazione di quasi 5000 residenti in un'area di 500 m di raggio intorno alla bomba (Fig. 1), dalle 9:00 della mattina fino a fine operazioni.

Sotto richiesta dell'ufficio Protezione Civile del comune di Bologna l'INGV è stato coinvolto nel monitoraggio delle operazioni di deflagrazione. Considerando il ponte come maggiore punto di interesse abbiamo applicato due tecniche di rilevamento indipendenti per il monitoraggio della struttura prima durante e dopo l'esplosione: una sismologica e l'altra distanziometrica tramite laser scanner.

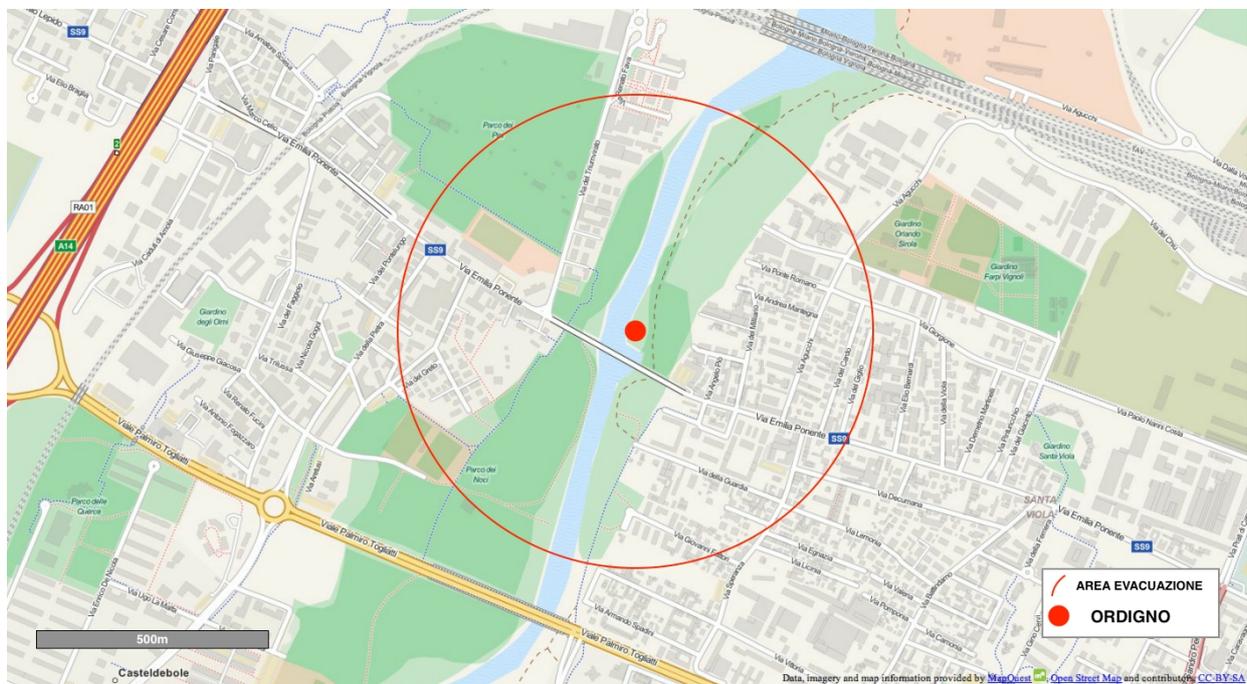


Figura 1. Mappa dell'area metropolitana di Bologna interessata dall'evacuazione (circonferenza rossa), e posizionamento della bomba (cerchio rosso) a un centinaio di metri dal Pontelungo che permette l'attraversamento sul fiume Reno.

1. Il Pontelungo

Il Pontelungo garantisce il passaggio sopra al fiume Reno lungo la via Emilia Ponente. Famoso a Bologna e citato anche nel titolo di un romanzo storico di Riccardo Bacchelli "Il diavolo al Pontelungo", del 1927 [Bacchelli, 1927].

Il ponte attuale di 15 arcate è stato costruito fra il 1878 ed il 1880 su un progetto di Adriano Panighi in sostituzione di un precedente "Ponte nuovo sul Reno" (Fig. 2), realizzato su 21 arcate (intorno al 1257) e ripetutamente danneggiato soprattutto dalle violente piene del Reno di cui una, nel 1771, distrusse due arcate. Un precedente "Ponte Lungo detto di Reno" era stato realizzato dai romani circa 130 m più a valle dell'attuale, su 18 arcate.

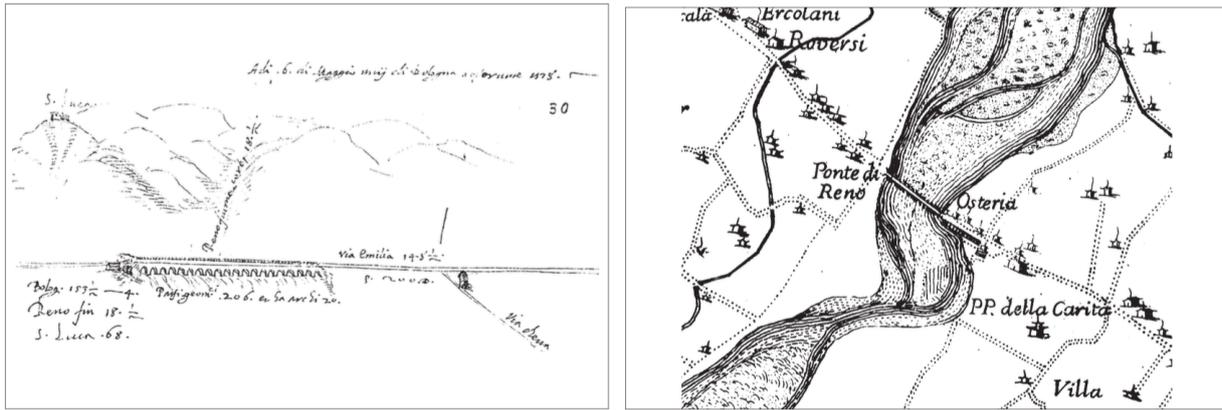


Figura 2. Il “Ponte nuovo sul Reno” nel disegno di Egnazio Danti del 1578 e nella carta della pianura bolognese di Andrea Chiesa del 1740-1742 [IBC, 2003].

