

Metodi sismici speditivi per la diagnostica non-invasiva delle caratteristiche dinamiche del sottosuolo nei centri urbani utilizzando onde di Rayleigh: il caso della città di Ferrara

N. ABU ZEID, S. BIGNARDI e G. SANTARATO

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Un obiettivo dell'attività di ricerca nell'ambito del progetto CLARA è l'integrazione di tecnologie sismiche ed elettromagnetiche per la diagnostica non invasiva nella zona di sottosuolo a media profondità (fino a -100 m), partendo dal presupposto che la conoscenza delle caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche e geofisiche di questa zona del sottosuolo è fondamentale in ogni intervento di mitigazione del dissesto idrogeologico e di micro-zonazione sismica. In particolare, una delle azioni previste all'interno dell'attività di ricerca è l'integrazione di metodi sismici attivi e passivi per la caratterizzazione del sottosuolo e per la valutazione di fenomeni di amplificazione sismica locale.

È noto che le onde di taglio si propagano nella fase solida dei terreni e, nota la densità, la conoscenza della velocità delle onde di taglio (V_s) permette di ricavare il modulo di rigidità dinamico, che rappresenta la massima resistenza posseduta dai terreni agli sforzi di taglio. Il legislatore, sia a livello nazionale (NTC08-NTC18), sia a livello europeo (EC08) ed internazionale, utilizza il valore medio ponderato della V_s nei primi 30 m (" V_{s30} ") al fine di determinare la categoria sismica del sottosuolo, così da poter definire, in prima approssimazione, il fattore di amplificazione dell'azione sismica locale atteso in superficie.

Nella pratica professionale corrente tale valore viene determinato o mediante specifiche prove geotecniche puntuali (SCPT) o mediante indagini geofisiche. Di queste ultime, la più utilizzata è quella basata sull'inversione di segnali sismici, sia che questi vengano prodotti *ad hoc* (artificiali) o che si tratti di rumore sismico ambientale. Il principio di base consiste nel ricavare lo spettro di dispersione delle onde superficiali in esso contenute. La tecnica più popolare consiste nel considerare le cosiddette onde di Rayleigh. Il fattore chiave che consente l'inversione è che la profondità di penetrazione dell'onda di Rayleigh è proporzionale alla sua lunghezza d'onda. Onde di Rayleigh a corta lunghezza d'onda portano informazione geofisica legata ad una porzione di terreno più superficiale rispetto alle lunghezze d'onda maggiori e di conseguenza viaggiano, di norma, a velocità V_R più basse, visto che la velocità delle onde S, da cui soprattutto dipende la V_R , in genere dipende dal tipo e grado di compattazione del terreno e generalmente, cresce con la profondità (Fig. 1). Tali spettri sono utilizzati per ricavare la "curva di dispersione" sperimentale.

Successivamente, l'inversione consiste nel ricavare un modello monodimensionale (1D) di sottosuolo la cui risposta sismica riproduca in modo ottimale tale curva sperimentale. Tra le tecniche più diffuse ritroviamo la cosiddetta MASW, che consiste nell'utilizzare una sorgente impulsiva artificiale (Park *et al.*, 1999) e la tecnica Re.Mi. (Louie, 2001) che sfrutta il rumore sismico ambientale. In entrambi i casi, i segnali sismici vengono acquisiti per mezzo di uno stendimento lineare di geofoni, la cui lunghezza è scelta in funzione della profondità di indagine

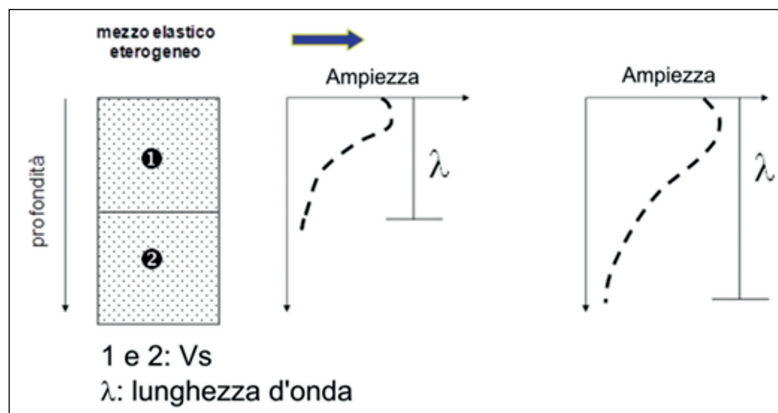


Fig. 1 - Propagazione delle onde superficiali (Rayleigh) in mezzi, 1D, eterogenei ($V_{s1} < V_{s2}$).

