

## Prospezioni sismiche a riflessione onde SH ad alta risoluzione in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - obiettivi superficiali (< 100 m)

A. AFFATATO<sup>1</sup>, L. BARADELLO<sup>1</sup>, L. PETRONIO<sup>1</sup>, A. BARBAGALLO<sup>1</sup>, D. SORGO<sup>1</sup>, R. CAPUTO<sup>2</sup>, M. STEFANI<sup>3</sup> e N. ABU ZEID<sup>2</sup>

<sup>1</sup> OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

<sup>2</sup> Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

<sup>3</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

### 1. Introduzione

Le prospezioni geofisiche sono tecniche di investigazione non invasive di tipo indiretto utili per ottenere informazioni sulla natura e sulla struttura del sottosuolo. Sono utilizzate per ridurre al minimo le operazioni di ricerca basate su interventi diretti nel sottosuolo (perforazioni) e quindi per ridurre i costi della ricerca stessa. Si avvalgono di diversi metodi (gravimetrico, magnetico, sismico, elettrico o geoelettrico, elettromagnetico, radioattivo, termico o geotermico), che presentano caratteristiche proprie e vengono utilizzati in relazione alla profondità ed alle caratteristiche degli obiettivi.

Nel presente contributo è presentata un'applicazione del metodo sismico a riflessione con onde di taglio polarizzate trasversalmente (SH). Questa metodologia offre notevoli vantaggi nella caratterizzazione dinamica dei terreni in quanto le onde SH mantenendo la polarizzazione nel corso della propagazione non generano conversioni in corrispondenza di discontinuità elastiche. Inoltre, la propagazione delle onde SH è limitata ai mezzi solidi e quindi le velocità che si ottengono sono quelle della fase solida dei sedimenti. Le onde di taglio (S) avendo una velocità minore rispetto le onde compressionali (P) permettono, a parità di spettro di frequenza, una risoluzione maggiore e quindi immagini sismo-stratigrafiche di miglior dettaglio (Garotta, 2000). La determinazione dei valori di propagazione delle onde di taglio riveste un ruolo fondamentale anche nella caratterizzazione dinamica dei materiali (modulo di taglio) e per lo studio della Risposta Sismica Locale, come approccio semplificato per la classificazione del sottosuolo per gli studi di Microzonazione Sismica del territorio italiano (NTC2018 e EC08).

Le prime applicazioni ingegneristiche della sismica a riflessione onde S risalgono alla metà degli anni '90 (Ghose *et al.*, 2018), ma solo recentemente la disponibilità di sorgenti sismiche anche vibrazionali che generano onde di taglio ha permesso l'applicazione del metodo sismico a riflessione anche per applicazioni ingegneristiche con obiettivi poco profondi.

In particolare, queste sorgenti di tipo vibrazionale non sono invasive e risultano particolarmente adatte ad acquisizioni in ambienti urbani dove è spesso presente un elevato rumore antropico (Krawczyk, 2012; Krawczyk e Polom, 2018).

### 2. Approccio utilizzato e risultati

Nell'ambito del progetto CLARA è stata verificata l'applicabilità della sismica a riflessione con onde S in un contesto urbano. Per l'esecuzione del test è stato individuato un'area residenziale



Fig. 1 - Mappa dell'area oggetto di indagine. La linea sismica (in giallo) è posta all'interno del Campo Scuola di via Portacatena (Ferrara).

sita nella parte nord-occidentale della città di Ferrara. La Fig. 1 mostra l'area dove sono state ubicate le indagini geofisiche.