Anche la costruzione più recente, come la precedente, è stata danneggiata ripetutamente dalle piene del fiume Reno, fra cui quella del 1893 e ogni volta riparata. Durante il secondo conflitto mondiale, fra il 1944 e il 1945, è stata presa di mira più volte dai bombardamenti aerei, e in particolare da quelli del 14 ottobre 1944, senza però essere distrutta. I numerosi interventi di riparazione, consolidamento e i rimaneggiamenti che ha subito nel corso del tempo sono visibili anche nell'estrema eterogeneità dei materiali costruttivi ben visibili, che spaziano dalla pietra ai mattoni, dall'acciaio al cemento armato, sino al marmo degli elementi decorativi delle spallette.

Il Pontelungo si estende per poco più di 300 m, ad una distanza di un centinaio di metri dalla posizione in cui è stato ritrovato l'ordigno bellico (Fig. 1 e 3).

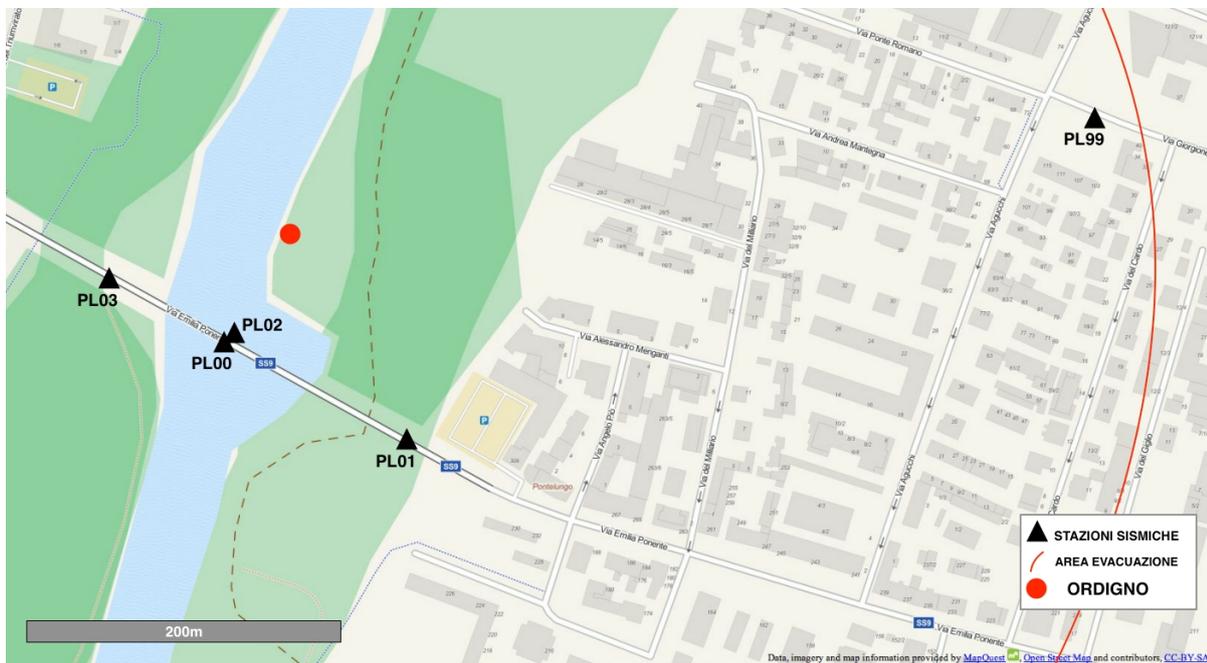


Figura 3. a) Zoom della mappa in Fig. 1 con la posizione delle 5 stazioni sismiche (triangoli neri affiancati dal nome della stazione) rispetto alla posizione della bomba (cerchio rosso). L'arco di cerchio rosso mostra il confine della zona di evacuazione.

2. Monitoraggio sismico

In collaborazione con la sezione INGV di Pisa, il monitoraggio sismico è stato effettuato mediante 5 stazioni sismiche installate sopra ed intorno al Pontelungo per tutta la durata dell'evacuazione.

2.1 Dati

Le 5 stazioni utilizzate sono dei sensori Guralp CMG-6TD a 3 componenti con banda di sensibilità estesa nell'intervallo 0.033-100 Hz. Questi strumenti risultano particolarmente adatti a esperimenti di questo genere per l'alta portabilità e la rapidità con cui si possono posizionare ed azionare. Abbiamo installato tre stazioni sul ponte, due in corrispondenza delle estremità (PL01 e PL03) e una al centro (PL02). La quarta stazione è stata posizionata sotto il ponte ai piedi del pilone centrale (PL00, quasi in asse con la stazione di metà ponte), e l'ultima stazione in un giardino privato a circa 500 m di distanza dalla bomba, al confine della zona di evacuazione (PL99), come mostrato in Fig. 3, e riportato in Tab. 1. Quest'ultima stazione PL99, grazie alla sua posizione remota rispetto alla struttura del ponte è da considerarsi come stazione di riferimento.

Stazione	Long [km]	Lat [km]	D [m]	Δt_{obs} [s]	Δt_{teo} [s]	V_{max} [$\mu\text{m/s}$]	d^* [$\text{m/kg}^{1/3}$]
PL00	682.2328	4931.0708	109.6254	0.17	0.18	$0.72 * 10^4$	35.28
PL01	682.3332	4931.0357	159.1487	0.28	0.26	$0.80 * 10^4$	51.22
PL02	682.2366	4931.0786	101.1510	0.17	0.16	$1.90 * 10^4$	32.55
PL03	682.1639	4931.1171	113.2397	0.20	0.18	$2.22 * 10^4$	36.44
PL99	682.7249	4931.2248	467.3111	0.76	0.76	$0.12 * 10^4$	150.39

Tabella 1. Coordinate delle stazioni in UTM (zona 32 N), km, e distanza D in m dalla posizione dell'ordigno: 682.260 E; 4931.177 N (km). La quinta e sesta colonna riportano la differenza nei tempi di arrivo dell'onda sismica rispetto all'onda acustica sia osservati (Δt_{obs} ottenuto dai pickings delle forme d'onda) che calcolati sulla base dei tempi osservati alla stazione di riferimento PL99 (Δt_{teo}). Le ultime due colonne invece mostrano la velocità massima misurata dai sismometri (in $\mu\text{m/s}$) e la distanza scalata per la radice cubica dei kg di esplosivo (d^* , in $\text{m/kg}^{1/3}$).

Tutti i sensori hanno registrato in continuo con passo di campionamento 0.01 s (100 sps) dal completamento dell'installazione (09:42 locali), a un'ora circa dopo l'esplosione, avvenuta alle 13:28, ora locale (Fig. 4).