desiderata. Il risultato finale consiste nella distribuzione verticale della V_s , sotto lo stendimento, in termini di strati piano-paralleli, dalla quale è poi facile calcolare la V_{s30} come media pesata. Questo modello può però risultare troppo semplicistico qualora siano presenti nel sottosuolo anche variazioni laterali della V_s , peraltro comunissime anche in aree alluvionali, dove il cambio di litologie a diversa risposta elastica può talvolta avvenire su distanze inferiori alla lunghezza dello stendimento. Diviene dunque di cruciale importanza la valutazione della sua variabilità laterale locale, oltre che verticale, in particolare in quei centri abitati dove per la limitata accessibilità alle indagini, sia dirette che indirette, tale informazione è assente.

Lo scopo della presente nota è quello di descrivere il contributo, anche innovativo, sviluppato dall'Unità operativa dell'Università di Ferrara, sub-unità di Geofisica Applicata, per raggiungere l'obiettivo della caratterizzazione geofisica dei parametri dinamici dei terreni in termini di distribuzione della V_s nel sottosuolo, utilizzando come test alcuni siti scelti nell'area urbana della città di Ferrara, sia su indicazione dell'Amministrazione Comunale sia per la disponibilità di informazioni litostratigrafiche dirette per il raffronto delle informazioni.

Per raggiungere questo obiettivo, sono stati intrapresi studi approfonditi sia metodologici che su dati sintetici e poi su profili campione per arrivare alla costruzione di una sezione 2D della V_s . Operativamente, considerato che l'informazione contenuta nelle onde di Rayleigh è strettamente locale (Bignardi *et al.*, 2014), sono state eseguite acquisizioni multiple di tipo MASW con modalità *roll-along*. In sede di acquisizione la variazione laterale del dato è stata valutata tramite l'algoritmo *Direct Interpretation of Phase Lags* – DIPL (Bignardi *et al.*, 2016). Questo algoritmo consente di analizzare l'insieme di acquisizioni MASW nella loro interezza e di ricostruire, immediatamente dopo l'acquisizione, la distribuzione laterale e verticale della V_R ad una scala inferiore alla lunghezza dei singoli stendimenti. Il risultato che si ottiene è una pseudo-sezione, in quanto l'ordinata non è la profondità, ma una porzione della lunghezza d'onda; ciò consente tuttavia una rapida e realistica valutazione della possibile presenza di variabilità laterali. Maggiori dettagli si possono trovare in Abu Zeid *et al.* (2019)

Successivamente, la sezione 2D, questa volta espressa in termini di vera profondità, viene ricavata assemblando modelli 1D adiacenti ottenuti come risultato del più elaborato processo di inversione.

2. Materiali e metodi

In questa nota si focalizza l’attenzione sulla parte sperimentale legata all’acquisizione dei dati presentando un profilo, scelto come esempio della procedura applicata e dei risultati che se ne possono ottenere. Normalmente, la tecnica MASW richiede l’installazione di un certo numero di geofoni verticali, nel nostro caso 24 (con frequenza propria $f = 4,5$ Hz) lungo uno stendimento lineare, la cui lunghezza è funzione della massima profondità d’indagine che si intende raggiungere. L’installazione dei geofoni nel centro urbano, e specialmente il loro accoppiamento rigido con il terreno, comporta evidenti difficoltà, non solo perché richiede un’occupazione prolungata delle aree da investigare, con evidenti disagi per la cittadinanza, ma addirittura per l’impossibilità di conficcarli al suolo qualora l’area da investigare sia pavimentata. Al fine di ovviare a questi problemi, è stato progettato e costruito un “*land-streamer*” (Fig. 2), composto di una serie di piastre di alluminio ($0,2 \times 0,2 \times 0,03$ m³), collegate l’una all’altra a distanza fissa di 3 m tramite una catena di acciaio. A ciascuna piastra è stato saldamente connesso un geofono verticale, ovviando così alla difficoltà di ottenere un adeguato accoppiamento suolo-geofono senza compromettere la qualità dei dati. Il peso considerevole (circa 3,2 kg) delle piastre ha infatti permesso di ottenere un eccellente accoppiamento meccanico. Inoltre, la capacità di mobilitare l’intero stendimento ha permesso di operare in modalità “*roll-along*”, con spostamenti tra le diverse posizioni di acquisizione di 12-18 m. Ciò ha consentito un’acquisizione ridondante, che ha permesso la visualizzazione bi-dimensionale dell’evoluzione sia verticale che laterale della velocità delle onde sismiche.

