

Indici e parametri fisici per il modello litostratigrafico del sottosuolo di Venezia

JACOPO BOAGA ⁽¹⁾, VITTORIO ILCETO ⁽¹⁾ & FULVIO ZEZZA ⁽²⁾

¹ già Dip. di Geoscienze, Università degli Studi di Padova

² Dip. Costruzione dell'Architettura, Università IUAV di Venezia

ABSTRACT

Indici e parametri fisici per il modello litostratigrafico del sottosuolo di Venezia

Passive and controlled source seismic surveys were been accomplished in the historical centre of Venice to characterized subsoil seismic indexes and physical parameters. The techniques adopted allowed to enhance two main different seismic responses for the venetian subsoil, in term of both elastic earth parameters and seismic characteristics. In particular the HVSR techniques applied reveal a relevant inhomogeneity due to the presence of relatively strong acoustic impedance contrast in the first subsoil (8-10 meters in depth).

The seismic surveys, supported by the geological reconstruction proposed, were able to detect the presence of an alluvial complex identified as 'multistorey sandbody' furnishing physical parameters quantification for the litho-stratigraphic model of the Venetian subsoil.

Key words: parametri sismici, Vs, Vp, prospezione sismica passiva

LE TECNICHE DI INDAGINE

Al fine di fornire gli indici e i parametri fisici delle terre, necessari alla definizione del modello lito-stratigrafico del centro urbano di Venezia, si sono condotte tre tipologie di indagini geofisiche volte alla caratterizzazione sismica dei litotipi. Lo scopo della campagna di acquisizione era rivolto sia alla determinazione del comportamento sismico dei terreni della città di Venezia, sia alla caratterizzazione fisico-meccanica delle diverse litologie presenti. Per queste finalità sono state condotte: i) indagini passive di rumore sismico ambientale (microtremori), ii) prospezioni sismiche di sismica a rifrazione in onda P, iii) prospezione sismiche attive di sismica per lo studio della dispersione delle onde superficiali (onda S).

LA SISMICA PASSIVA

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V) è applicata e sviluppata da più di 30 anni (Nogoshi M., Igarashi T.1970), anche se deve la sua diffusione a Nakamura (1989). Essa si basa sul rapporto spettrale delle componenti orizzontali e verticali del moto del suolo, dovuto al rumore sismico ambientale (microtremore).

Questa tecnica, nata principalmente per valutare l'amplificazione sismica di sito (applicazione ampiamente discussa e più volte confutata dalla comunità scientifica internazionale), è in grado di determinare le frequenze fondamentali di risonanza del sottosuolo, che corrispondono ai picchi dei rapporti spettrali tra la componente verticale e le componenti orizzontali del rumore sismico (Field e Jacob, 1993; Lachet e Bard, 1994, Lermo e Chavez-Garcia, 1993, Ibs-von Shet e Wohlenberg, 1999). La natura dei picchi H/V per opinione diffusa e convergente da parte della comunità scientifica, è legata principalmente alla propagazione delle onde di Rayleigh, non escludendo a priori, vista la complessità del rumore sismico, importanti contributi di altri tipi di onde (es. P ed SH).

In questo studio l'utilizzo del metodo HVSR è stato finalizzato alla risonanza dei terreni, assumendo che il fenomeno vibratorio sia legato alla propagazione di onde di velocità prossima alle onde S che incidono su di un semispazio semplificato, caratterizzato da un forte contrasto di impedenza acustica. Con queste assunzioni si può impiegare una funzione di trasferimento del tipo [1]. Un'onda riflessa dalla superficie di contrasto interagisce con quelle incidenti sommandosi e raggiungendo l'ampiezza massima (condizione di risonanza) quando la lunghezza d'onda incidente è 4 volte (o N multipli dispari) la profondità H del rifratore. Quindi imponendo la condizione di risonanza alla [1], è possibile relazionare il periodo proprio di risonanza osservato (Ts), lo spessore del sottosuolo sovrastante un contrasto di impedenza acustica (H) e la velocità di taglio (Vs) dello strato, tramite l'equazione [2].

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s) \quad [1]$$

$$T_s = 2\pi/\omega = 4H/V_s \quad [2]$$

Tale relazione è nota anche in molti altri campi che studiano fenomeni ondulatori e condizioni di risonanza come ipotesi $\lambda/4$.

Nel caso in cui il sottosuolo, come sovente accade, sia costituito da una serie di strati con diverse impedenze acustiche relative, la frequenza del picco principale o di eventuali secondari, ammesso che essi non siano armoniche superiori del principale, permette di riscontrare delle disomogeneità nella risposta sismica che sono riferibili a particolari contatti litologici.