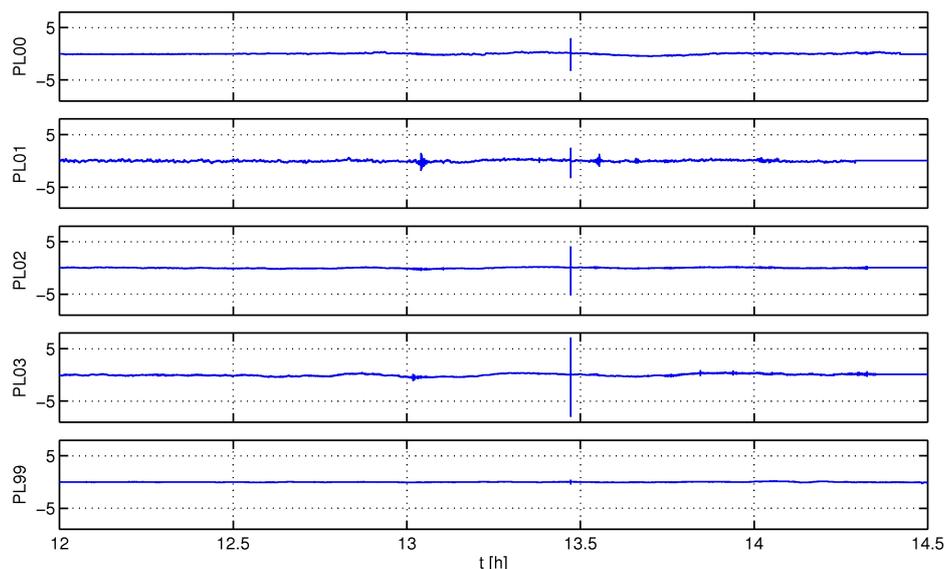


Figura 4. Visione d'insieme delle registrazioni in continuo effettuate dalle 12:00 alle 14:30 locali per le componenti verticali di ognuno dei 5 sensori installati. L'esplosione emerge molto chiaramente dal rumore di fondo caratteristico di ogni sito; a causa della compressione nella scala dei tempi, sembra delineare una linea verticale. L'ultima traccia in basso si riferisce alla stazione di riferimento (la più lontana). Tutte le ordinate riportano i valori registrati su una scala di 10^6 counts, per confronto.

2.2 Analisi temporale: l'esplosione

Lo studio delle tracce sismiche nel dominio temporale ci permette di effettuare un monitoraggio delle operazioni di brillamento e di valutare il risentimento registrato ad ogni sito.

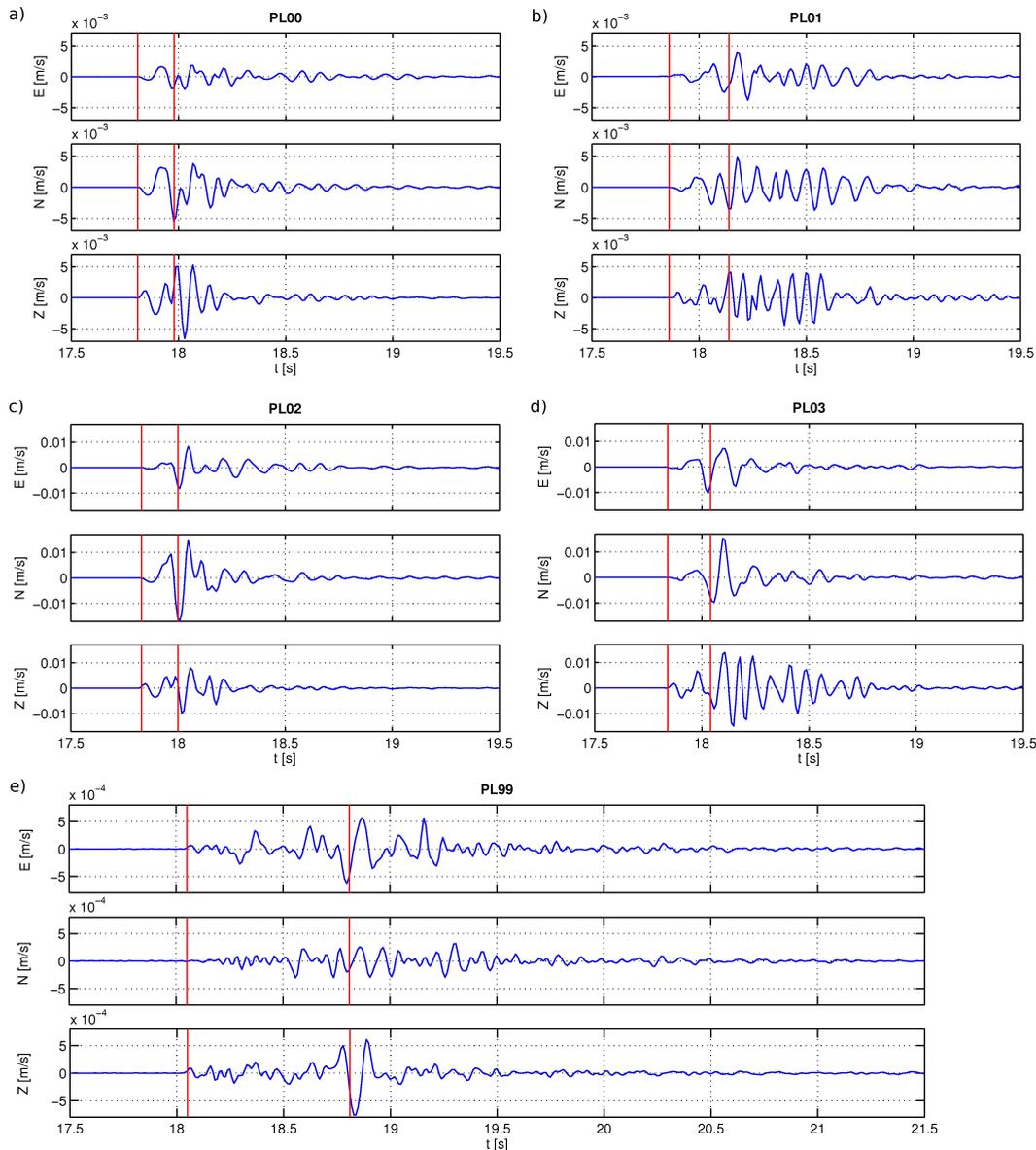


Figura 5. Zoom delle registrazioni sismiche intorno al momento dell'esplosione. Ogni pannello riporta le tre componenti del moto del suolo (rispettivamente E, N e Z dall'alto verso il basso) alle singole stazioni, il cui nome è riportato nel titolo. Si noti che la scala dell'asse y varia dalle stazioni più vicine e posizionate sul ponte (PL02 e PL03, pannelli a) e b)), a quelle alla base del pilone centrale e poco più distante sul ponte (rispettivamente PL00 e PL01, c) e d)), fino alla stazione più distante (PL99, e)). In ascissa sono riportati i secondi a partire dalle 13:28 locali, la scala dei valori è diversa solo per la stazione più lontana PL99. Tutte le tracce sono state filtrate tra 0.2 e 30 Hz.