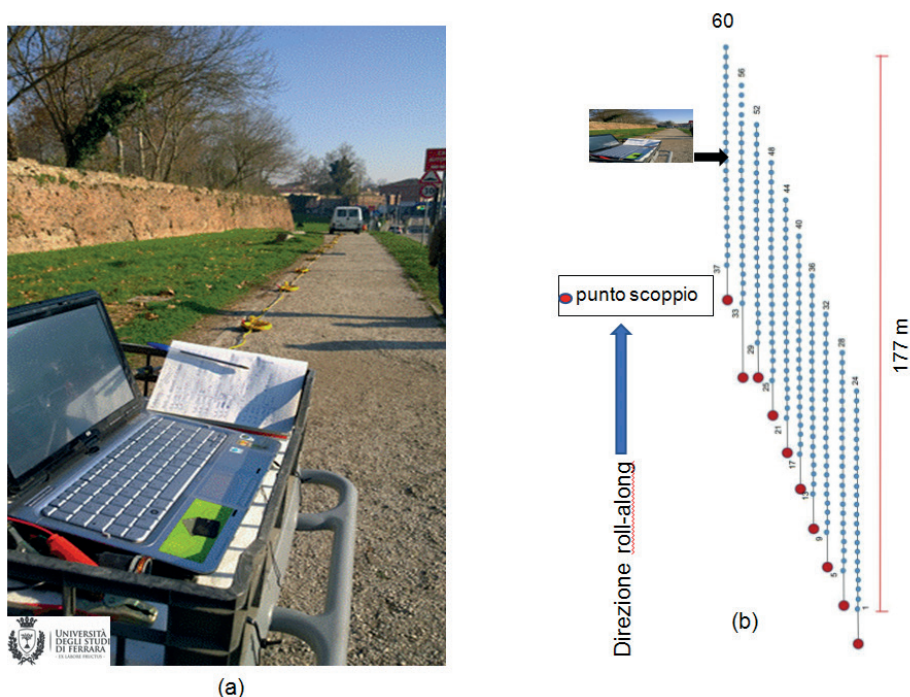


Fig. 2 - a) Particolare della strumentazione *land-streamer* sviluppata presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra della Università di Ferrara; b) dettagli dello schema di acquisizione dati in modalità *roll-along*. I numeri da 1-60 indicano le posizioni geofoniche.