Nel centro storico di Venezia sono state eseguite misure tromografiche di rumore sismico con tromografi digitali a 24bit, ad ampio range di frequenza (0.1-256 Hz). Le acquisizioni sono avvenute secondo le indicazioni del progetto SESAME (Europ. Seismo. Comm. 2004). Per ogni misura, oltre allo spettro H/V, sono state condotte analisi temporali e direzionali del segnale, al fine di determinare la continuità temporale e spaziale del rumore, di fondamentale importanza per una corretta interpretazione della misura.

Scopo delle indagini tromografiche è stata la verifica della risposta acustica del complesso alluvionale del Pleistocene superiore e, in particolare, quella della struttura sedimentaria *multistorey sandbody* (F. Zezza, 2008) a prevalente componente sabbiosa, rispetto alla successione a prevalente componente argilloso-limosa che caratterizza i ciclotemi ritmici dello stesso intervallo stratigrafico. La distribuzione dei punti di misura ha tenuto conto delle sezioni litostratigrafiche elaborate sulla scorta di 115 sondaggi superficiali (in F. Zezza, 2008).

Le misure hanno interessato le seguenti ubicazioni: a) Piazzale Roma, b) S.Basilio, c) Ss.Giovanni e Paolo, c) Stazione S.Lucia, c) S.Barnaba, d) S.Samuele, e) S.Marco, f) Giardini di S.Elena, g) S.Alvise, h) Sacca Fisola, i) Punta della Salute.

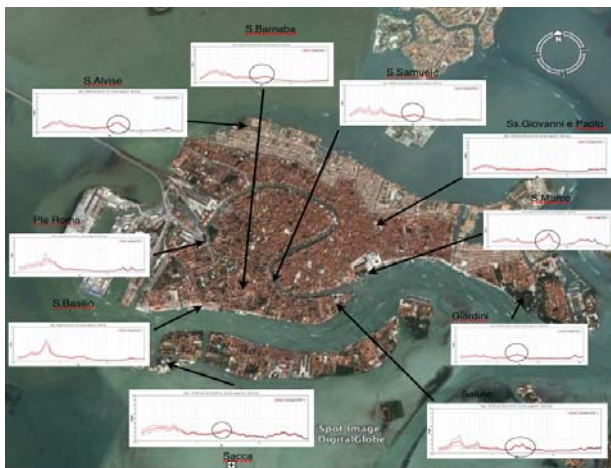


Fig. 1 – Punti di acquisizione di rumore sismico e relativi rapporti spettrali registrati

LE PROSPEZIONI SISMICHE ATTIVE

Al fine di caratterizzare le proprietà fisico-meccaniche dei terreni sono stati condotti degli stendimenti sismici di tipo attivo con sorgente sismica artificiale. Sono stati eseguiti sia stendimenti di sismica a rifrazione in onda P che stendimenti per lo studio della dispersione delle onde superficiali, finalizzati alla valutazione delle velocità delle onde S.

Gli stendimenti di sismica a rifrazione hanno impiegato stendimenti di 24 geofoni verticali (frequenza propria di 14.5 Hz) e un ricevitore con dinamica digitale a 24 bit. Gli stendimenti per lo studio della dispersione delle onde superficiali hanno utilizzato un unico ricevitore broad-band (0.1 -256 Hz). Per entrambe le tipologie di misura la sorgenti sismica utilizzata è stato un fucile

sismico industriale (cal.8).

Stendimenti di sismica a rifrazione in onda P (V_p), della lunghezza rispettiva di 72 metri lineari, sono stati acquisiti presso S.Basilio e presso i giardini reali di S.Marco. Per l'interpretazione dei dati acquisiti si è adottata la comune tecnica di elaborazione per lo studio delle onde rifratte.

Gli stendimenti, per lo studio delle velocità di propagazione nel sottosuolo dell'onda S (V_s), sono stati condotti presso S.Basilio, presso S.Marco e presso Punta della Salute. Gli stendimenti erano finalizzati allo studio della dispersione delle onde superficiali. Il fenomeno dispersivo di tali onde è di fatto legato alle V_s del mezzo attraversato, ed è perciò possibile ricavare un modello di propagazione delle onde di taglio in profondità. La tecnica di studio della dispersione delle onde utilizzata è la metodologia FTAN (Frequency Time Analysis in Panza 1981, Nunziata 2005). Questa tecnica prevede di energizzare superficialmente il suolo e di acquisire il segnale generato ad una certa distanza con strumentazione di acquisizione molto sensibile (in grado di acquisire basse frequenze). L'inter-distanza richiesta e la frequenza dei ricevitori sono legati dalla profondità di investigazione ricercata.