L'obiettivo del test consisteva nel verificare l'applicabilità del metodo sismico a riflessione con onde SH, in un contesto urbano, valutandone le capacità penetrative e risolutive. E' stata acquisita una linea sismica lunga 140 m con sorgente vibrazionale in modalità onde SH e ricevitori singoli

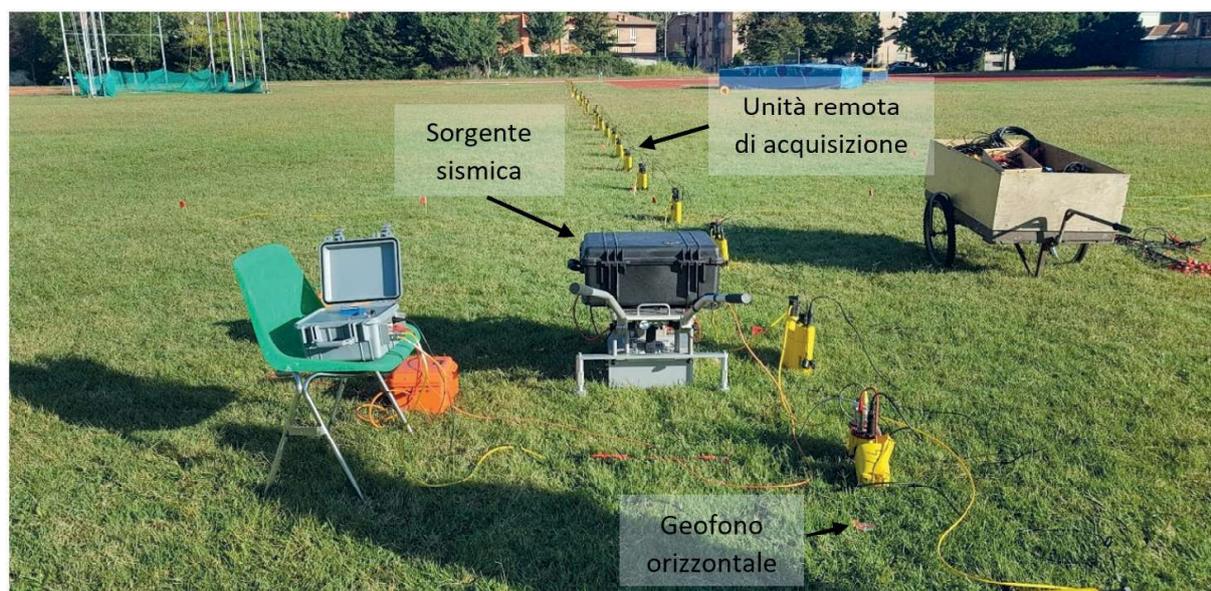


Fig. 2 - Particolare della linea sismica onde SH e della sorgente vibrazionale Elvis III.

orizzontali a frequenza propria di 14 Hz posizionati con una distanza di intertraccia di 1 m e con asse perpendicolare allo stendimento.

Per l'energizzazione è stata utilizzata la sorgente Elvis III – Geosym, un minivibratore portatile e facilmente trasportabile, tale da essere movimentato da un singolo operatore, anche in aree non adatte al transito di mezzi. In Fig. 2 sono raffigurati lo stendimento e la sorgente durante le fasi di acquisizione.

Per il rilievo è stato selezionato uno *sweep* con una banda di frequenza 20-120 Hz, 14 s. Per attenuare le eventuali componenti compressionali, sono state eseguite due energizzazioni (stessa direzione e verso opposto) e le registrazioni successivamente sommate in fase. Nella Tabella 1 sono riportati i principali parametri di acquisizione.

Tabella 1 - Parametri di acquisizione.

Sistema di acquisizione	Summit DMT II e II plus
conversione A/D	24 bit - tecnologia Delta Sigma
ricevitori	14 Hz (orizzontali – onde S, tipo LGT-20D40)
sorgente sismica	Elvis III S8 - Geosym
parametri sorgente (SH mode)	Upsweep 10 s, 20-120 Hz
lunghezza record	1 s
passo di campionamento	0,125 ms
formato di registrazione	SEG-2

La Fig. 3 mostra un esempio di dato sismico con la relativa interpretazione del campo d'onda.