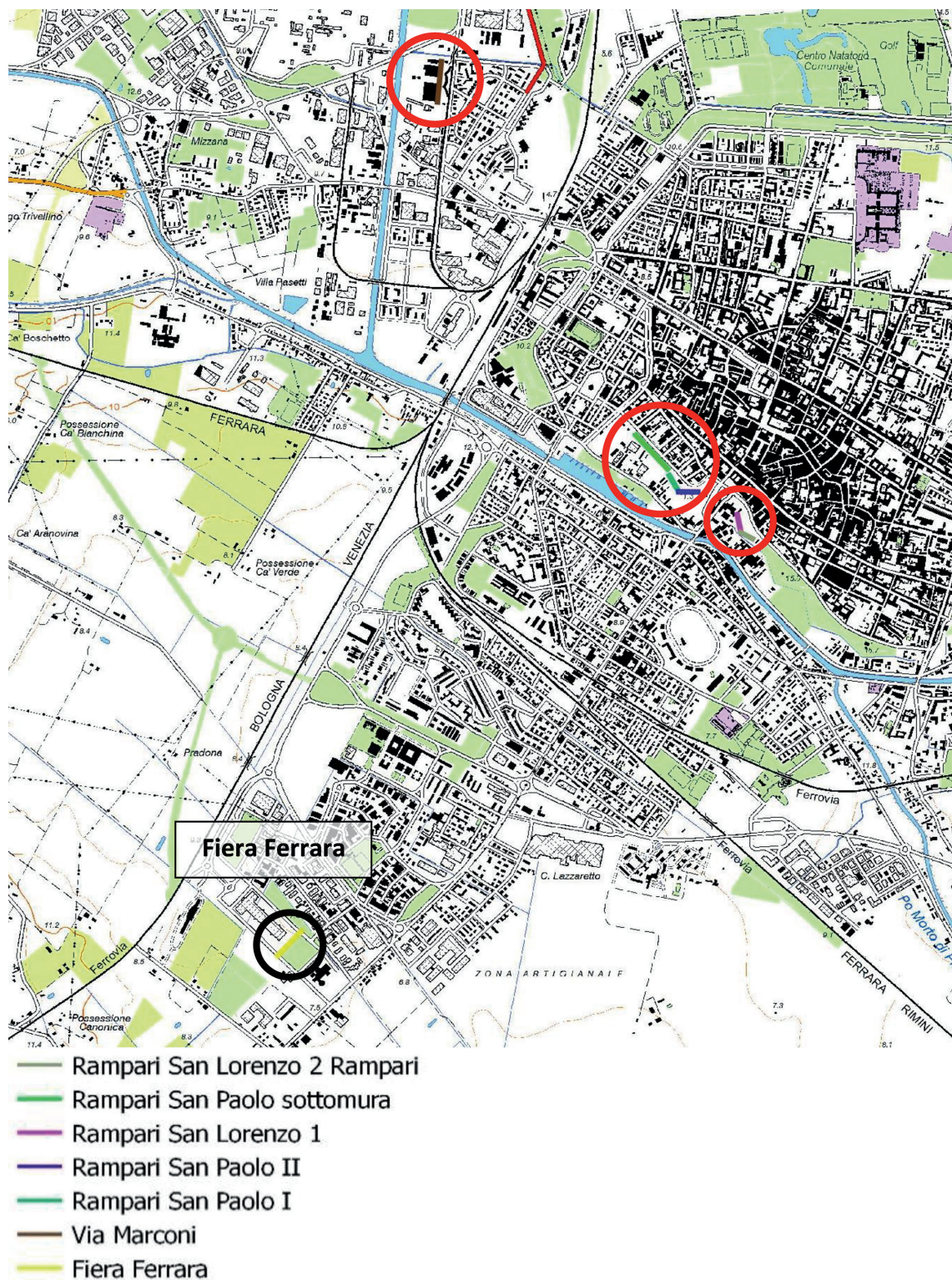


Fig. 3 - Ubicazione dei siti test dove sono stati acquisiti i profili MASW con modalità *roll-along* utilizzando il *land-streamer*. Cerchio nero: profilo eseguito nell'area della Fiera di Ferrara; cerchi rossi: profili eseguiti in altre zone del centro abitato di Ferrara.

Questa visualizzazione è stata ottenuta in due modi:

1. producendo direttamente una pseudo-sezione 2D delle velocità delle onde di Rayleigh, V_R , mediante l'algoritmo DIPL. Questo metodo, pur producendo una pseudo-sezione 2D in termini di velocità di onde Rayleigh (anziché di V_S), è particolarmente utile perché innanzitutto, com'è noto, la V_S dipende principalmente dalla V_R . Inoltre, permette di elaborare tutte le acquisizioni collettivamente, integrando le informazioni in un unico profilo, in tempi molto rapidi (pochi secondi). Tale risultato permette di visualizzare la pseudo-sezione, in tempo quasi reale, fornendo quindi all'operatore un'informazione suggestiva, anche se indiretta, circa le variazioni verticale e laterale della V_S . Poiché libero da interpolazione, il dato è posizionato esattamente in corrispondenza dell'effettiva variazione di V_S nel sottosuolo;
2. invertendo gli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh di ciascuna acquisizione secondo la procedura consolidata MASW e producendo per ogni avanzamento, lungo il profilo, un modello 1D di V_S . Successivamente, i vari modelli 1D, ciascuno associato alla posizione centrale del corrispondente stendimento, sono interpolati per formare il modello 2D.