L'esplosione è avvenuta poco dopo le 13:28 locali (non conosciamo con esattezza il tempo origine, t_0). Il segnale associato al brillamento è visibile distintamente nelle registrazioni di tutte e cinque le stazioni (Fig. 4 e 5) e presenta le caratteristiche tipiche di questo tipo di eventi. È evidente un primo arrivo dell'onda sismica che si propaga verosimilmente a velocità $v_p < 1000$ m/s dato che, per tali brevi distanze, la propagazione avviene negli strati più superficiali di crosta [Aliverti e Solaini, 1950]. Tale arrivo è quasi contemporaneo ($t_p \sim 17.8$ s) alle quattro stazioni più vicine (pannelli a-d in Fig. 5), e precede l'onda acustica

che viaggia nell'atmosfera a velocità $v_a=343$ m/s (a temperatura e pressioni ambientali) e che coincide con il massimo in ampiezza [Albert et al., 2013]. I due differenti arrivi sono stati marcati manualmente su tutti i sismogrammi e, partendo dalla differenza temporale $\Delta t_{obs}=t_a-t_p$ osservata alla stazione di riferimento, abbiamo stimato la velocità delle onde P in superficie che risulta pari a $v_p=775$ m/s. Tale valore è in accordo con le stime di $v_{s30} \sim 400$ m/s effettuate nel vicino comune di Calderara di Reno [Tarabusi, 2015 - comunicazione personale] e del profilo di v_s nei primi 100 m di profondità per i rilievi effettuati dal Comune di Bologna a poco più di 1 km di distanza dall'ordigno [POC Comune di Bologna, 2011]. Sulla base di questo valore abbiamo quindi stimato un tempo origine $t_0 \sim 17.64$ s e i ritardi di tempo teorici tra le due fasi Δt_{teo} per ogni stazione in dipendenza della sua distanza dal luogo del brillamento. Gli sfasamenti temporali teorici sono riportati nell'ultima colonna di Tab. 1 e sono tutti confrontabili con i valori osservati. Le differenze dell'ordine del centesimo di secondo sono ascrivibili al tragitto delle onde sismiche, che non si compie interamente nel terreno per le stazioni del ponte, alle incertezze nella lettura nei tempi di arrivo, alle eterogeneità nella velocità di propagazione delle onde sismiche.

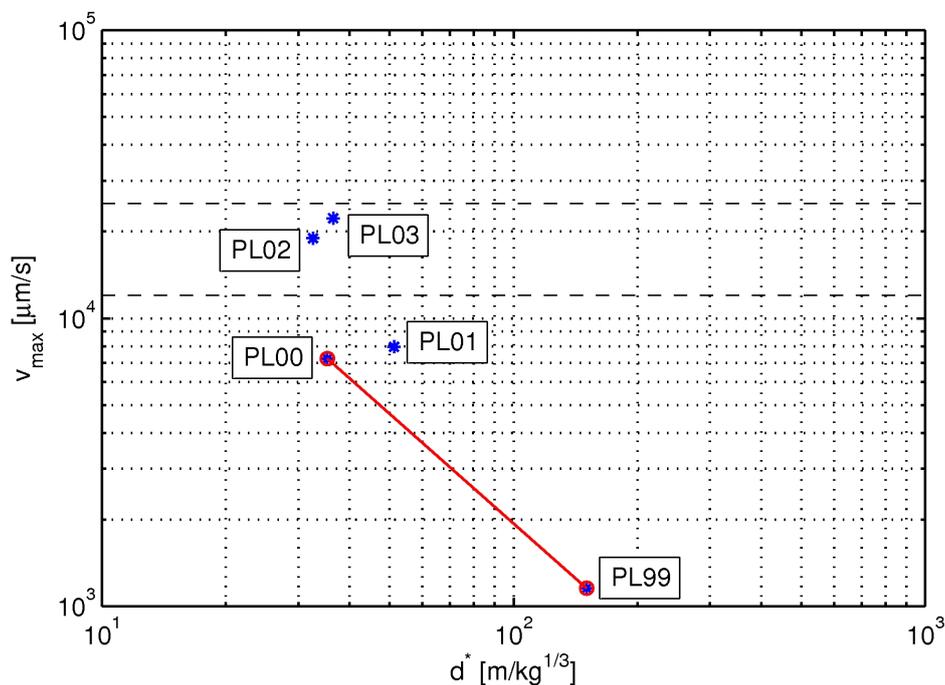


Figura 6. Massima velocità registrata ad ogni stazione in funzione della distanza dalla bomba pesata per i kg di esplosivo. I valori calcolati per le stazioni alla base del ponte e di riferimento sono cerchiati in rosso (collegati dalla rispettiva interpolazione lineare). Le linee orizzontali tratteggiate segnano le due soglie di danno di 12 e 25 mm/s [e.g. Albert et al., 2013].

Per quantificare il risentimento dell'esplosione alle cinque stazioni abbiamo seguito l'approccio di Albert et al. [2013], mettendo in relazione la velocità massima registrata dai sismometri in corrispondenza dell'arrivo dell'onda acustica (calcolata come la somma in quadratura della massima ampiezza osservata alle tre componenti: $v_{max}=(v_Z^2+v_N^2+v_E^2)^{1/2}$) con la distanza dalla bomba pesata per la radice cubica dei kg di esplosivo. Queste due misure sono riportate per ogni stazione nelle ultime due colonne di Tab. 1 e graficate in Fig. 6. Nella figura abbiamo evidenziato con un cerchio rosso le misure relative alle due stazioni posizionate a terra (PL00 alla base del pilone centrale del Pontelungo e PL99 stazione di riferimento lontano dal ponte). Queste due stazioni non risentono dell'amplificazione dovuta alle oscillazioni libere della struttura del ponte e quindi dalle loro tracce si ottengono stime di v_{max} direttamente confrontabili con i valori sperimentali riportati in letteratura. Si nota come le v_{max} ottenute per PL00 e PL99 ricadano ampiamente al di sotto della minima soglia di danno, e come i valori misurati alle stazioni sul ponte siano comunque minori della soglia di danno maggiore. Le due soglie di 12 e 25 mm/s, e.g. Albert et al., [2013], sono riportate come linee orizzontali tratteggiate in Fig.6, e si basano su stime di minimo danno rilevato in strutture abitative di legno (si veda Siskind et al., [1980]) che sono di categoria meno resistente delle costruzioni in mattoni o cemento (tabella A.1 in BS 7385 - 1, [1990]). Scegliamo in modo conservativo, di mantenere questi valori

come riferimento anche se ad una successiva valutazione presentata nel BS 7385 - 2, [1993], la minima soglia di danno viene portata al valore di 15 mm/s per edifici strutturalmente deboli.