Il dato sismico è stato poi elaborato utilizzando una sequenza di tipo standard che consiste nei seguenti passaggi principali:

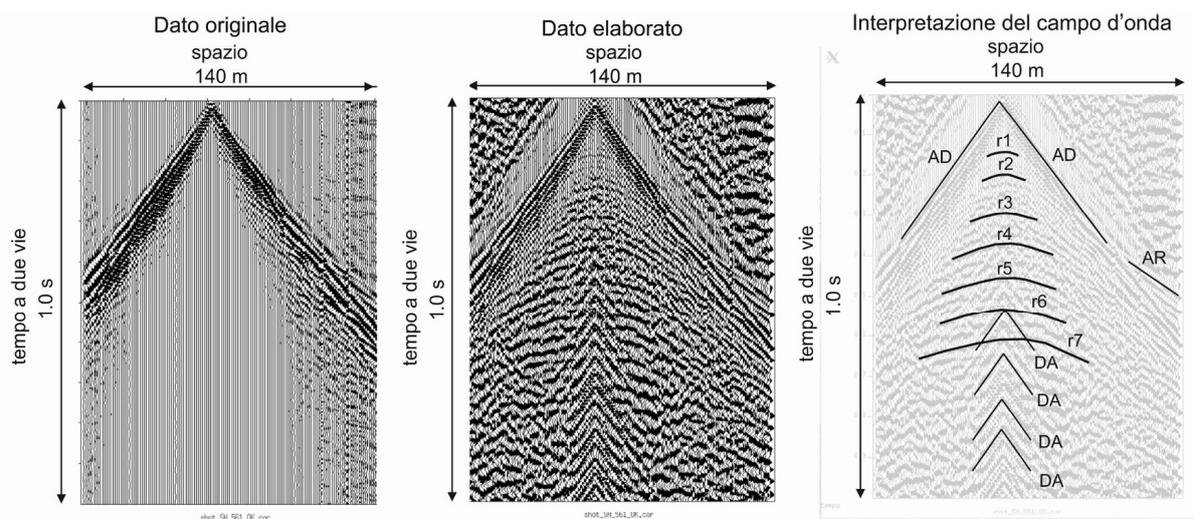


Fig. 3 - Esempio di *Common-Shot-Gather*. A sinistra è rappresentato il dato originale; al centro, lo stesso dato dopo l'applicazione di un filtraggio in frequenza (passabanda 14 - 80 Hz) ed un operatore di guadagno (AGC 0.2 s); a destra l'interpretazione del campo d'onda dove sono riportati i principali eventi presenti nel *Common-Shot-Gather* (AD =arrivi diretti, AR = arrivi rifratti; r1 – r7 = principali riflettori, DA = rumore associato alla distorsione armonica e/o al disaccoppiamento tra sorgente e terreno).

- *editing* dei dati;
- *stack* verticale;
- applicazione delle geometrie;
- recupero della divergenza sferica;
- filtraggio in frequenza;
- analisi di velocità con la tecnica *Semblance*;
- correzione dinamica NMO (*Normal Move Out*);
- *stack*.

La Fig. 4 riporta un esempio di analisi di velocità delle onde SH su CDP ottenuta applicando la funzione *Semblance* e dove sono evidenziati i massimi di coerenza e le relative velocità intervallari.

L'elaborazione dei dati ha quindi consentito di ottenere la sezione *stack* come riportata in Fig. 5.