Per quanto riguarda i profili investigati, sono stati eseguiti 7 profili sismici, in modalità *roll-along*, per complessivi 156 punti di energizzazione e la copertura di 2169 m. La loro ubicazione è riportata in Fig. 3.

3. Esempio: il profilo "Fiera di Ferrara"

Per quasi tutti i profili, con l'esclusione dei profili "San Lorenzo", si disponeva di informazioni litostratigrafiche desunte da sondaggi meccanici eseguiti nelle immediate vicinanze. Presentiamo qui, a titolo di esempio, i risultati ottenuti dal profilo "Fiera di Ferrara".

In Fig. 4, sono rappresentate due sezioni sismiche ottenute dall'interpretazione quantitativa dei dati acquisiti nell'area della Fiera di Ferrara. La prima immagine (Fig. 4a) illustra la pseudo-sezione della distribuzione della velocità di fase delle onde di Rayleigh ottenuta con la tecnica DIPL. La seconda immagine, mostra la sezione interpolata 2D della velocità delle onde S, ottenuta come introdotto in precedenza mediante l'inversione delle curve di dispersione.

Si notino le diverse profondità massime dei due grafici. Ciò è dovuto al fatto che con l'algoritmo *DIPL* si possono avere informazioni sul valore della V_R , seppur con minore risoluzione laterale al crescere della lunghezza d'onda, fino a lunghezze d'onda comparabili con l'intera lunghezza della base sismica (cioè 69 m), mentre l'inversione 1D propria della tecnica MASW diventa inaffidabile a profondità confrontabili o superiori alla metà della lunghezza del profilo. In altre parole, la lunghezza degli stendimenti è stata tarata allo scopo di ottenere un'affidabile valutazione della V_{S30} . Si noti poi che l'inversione 1D (Fig. 4b) ha localizzato verso l'estremo sinistro un'inversione di velocità a circa 25-27 m dal piano campagna e che la V_S , molto bassa fino alle profondità maggiori, cresce in modo relativamente brusco intorno alla progressiva 125 m. Nella pseudo-sezione ottenuta con la tecnica DIPL (Fig. 4a) l'inversione di velocità non viene vista (il potere risolutivo del DIPL è basso alle profondità maggiori di $L/3$ e tale inversione non è necessariamente evidente in termini di V_R), mentre si registra un graduale aumento della velocità in profondità, procedendo verso l'estremo destro, in accordo con la sezione 2D di V_S (Fig. 4b).