I valori di v_{\max} graficati in Fig. 6 si posizionano grossolanamente lungo una retta secondo una legge di potenza del tipo: $v_{\max}=c(d^*)^b$ dove c è una costante e b il tasso di attenuazione sismica. Possiamo quindi stimare b come la pendenza della retta congiungente i punti relativi alle due sole stazioni a terra (escludiamo le altre per evitare bias dovuti all'amplificazione del ponte) e otteniamo $b=-1.3$. Questo valore risulta intermedio tra quelli stimati da Albert et al., [2013] per il cemento (-1.2) e per un terreno boschivo (-1.4), conformemente alla condizione in cui abbiamo condotto l'esperimento in parte lungo l'argine di un fiume e in parte internamente al territorio urbano.

2.3 Analisi spettrale: il ponte

Lo studio degli spettri delle registrazioni sismiche è volto all'individuazione delle frequenze di oscillazione caratteristiche della struttura del ponte, e tramite un confronto tra spettri calcolati prima e dopo l'esplosione si ottiene un riscontro delle eventuali variazioni subite dalla struttura. Nell'eventualità di un danneggiamento del ponte causato dall'esplosione, questo dovrebbe essere facilmente riconoscibile come una variazione nelle frequenze di risonanza della struttura del Pontelungo.

Le finestre temporali su cui condurre l'analisi spettrale sono state selezionate sulla base della stazionarietà del segnale registrato sulle tre componenti. Per effettuare questa selezione, abbiamo calcolato il rapporto STA/LTA [Withers et al., 1998] su finestre di lunghezza 1s e 60 s, rispettivamente. Il rapporto calcolato per ogni stazione è graficato nel tempo in Fig. 7 (pannelli a-e). Si osserva un andamento simile alle stazioni PL00, PL02 e PL03, per tutte le componenti, con un incremento dei valori tra le 13:00 e le 14:00, probabilmente dovuti alle operazioni di movimentazione mezzi e materiali precedenti il brillamento (l'esplosione è marcata dal picco prima del valore 13,5 h del pannello di Fig. 7f che riporta il quadrato delle ampiezze registrate). Invece le stazioni PL01 e PL99 mostrano valori del rapporto STA/LTA che si mantengono piuttosto costanti per tutta la durata della registrazione presumibilmente a causa della loro localizzazione a ridosso del continuo passaggio dei mezzi addetti ai lavori (per PL01) e del traffico cittadino esterno alla zona di evacuazione (PL99). Abbiamo così selezionato due finestre di 30 minuti ciascuna, indicative dei periodi pre- e post- esplosione: 12.4-12.9 h; e 13.7-14.2 h rispettivamente. Risulta subito evidente osservando la Fig. 7, e in particolare l'ultimo pannello, come i due periodi prima e dopo l'esplosione differiscano enormemente per ampiezza del segnale di background e numero di picchi (entrambi in aumento nella finestra post-esplosione). Questo è dovuto al procedimento seguito durante le operazioni di brillamento con poca movimentazione di personale e mezzi prima e moltissima dopo l'esplosione, allo scopo di riportare al più presto l'area evacuata in condizioni di viabilità.

Per ogni porzione di segnale abbiamo calcolato la densità di potenza spettrale (PSD) per le componenti orizzontali (media aritmetica tra le PSD ottenute dalle tracce E e N) e verticale separatamente. Ogni PSD è stata calcolata dalla media di singole stime spettrali ottenute su finestre di 5.12 secondi (512 campioni) all'interno della mezz'ora di riferimento (Fig. 8).

In base a una semplice analisi modale, la frequenza tipica di oscillazione di una struttura corrisponde al picco massimo della densità spettrale (mentre i picchi successivi marcano i modi di oscillazione di ordine superiore, si veda per esempio Au et al., [2013]; Azzara et al., [2016]). Per il Pontelungo il massimo nelle PSD si posiziona tra i 6 e i 7 Hz (picco comune a tutte le stazioni del ponte e più evidente sulla componente orizzontale). Il picco a 10 Hz ben visibile alla stazione PL01 invece può essere interpretato anch'esso come un'oscillazione strutturale, ma ben localizzata, dato che è poco visibile alle stazioni di metà ponte e per nulla su PL03, sita all'estremità opposta. In generale l'andamento delle PSD è piuttosto diverso da una stazione all'altra del ponte (per frequenza e forma del picco), sintomo delle eterogeneità strutturali presenti. La stazione PL99 invece presenta uno spettro più uniforme e simile a rumore bianco distribuito su tutte le frequenze, come prevedibile data la sua localizzazione.