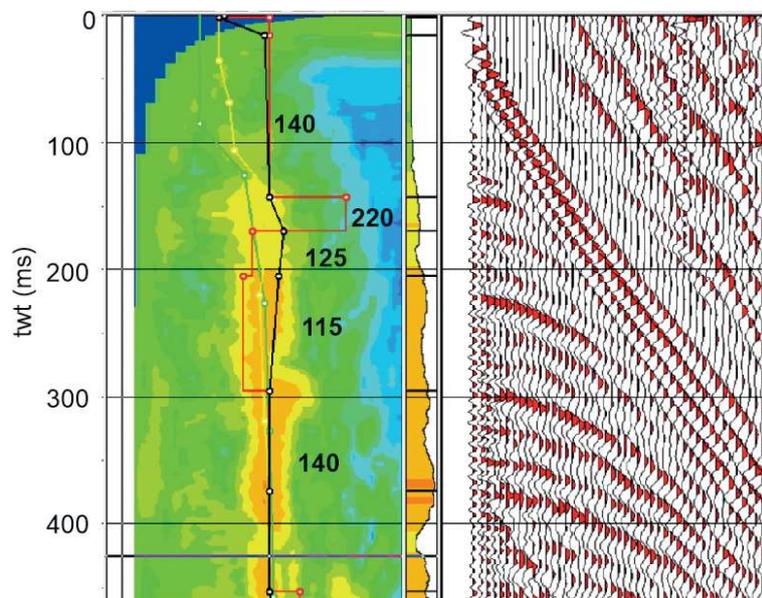


Fig. 4 - Analisi di velocità delle onde SH su CDP. A sinistra la funzione *Semblance* con evidenziati i massimi di coerenza e le relative velocità intervallari espresse in m/s. La linea nera indica l'andamento della velocità di *stack*, mentre quella rossa la velocità intervallare calcolata con Dix. A destra un raggruppamento di CDP dove sono ben evidenti le iperboli corrispondenti ad una serie di riflessioni.

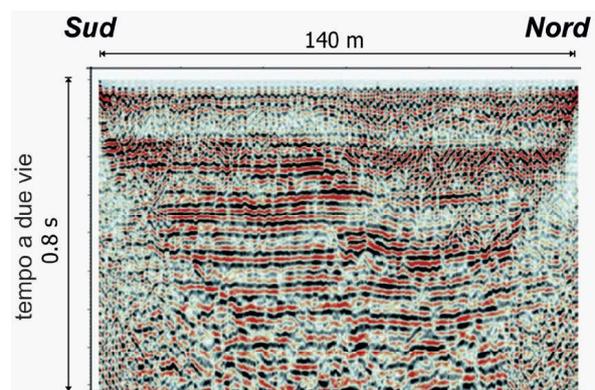


Fig. 5 - Sezione sismica SH ottenuta all'interno dell'anello di atletica lungo l'asse maggiore.

### 3. Interpretazione geologica

Nel sito test di Ferrara la sismica a riflessione con onde SH ha fornito dati attendibili ed interpretabili confermando l'applicabilità di questa metodologia di prospezione. Nel dato originale (*Common-Shot-Gather*) sono riconoscibili gli eventi riflessi che trovano conferma nella sezione *stack*. Considerando una frequenza centrale di 50 Hz, una velocità media di 150 m/s ed il criterio di Widess (1973), la risoluzione verticale, è metrica.

La stratigrafia della sezione è stata interpretata (Fig. 6) sulla base delle conoscenze geologiche sul sottosuolo urbano, derivate dallo studio di centinaia di prove penetrometriche e sondaggi stratigrafici geognostici disponibili nelle aree circostanti. I primi 12 m di sottosuolo sono formati da prevalenti argille, accumulate in un'area di piana alluvionale e depressione interalvea attiva durante l'Olocene. Le riflessioni visibili nella parte superiore di questa unità sono influenzate dalla superficie topografica e dal consolidamento dei sedimenti presenti nella fascia vadosa. La maggior parte dell'unità si trova invece in falda freatica, anche se con una permeabilità relativamente bassa. In questi fanghi teneri, quindi, le velocità sismiche sono particolarmente basse. Secondo la terminologia adottata dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, questi sedimenti coesivi appartengono al Subsistema di Ravenna, AES8, parte del Sistema Emiliano-(Molinari *et al.*, 2009). In questa area, i sedimenti sono di età pre-medievale, per cui non è presente l'Unità di Modena AES8a.

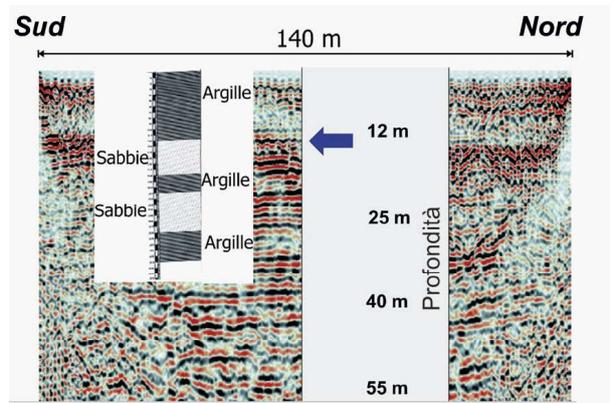


Fig. 6 - Sezione sismica a riflessione SH interpretata.