La stima della velocità delle onde S del sottosuolo veneziano ha permesso la correlazione tra le frequenze proprie del suolo valutate con le indagini di sismica passiva e la profondità dei rifrattori sismici.

RISULTATI

Alla luce di quanto elaborato dalle indagini di sismica passiva si riscontra come le misure presso S.Basilio, S.Barnaba, Ss Giovanni e Paolo e P.le Roma, siano significativamente diverse da quelle condotte presso gli altri punti di misura. Si nota infatti, specialmente a P.le Roma e Ss Giovanni e Paolo, l'esistenza di un solo forte picco a bassa frequenza, dovuto ad un rifratte molto profondo (vedi eq.[2]).

I punti misura della Stazione, S.Alvise, S.Marco, S.Samuele, Giardini, Sacca Fisola e Salute presentano invece, oltre a picchi di bassa frequenza, un netto picco compreso tra i 2.5 e i 3.5 Hz, riconducibile ad una disomogeneità acustica presente nel primo sottosuolo.

Le misure di S.Basilio e S.Barnaba presentano un blando picco a 2.5Hz, l'analisi delle singole componenti e l'analisi direzionale dimostra come si tratti di una risposta molto debole. Tali spettri rappresentano dunque una condizione intermedia tra i 2 casi esposti precedentemente.

Per stimare la profondità del rifratte sismico con la tecnica HVSR si è ricorsi ai valori di V_s dei sedimenti che sovrastano il corpo sabbioso alluvionale 'multistorey sandbody'. Si tratta di terreni di riporto composti da limi, argille, torbe e argille con resti di molluschi.

Dalle analisi di sismica attiva effettuate presso la Salute, si riscontra come i primi 7 metri di sottosuolo siano caratterizzati da una velocità delle onde di taglio (V_s) molto bassa, prossima ai 110m/s, propria di terreni coesivi ad alta plasticità. Il risultato appare in accordo con la natura litologica e con le caratteristiche geotecniche delle terre investigate. Al di sotto questi materiali le velocità S difatti aumentano bruscamente sino a 280 m/s, velocità riconducibile a depositi sabbiosi. Anche le prospezioni a rifrazione in onda P (che hanno sofferto del rumore ambientale), individuano 2 sismostrati, rispettivamente di 350 m/s e 940 m/s.

Le misure sismiche attive condotte presso S.Basilio indicano un sottosuolo molto diverso dalle condizioni di S.Marco/Salute. Al di sotto degli 8 metri di profondità difatti le velocità S persistono su valori molto bassi, tipici di sedimenti coesivi plastici. La differenza tra il corpo sedimentario multistrato sabbioso e le alternanze ciclotemiche è dunque rilevante. Anche in questo caso la prospezione in onda P individua 2 sismostrati, aventi velocità rispettivamente di 300m/s e 750m/s, confermando la natura differente dei sedimenti rispetto alla zona S.Marco/Salute. La differente velocità delle onde di taglio tra i 2 siti è da ritenersi più

località	Sismo-strati	V_p	V_s
Salute/ S.Marco	0-7m	350m/s	110m/s
	8-16m	940m/s	280m/s
S.Basilio	0-8m	300m/s	120m/s
	7-14m	750m/s	150m/s

dei sedimenti; le velocità delle onde compressionali (P) difatti non



Fig. 2 – Vs, frequenza propria e profondità stimata del rifrattore per i punti di indagine