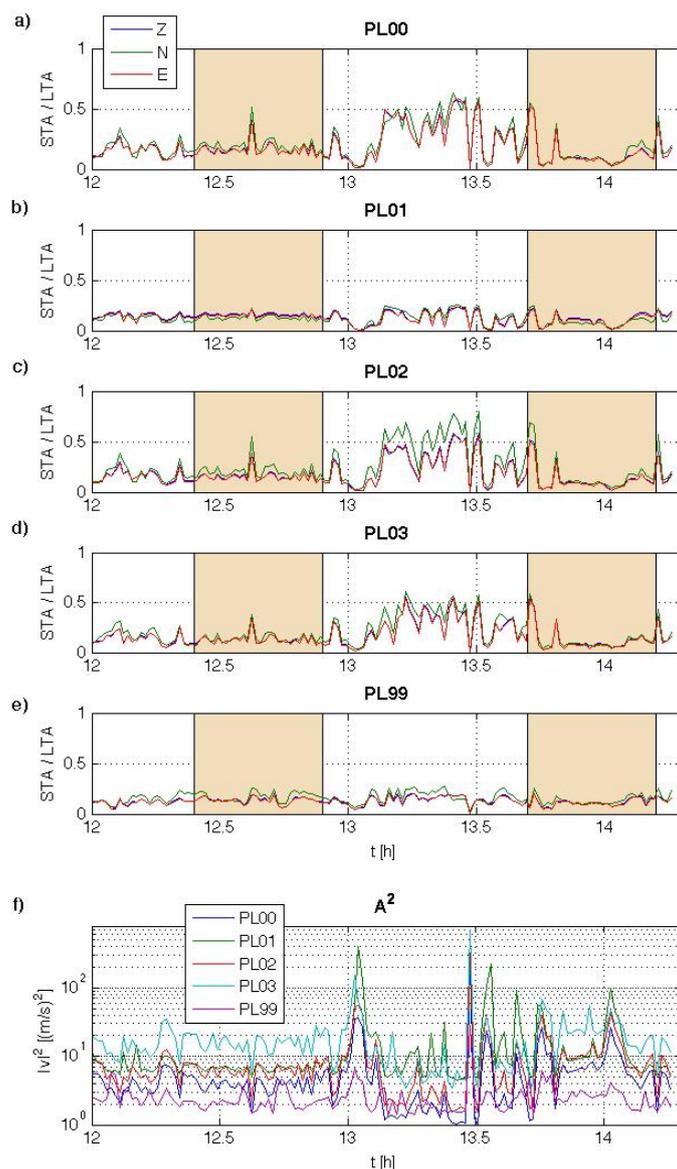


Figura 7. Andamento del rapporto STA/LTA calcolato per le tre componenti di ogni stazione (a-e). f) Ampiezza al quadrato delle registrazioni a tutte le stazioni (componente Z). Le aree ombreggiate in arancione mostrano i periodi di tempo presi in considerazione per l'analisi del segnale prima e dopo l'esplosione.

Gli andamenti spettrali mostrano lievi variazioni nelle ampiezze associate alle frequenze di oscillazione libera del ponte tra prima e dopo l'esplosione. Al sito PL03 il picco si allarga ma la sua frequenza non varia. Questo è il primo indicatore di mantenimento inalterato delle caratteristiche strutturali del ponte (un danneggiamento avrebbe causato un cambiamento netto delle frequenze proprie di oscillazione del ponte almeno ad uno dei siti). In generale si nota un aumento significativo dei valori di potenza spettrale a più alte frequenze rispetto ai 6-7 Hz del picco, maggiormente evidente sulla componente verticale, che può essere spiegato con il rumore antropico delle operazioni di ripristino delle condizioni di viabilità nel dopo esplosione. Questo perché i mezzi pesanti lavoravano lungo l'argine del fiume: una strada bianca, con buche, e le variazioni di densità spettrale sono trascurabili alle stazioni più lontane. Le differenze tra prima e dopo l'esplosione sono meno marcate, infatti, alla stazione PL03 che è l'unica ad essere installata dall'altra parte del fiume rispetto alla posizione della bomba (e quindi risente probabilmente di una maggiore attenuazione nell'arrivo dei segnali causati da tutte le operazioni che si svolgevano sull'altra sponda) e alla stazione di riferimento PL99, che non presenta nessun aumento di PSD per le alte frequenze proprio perché troppo distante.

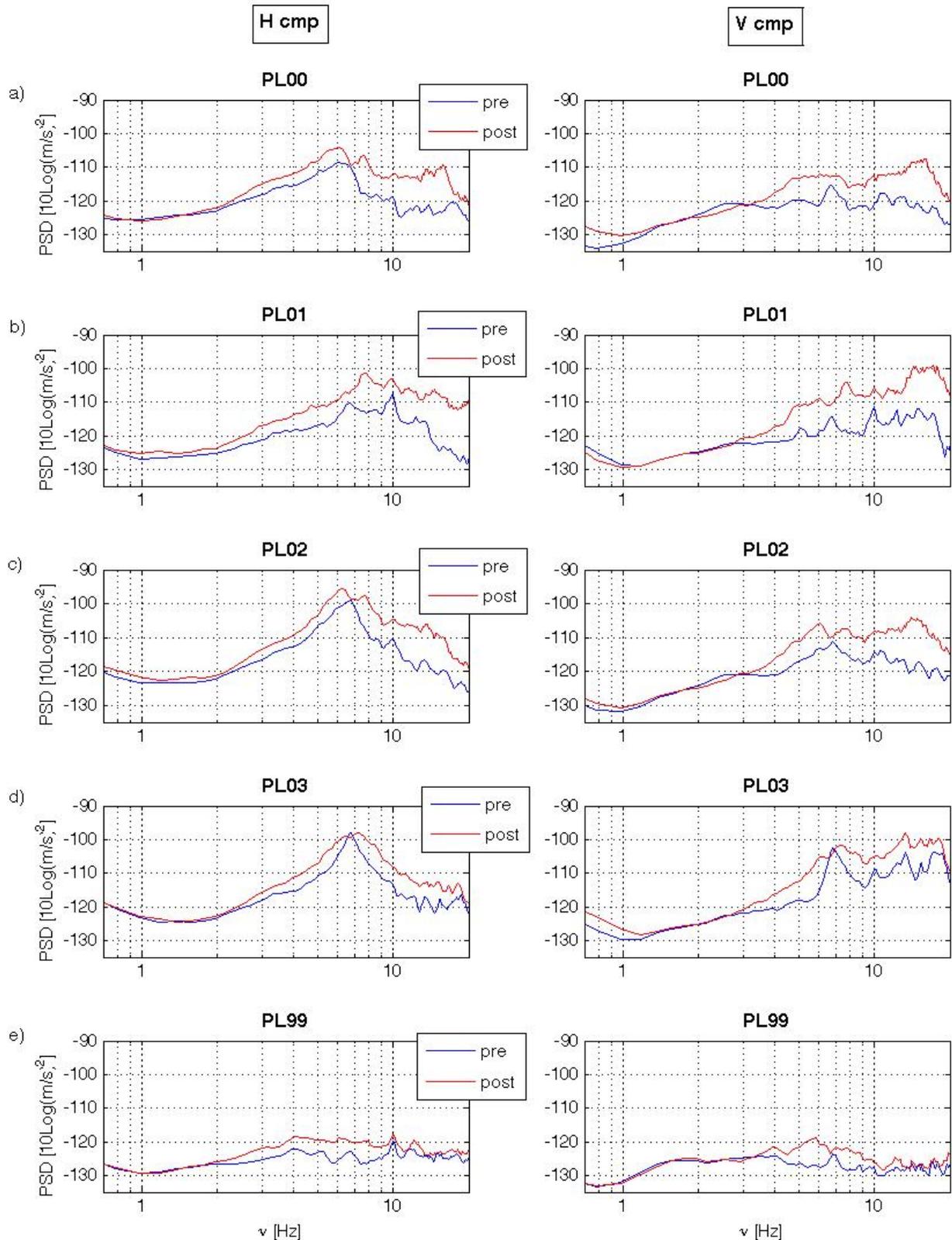


Figura 8. Densità di potenza spettrale (PSD) calcolata per ogni stazione per le componenti orizzontali e verticale separatamente (rispettivamente nei pannelli di sinistra -H cmp- e di destra -V cmp). Ad ogni colore blu/rosso corrisponde una finestra temporale denominata pre/post a seconda che si tratti del periodo prima/dopo l'esplosione.