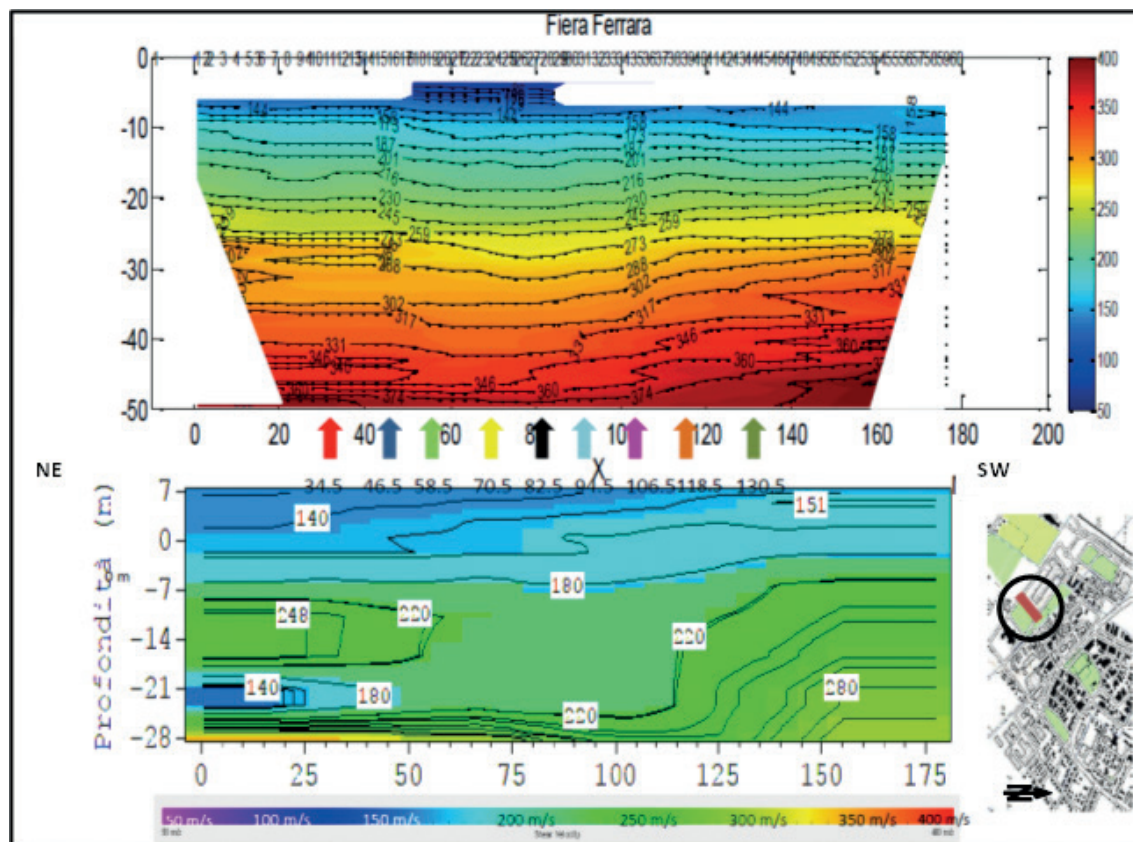


Fig. 4 - Profilo MASW di Fiera di Ferrara acquisito con il *land-streamer*: a) pseudo-sezione della velocità delle onde di Rayleigh; b) sezione 2D della velocità delle onde S ottenuta dall'interpolazione di modelli 1D ottenuti per le diverse posizioni dello stendimento di geofoni ed associate al centro dello stesso. Tali posizioni lungo il profilo sono indicate dalle frecce.

4. Conclusioni

Le indagini sismiche effettuate nell'ambito del Progetto CLARA sono state tutte effettuate in aree aperte e non trafficate, per minimizzare il disagio per la cittadinanza, trattandosi di test che dovevano soprattutto indicare una metodologia di lavoro. Naturalmente il *land-streamer* permette di eseguire misure anche nel centro storico, purché si disponga dei tratti rettilinei liberi lunghi almeno 80 m, necessari a mantenere una profondità d'indagine consistente con una adeguata valutazione della V_{s30} .

Il lavoro presentato in questa nota fornisce dunque un concreto contributo per una corretta ed approfondita microzonazione sismica anche in centri abitati, in quanto consente l'individuazione di variazioni laterali, oltre che verticali di V_s , a livello di singolo edificio.

Ringraziamenti. Si ringraziano: E. Oratelli che ha coadiuvato nell'acquisizione ed elaborazione dei dati, V. Carassiti per lo sviluppo del progetto del "*land streamer*", i tecnici del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, in particolare P. Chiarelli e F. Droghetti per la realizzazione pratica dello stesso.

BIBLIOGRAFIA

- Abu Zeid N., Bignardi, S., Santarato G., Dall'Olio L. (2019). *Rapid surface-waves acquisition in urban centers in alluvial context: the 2D reconstruction of lateral variations of S-waves velocity*. Engineering Geology. [submitted]
- Aki K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors*. Bull. Earthquake Res. Inst. 35, 415-457.
- Bignardi S., Santarato G., Abu Zeid N. (2014). *Thickness Variations in Layered Subsurface Models - Effects on Simulated MASW*. Extended abstract WS6-P04, 76th EAGE Conference & Exhibition 2014 Amsterdam RAI, The Netherlands, 16-19 June 2014, DOI: 10.3997/2214-4609.20140540.
- Bignardi S., Abu Zeid N., Santarato G. (2016). *Direct Interpretation of Phase Lags (DIPL) of MASW data. An example for evaluation of (Jet grouting) for soil stiffening enhancement against soil liquefaction*. Society of Exploration Geophysicists, International Exposition and 85th Annual Meeting, New Orleans (USA), 18-23/10-2015, 2218-2223 (6 pages), <http://dx.doi.org/10.1190/segam2015-5925998.1>.
- Louie. N. (2001). *Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays*. Bulletin of the Seismological Society of America 91 (2): 347-364.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, 64:800-808.