Abbinando i dati degli stendimenti sismici attivi alla sismica passiva tramite l'equazione [2], si relaziona lo spessore del sismostrato al di sopra di un contrasto di impedenza, le Vs e la frequenza propria di risonanza. In tal modo si ottiene una stima della profondità del rifrattore responsabile del picco in frequenza tra i 2 e i 3.5 Hz. Le frequenze interessate dai picchi H/V variano al variare della profondità del rifrattore, difatti l'approfondirsi dell'orizzonte sabbioso (es. Sacca Fisola) determina uno *shifting* del picco H/V verso le basse frequenze (3Hz), al contrario, un innalzamento dell'orizzonte sabbioso (S.Marco) determina un picco a 3.5Hz. Le profondità stimate, comprese tra 7.5 e 13 metri dal piano campagna, appaiono in buon accordo con la distribuzione delle sabbie di canale alluvionale delle incisioni attribuibili alla fase regressiva coincidente con l'ultimo massimo glaciale (F. Zezza, 2008). I risultati, infatti, evidenziano il forte contrasto di impedenza acustica rappresentato dalle sabbie di canale alluvionale, ben rilevabile dalle indagini tromografiche. Spostandosi lateralmente da tale multistrato sabbioso, la risposta acustica delle sabbie in seno ai sedimenti argilloso-limosi con torba della successione ciclotemica del Pleistocene Superiore (facies delle fasi interstadiali) appare molto debole a motivo della consistente diminuzione di spessore delle sabbie stesse (m 1.8-2.50), come si registra, ad esempio, presso S.Basilio e S.Barnaba. Dove, infine, la risposta dell'analisi H/V non presenta nel primo sottosuolo picchi riconducibili alla presenza di sabbie (P.le Roma, Ss. Giovanni e Paolo), il contrasto è assente e avvalorano le relative ricostruzioni litostratigrafiche del centro storico (F. Zezza, 2008).

La Fig. 3 indica i punti di misura e le descritte risposte di risonanza in relazione alla ricostruzione paleogeografica dell'area del centro storico di Venezia durante l'ultima regressione Wurmiana.

La misura dei proprietà fisico-meccaniche delle terre, quali i valori di velocità sismica dell'onda compressionale e trasversale, avvalorano la ricostruzione dei differenti domini sedimentari e forniscono un primo supporto di parametrizzazione per la modellazione litostratigrafica del sottosuolo del centro storico di Venezia.

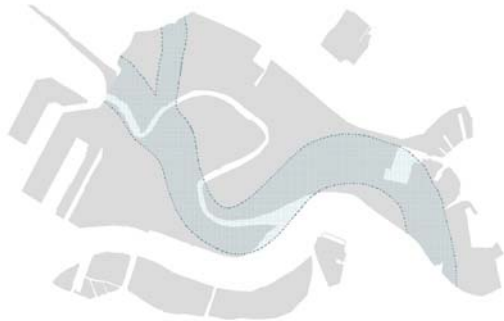


Fig. 3a Ricostruzione paleogeografica del canale alluvionale sabbioso dell'ultima regressione wurmiana (F.Zezza 2008).



Fig. 3b In giallo i punti di misura di prospezione sismica passiva che hanno riscontrato la presenza della struttura sedimentaria (*multistorey sandbody*), in verde i punti dove tale rifratore non è presente (*cyclothemetic organization*).

LAVORI CITATI

NAKAMURA Y. (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. Quaterly Rept. RTRI, Japan 33, pp. 25-33.

NOGOSHI M., IGARASHI T. (1970): On the propagation characteristics of the microtremors. J. Seism. Soc. Japan 24, pp. 24-40.

NUNZIATA C. (2005): FTAN method for detailed shallow VS profiles, *Geologia Tecnica e Ambientale*, 3, 51-69

PANZA G.F. (1981): The resolving power of seismic surface waves with respect to the crust and upper mantle structural models. In Cassinis R. Ed. *The solution of the inverse problem in geophysical interpretation*, Plenum Publishing Corporation 39-77

FIELD E.H., JACOB, K., (1993): The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophys. Res. Lett.*, 20D24, 2925D2928.

IBS-VON SEHT M. e WOHLBERG J.,(1999): Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments.*Bull. Seismol. Soc. America*, 89, 250-259.

LACHET C, BARD P.-Y. (1994): Numerical and Theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth* 42, pp. 377-397.

LERMO J., CHAVEZ-GARCIA F.J., (1993): Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 83, 1574 - 1594.

ILICETO V, BOAGA J. (2005): Deterministic approach and seismic noise measurements for seismic site effect estimation in Adige Valley (North Italy). *Geologia Tecnica e Ambientale*, 4/2005

ILICETO V. BOAGA J (2006): Valutazione delle Vs30 in terreni lagunari mediante il Metodo FTAN (Frequency-Time Analysis). *Atti del workshop Geofisica e tecniche di indagini non invasive applicate agli ambienti estremi. Rovereto 1-12-200*

ZEZZA F., (2007) - Geologia, proprietà e deformazione dei terreni del centro storico di Venezia. In "Geologia e Progettazione nel centro storico di Venezia", Il Convegno Nazionale La Riquilificazione delle città e dei territori, Venezia 7 dicembre 2007, Quad IUAV 54, Il Poligrafo Ed., 2008, 9-41