3. Rilievo con laser scanner terrestre

Nei giorni immediatamente precedenti alle operazioni di brillamento dell'ordigno bellico l'INGV ha inoltre progettato e realizzato una campagna di rilievo di tipo laser scanning terrestre (TLS) con la finalità di ottenere un modello 3D ad alta precisione e risoluzione della struttura del Pontelungo.

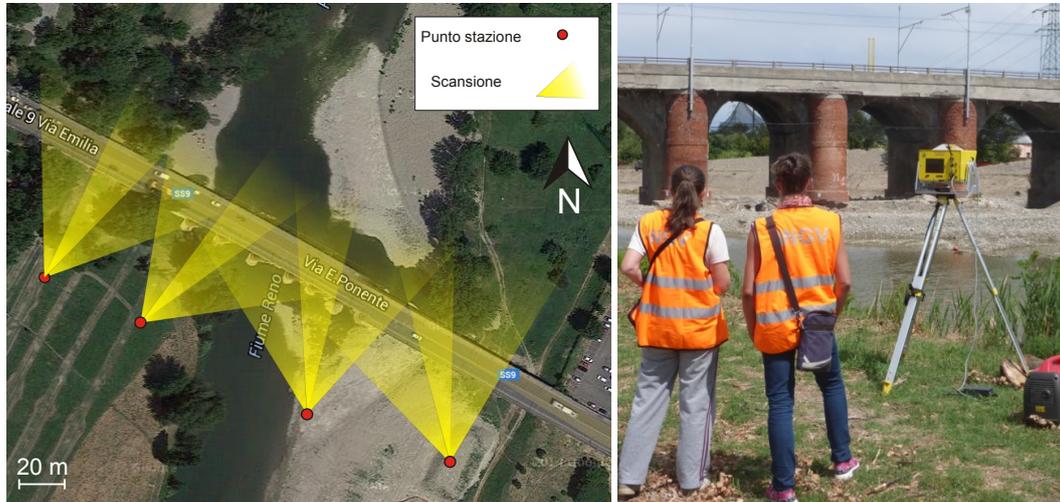


Figura 9. Schema del rilievo eseguito in data 19 agosto 2015 e foto scattata durante la fase di scansione. I cerchi rossi indicano il punto su mappa su cui ha stazionato lo scanner durante le misure. In giallo il campo di scansione.



Figura 10. L'insieme completo delle nuvole di punti, allineate tra loro, a ricostruire l'intero prospetto sud del ponte. Sotto, la prima scansione effettuata ed una zoomata che mostra il dettaglio raggiunto. Complessivamente, l'area rilevata ha una lunghezza di circa 260 m.

Il laser scanner è uno strumento di rilievo non distruttivo che permette di misurare una quantità molto elevata (milioni) di punti distribuiti sulle superfici fisiche osservate. Per ogni punto si ottengono le coordinate geometriche cartesiane x , y e z ed un valore di intensità, generalmente fornito nell'intervallo $[0, 255]$ in una scala di grigi. L'intensità è una variabile strettamente correlata alla rugosità dei materiali e alle condizioni di umidità al momento del rilievo e, in certi casi, fornisce indicazioni sullo stato di alterazione delle superfici [Pesci et al., 2008]. Il risultato di una singola scansione, cioè la nuvola di punti, è quindi composto dall'insieme delle coordinate e delle intensità (x, y, z, I) di tutti i punti misurati nello stesso sistema di riferimento. Per ottenere un modello completo, formato dall'unione di più scansioni, si ricorre a tecniche di allineamento basate su speciali algoritmi [Bergevin et al., 1996; Bae e Lichti, 1999] che garantiscono un modello finale privo di errori e distorsioni. Nel caso specifico, è stato utilizzato lo scanner

ILRIS 3D [Optech, 2015]: sono state realizzate 8 scansioni da una distanza media di circa 30-40 m e con un passo di campionamento variabile di circa 5-6 mm (Fig. 9 e 10).

Nelle settimane successive all'esplosione è stato ripetuto il rilievo TLS, seppure in modo parziale, essendo il cantiere in zona ponte in continuo movimento per i lavori di ripristino e pulizia degli argini. Seguendo la stessa logica dell'allineamento tra le scansioni, cioè applicando le procedure per minimizzare le differenze tra le nuvole di punti, sono stati confrontati i modelli multi temporali relativi alle misure pre- e post- esplosione dell'ordigno bellico al fine di osservare eventuali possibili deformazioni sui prospetti in esame. È stata applicata una procedura già sperimentata ed ampiamente utilizzata nel 2012 durante la sequenza sismica che ha colpito la regione Emilia Romagna [Pesci et al., 2013; 2015; Teza et al., 2014].

Dalle analisi specifiche sono state ottenute le mappe delle differenze tra i punti appartenenti ai modelli multi temporali, che mostrano con buon dettaglio una distribuzione di tipo casuale e, perciò, l'assenza di patterns che possano suggerire la presenza di una avvenuta deformazione. Inoltre, dal punto di vista quantitativo, la deviazione standard delle differenze sulle tre coordinate spaziali (x, y e z) è di pochi millimetri e tali valori estremamente contenuti sono riconducibili alla precisione strumentale (Fig. 11).

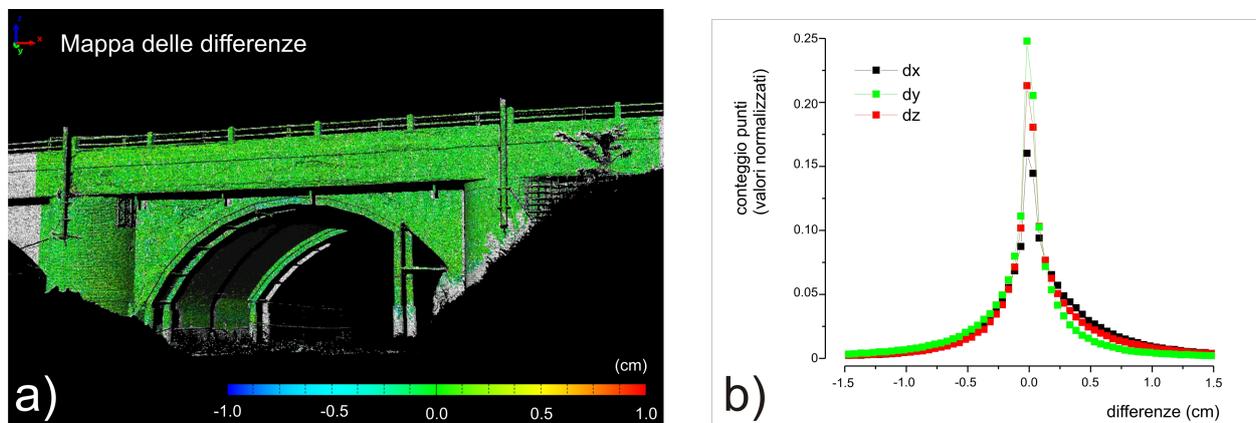


Figura 11. Mappa delle differenze (a) e analisi statistica d'insieme (b). Da quest'ultima si vede come la distribuzione delle differenze tra coordinate dei punti delle nuvole sulle tre componenti x, y e z mostri valori centrati sullo zero e deviazioni di pochi millimetri (in ordinata è riportato il numero di punti che differiscono negli intervalli indicati in ascissa).