A 12 m di profondità, è presente una netta riflessione che corrisponde ad una netta discontinuità stratigrafica corrispondente al tetto delle sabbie fluviali singlaciali. Questa superficie è associata ad una lacuna stratigrafica in concomitanza dello sviluppo di un paleosuolo con concrezioni calcaree, che induriscono l'orizzonte, accentuando il contrasto sismico con i fanghi sovrastanti. La lacuna ha carattere non deposizionale, localmente erosivo. La superficie di discontinuità ha carattere regionale ed è riconoscibile attraverso tutto il bacino sedimentario padano. In Emilia-Romagna marca il tetto del Subsistema di Villa Verrucchio, AES7.

Fra 12 e 25 m circa di profondità vi sono prevalenti sabbie medio-grossolane, deposte dal fiume Po, durante le fasi singlaciali fredde e di basso stazionamento del livello del mare, legate all'ultima glaciazione (Würmiana). Vi è una subordinata intercalazione limoso-argillosa, che si ritrova anche in altre vicine successioni, ma che è comunque arealmente discontinua. Questo

intervallo presenta un'elevata permeabilità e trasmissività idraulica e costituisce il primo corpo acquifero semi-confinato con parziale ricarica laterale dall'attuale Po. Questi corpi sabbiosi presentano velocità sismiche decisamente superiori a quelle dei sovrastanti fanghi olocenici. Questi corpi sabbiosi formano la parte medio alta di Subsistema AES7.

Fra 25 e 55 m si trova una successione di fanghi continentali, contenenti corpi nastriformi di sabbie di riempimento di canale fluviale. Nella parte bassa l'accuratezza dei dati sia geofisici che stratigrafici si degrada relativamente, dato anche il minor numero di indagini dirette che raggiungono queste profondità. Si tratta comunque certamente di depositi fluviali del Pleistocene superiore, che formano la parte medio-bassa del Subsistema AES7, nella parte più bassa dell'intervallo potrebbe essere presente il tetto del Subsistema di Bassano AES6.

Le conoscenze così acquisite sulla stratigrafia e le proprietà meccaniche delle prime decine di metri di sottosuolo permetteranno sicuramente una migliore comprensione della risposta sismica locale e della correlazione fra storia deposizionale, assetto stratigrafico, caratteri petrofisici e proprietà sismiche del sottosuolo urbano.

#### BIBLIOGRAFIA

- Garotta, R., 2000, *Shear waves from acquisition to interpretation: Distinguished Instructor Series*, 3, SEG, Tulsa.
- Ghose, R., Nijhof, V., Brouwer, J., Matsubara, Y., Kaida, Y., and Takahashi, T., 1998, *Shallow to very shallow, high-resolution reflection seismic using a portable vibrator system*: *Geophysics*, 63(04)1295–1309.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Trabs, S., Dahm, T., 2012. *Sinkholes in the city of Hamburg-New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsosion structures*. *Journal of Applied Geophysics*, 78, pp. 133-143.
- Krawczyk, C. M. and Polom, U., 2018. *Detection of Potential Slide Planes in Onshore Urban Areas Using Shear Wave Reflection Seismics*. In *Atlas of Structural Geological Interpretation from Seismic Images* (eds A. A. Misra and S. Mukherjee). doi: 10.1002/9781119158332.ch32.
- Prado, R. L., Malagutti, F.W., Dourado, J.C., 2001. *The use of shallow seismic reflection technique in near surface exploration of urban sites: an evaluation in the city of São Paulo, Brazil*. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(3), pp. 293-302.
- Widess, M., 1973, *How thin is a thin bed?*: *Geophysics*, 38, 1176–1180.