4. Conclusioni

Il monitoraggio sismologico del Pontelungo prima, durante e dopo il brillamento ci ha fornito dati utili sia all'osservazione del fenomeno esplosivo sia allo studio delle caratteristiche strutturali del ponte. Nel primo caso abbiamo potuto stimare la massima velocità registrata dalle diverse stazioni e osservare come i valori giacciono ampiamente al di sotto della minima soglia di danno stimata per edifici strutturalmente deboli. Attraverso l'analisi spettrale invece, abbiamo avuto conferma delle eterogeneità strutturali delle diverse parti del ponte che si ripercuotono in andamenti spettrali simili ma leggermente differenti per ognuno dei siti analizzati. Inoltre grazie al confronto delle densità spettrali calcolate prima e dopo l'esplosione abbiamo potuto constatare la stabilità dei picchi, sintomo del mantenimento delle condizioni strutturali del ponte. Le lievi differenze temporali rilevabili nell'andamento degli spettri sono invece facilmente riconducibili a rumore antropico, e probabilmente ai mezzi pesanti in uso per le operazioni di brillamento.

Il rilievo TLS ha permesso di sfruttare una metodologia efficiente in termini di affidabilità del dato, rapidità di azione e qualità del monitoraggio, che si è rivelata utile per offrire un contributo allo studio della stabilità di una struttura architettonica. I dati rilevati non hanno evidenziato deformazioni del ponte alle precisioni (alcuni millimetri) consentite dalle caratteristiche strumentali dello scanner in dotazione.

In generale comunque riteniamo importante e auspicabile per il futuro uno studio integrato di questo tipo nel monitoraggio di strutture ed edifici.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il tenente del Genio Ferrovieri dell'Esercito Italiano Cosimo Rizzo per la disponibilità e gentilezza dimostrata, il ricercatore Giordano Teza dell'Università di Padova per il supporto durante le operazioni di rilievo TLS, e i colleghi Riccardo Mario Azzara e Luciano Zuccarello rispettivamente per le proficue discussioni e la revisione del lavoro.

Bibliografia

- Albert D.G., Taherzadeh S., Attenbrough K., Boulanger P., Decato S.N., (2013). *Ground vibrations produced by surface and near-surface explosions*. Applied Acoustics, 74, 1279-1296.
- Aliverti G., Solaini L., (1950). *Sulla velocità di propagazione delle onde sismiche su brevi percorsi*. Annals Geophys. 3, 4, doi: 10.4401/ag-6050.
- Au S.K., Zhang F.L., Ni Y.C. (2013). *Bayesian operational modal analysis: theory, computation, practice*. Computers and Structures. 126: 3–14. doi:10.1016/j.compstruc.2012.12.015.
- Azzara R.M., De Falco A., Girardi M., Pellegrini D. (2016). *Measurement of the vibration response of the medieval Maddalena Bridge (Italy)*. Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls – Van Balen & Verstringe (Eds), © 2016 Taylor & Francis Groups, London, ISBN 978-1-138-02951-4.
- Bae K-H., Lichti D.D. (1999). *A method for automated registration of unorganised point clouds*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63 (1), 36–54.
- Bacchelli R., (1927). *Il diavolo al Pontelungo: romanzo storico*. Milano: Ceschina, 2 vol, 291 + 323 p.
- Bergevin R., Soucy M., Gagnon H., Laurendeau D. (1996). *Towards a general multi-view registration technique*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18 (5), 540–547.
- BS 7385 - 1 (1990). *Evaluation and measurement for vibration in buildings – Part 1: Guide for measurement of vibration of their effects on buildings*. BS 7385-1:1990, ISO 4866:1990, BSI, London.
- BS 7385 - 2 (1993). *Evaluation and measurement for vibration in buildings – Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration*. BS 7385-2:1993, BSI, London.
- IBC, (2003). *Un ponte fra struttura e cultura. Dall'archivio al progetto*. Istituto per i Beni artistici culturali e naturali della Regione Emilia Romagna, Bologna.
- Optech (2015). *ILRIS 3D laser scanner description*. <http://www.optech.ca/prodilris.htm> (accessed: December 20, 2015).
- Pesci A., Teza G., Ventura G. (2008). *Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner: preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy)*. Annals of Geophysics, 51, 633-653.
- Pesci A., Teza G., Bonali E., Casula G., Boschi E. (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 79, 185–198.
- Pesci A., Teza G., Boschi E. (2015). *Laser scanning-based detection of morphological changes of a historical building occurred during a seismic sequence: Method and Case study*. Int. J. Geomatics Geosci., 3 (5), 427–447.
- POC Comune di Bologna, 2011. *Variante Piano Operativo Comunale. Intervento di qualificazione dell'area sita in via Emilia Ponente, 81 ambito di sostituzione n.145 SABIEM*. [http://urp.comune.bologna.it/PortaleTerritorio/portaletteritorio.nsf/846a53e86d5c40f5c1256d2d004a6843/56dbf77237ad4d36c1257e540032fcd5/\\$FILE/Relazione%20e%20Documenti.pdf](http://urp.comune.bologna.it/PortaleTerritorio/portaletteritorio.nsf/846a53e86d5c40f5c1256d2d004a6843/56dbf77237ad4d36c1257e540032fcd5/$FILE/Relazione%20e%20Documenti.pdf)
- Tarabusi G., (2015). *Studio della microzonazione sismica nel comune di Calderara di Reno*. Comunicazione personale.
- Teza G., Pesci A., Trevisani S. (2014). *Multisensor surveys of tall historical buildings in high seismic hazard areas before and during a seismic sequence*. J. Cultural Heritage 16 (3), 255-266.
- Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S. and Trujillo, J., (1998). *A Comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection*. Bull. Seismol. Soc. Am. 88, 1, 95-106.

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia