



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Indagini Geofisiche non invasive nell'area della Basilica di Santa Croce in Gerusalemme, Roma

A cura di Giuliano Milana, Alessia Mercuri, Daniela Famiani.
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia,
Sezione Sismologia e Tettonofisica.
Via di Vigna Murata 605, 00143, Roma
giuliano.milana@ingv.it

Introduzione

La classificazione sismica elaborata nel 2009 dalla regione Lazio (Regione Lazio, 2009) divide il territorio regionale in tre zone sismiche principali (con pericolosità decrescente da 1 a 3) ed in due sottozone (A e B). Il comune di Roma è classificato utilizzando come unità territoriale i municipi, che ricadono in zona sismica 2B, 3A e 3B. In particolare il municipio Roma I, di cui fa parte l'area di indagine, è classificato in zona 3A.

La pericolosità sismica di Roma dipende fundamentalmente da eventi regionali di origine appenninica di magnitudo massima compresa tra 7.0 e 7.5 e distanza di alcune decine di chilometri e da eventi legati all'area dei Colli Albani con magnitudo massima compresa tra 5.0 e 5.5 e distanza entro i 20 chilometri (<http://esse1-gis.mi.ingv.it>)

Sebbene i livelli di scuotimento atteso si possano considerare moderati, lo studio della risposta sismica locale dell'area romana può rivestire un certo interesse anche alla luce della presenza di importanti manufatti di elevato interesse storico-artistico che, a causa di una possibile elevata vulnerabilità, possono presentare un certo grado di fragilità e hanno già subito danni derivati da terremoti storici (Molin et al. 1995; Galli and Molin 2014).

Sulla base delle considerazioni esposte il gruppo dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia che si occupa di studi di effetti di sito ha realizzato nell'area della Basilica di Santa Croce in Gerusalemme alcune indagini geofisiche non invasive, basate sull'analisi delle vibrazioni ambientali, finalizzate alla valutazione di un profilo di velocità delle onde sismiche nel sottosuolo da utilizzare in un futuro studio sulla risposta sismica locale del sito.

Acquisizione dei dati sismici

Nell'area oggetto del presente studio sono state effettuate varie tipologie di indagine. In una prima fase è stato installato un array sismico passivo 2D (array SS rappresentato in Fig. 1) composto da 7 stazioni sismiche stand alone a 3 componenti dotate di acquirente Lennartz modello MarsLite equipaggiato con un velocimetro triassiale a medio periodo Lennartz LE-3D/5s con frequenza propria di 0.2 Hz e sensibilità di 400 V/m/s. Il tempo di acquisizione è stato di 2 ore e la frequenza di campionamento di 200 campioni al secondo. Le stazioni sono state posizionate in tutta l'area racchiusa tra le Mura Aureliane e l'Anfiteatro Castrense. L'apertura dell'array SS supera i 300 metri e consente quindi di ottenere elevate profondità di indagine. La spaziatura minima tra i sensori è di circa 30 metri e non è in grado di discriminare con dettaglio le alte frequenze e quindi di caratterizzare al meglio gli strati superficiali di terreno.

Per ogni punto sono state ricavate le coordinate GPS attraverso un'antenna GNSS della Leica Geosystems con precisione centimetrica.

Per una migliore caratterizzazione degli strati più superficiali di terreno si è quindi successivamente installato un secondo array passivo realizzato con lo stendimento di 24 geofoni verticali con una frequenza propria di 4.5 Hz disposti su due cerchi concentrici, di raggio rispettivamente pari a 13 e 24 metri (array GE in Fig.2). La spaziatura più stretta dei sensori utilizzati consente di esplorare il campo delle alte frequenze (> 5 Hz) e di ricostruire un modello di velocità per la parte più superficiale dei depositi sedimentari.

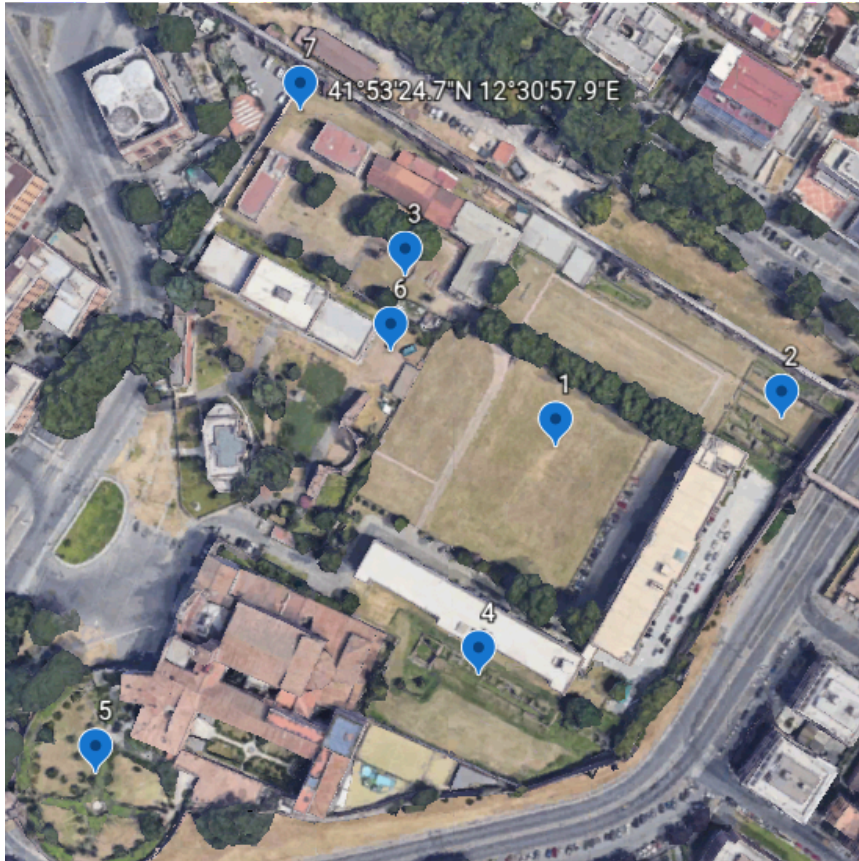


Figura 1 - Posizione in mappa delle stazioni per la misura dell'array 2D (arraySS).



Figura 2 – Vista in pianta della configurazione dell'array circolare (array GE).

<http://hdl.handle.net/2122/15418>

La strumentazione includeva un sistema di acquisizione multicanale (Geometrics Geode a 24 canali) collegato tramite cavi sismici ai sensori ed una unità portatile per la gestione dell'acquisizione. L'acquisizione è consistita in 21 finestre di registrazione, della durata di 4 minuti ciascuna e passo di campionamento di 250 campioni per secondo. Anche in questo caso la posizione esatta dei sensori è stata ricavata da misure GPS differenziali utilizzando la stessa antenna GNSS della Leica Geosystems.

Processing dei dati

L'elaborazione dei dati sismici, ottenuti dalle varie tipologie di indagini, è stata eseguita utilizzando il software Geopsy (<http://www.geopsy.org>). Il software permette di calcolare le curve di dispersione per le onde superficiali utilizzando dati di vibrazione ambientale ed applicando sia l'analisi frequenza-numero d'onda (f-k) a tre componenti e a singola componente verticale, sia il metodo di auto-correlazione spaziale modificato MSPAC (Lacoss et al., 1969; Kvaerna e Ringdahl, 1986; Aki, 1957; Betting et al., 2001). Utilizzando i sensori a tre componenti è inoltre possibile applicare il metodo dei rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e la componente verticale del moto (tecnica HVSR) per ricavare la curva di ellitticità legata alla presenza di onde di Rayleigh.

Analisi dei rapporti HVSR

La tecnica HVSR, Gueguen et al. (2006), Bonnefoy-Claudet et al. (2009), Cara et al. (2011), è stata applicata alle registrazioni effettuate dalle stazioni sismiche a 3 componenti installate nell'area di indagine, con lo scopo di individuare la presenza di picchi legati ad eventuali frequenze di risonanza caratteristiche dei terreni di copertura.

I dati acquisiti sono stati analizzati tramite il programma Geopsy ed elaborati impostando una serie di parametri tra cui:

- Lunghezza delle finestre temporali
- Algoritmo anti-trigger applicato sul segnale grezzo per eliminare i transienti più energetici
- Tipologia di lisciamento degli spettri di Fourier (smoothing)

I rapporti spettrali consentono di ricavare il valore medio della curva HVSR e la sua deviazione standard che può essere utilizzata per valutare la stabilità della misura e quindi la sua significatività statistica. Il risultato ottenuto ad una delle stazioni utilizzate nel calcolo è riportato in Fig. 3 e mostra la presenza di un picco di risonanza a frequenze comprese tra 0.3 e 0.4 Hz, valori tipici della città di Roma. Tale valore di frequenza è simile a quello già descritto in letteratura (Hailemikael et al., 2017) per il sito del Colosseo, che dista circa 2 chilometri dall'area della Basilica di Santa Croce in Gerusalemme. Un secondo picco è visibile a frequenze intorno ad 1 Hz con un'ampiezza minore che non supera il valore di 2. L'ampiezza delle curve H/V rimane inferiore a 1 nella banda di frequenza compresa tra 7 e 10-15 Hz.

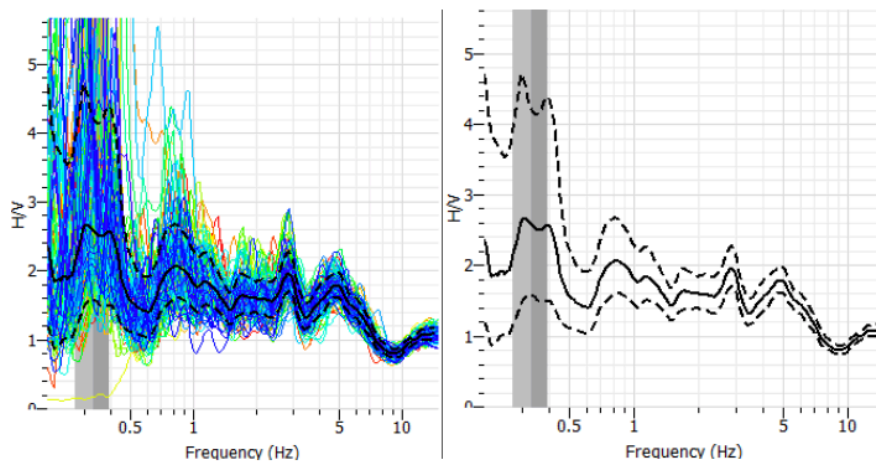


Figura 3 - Curva H/V.

L'analisi del rapporto HVSR ruotato (Fig. 4) viene inoltre effettuata per ricavare informazioni sull'eventuale direzionalità spaziale segnale sismico acquisito (rumore sismico ambientale). I risultati di questa tecnica non mostrano nel nostro caso una chiara direzionalità del picco di risonanza indicando la natura omnidirezionale del campo d'onda e verificando quindi le assunzioni teoriche che sono alla base della tecnica di analisi.

L'esistenza di un picco di risonanza a bassa frequenza viene quindi interpretata come la presenza di un contrasto di impedenza profondo alla base della colonna stratigrafica rappresentativa dell'area di indagine.

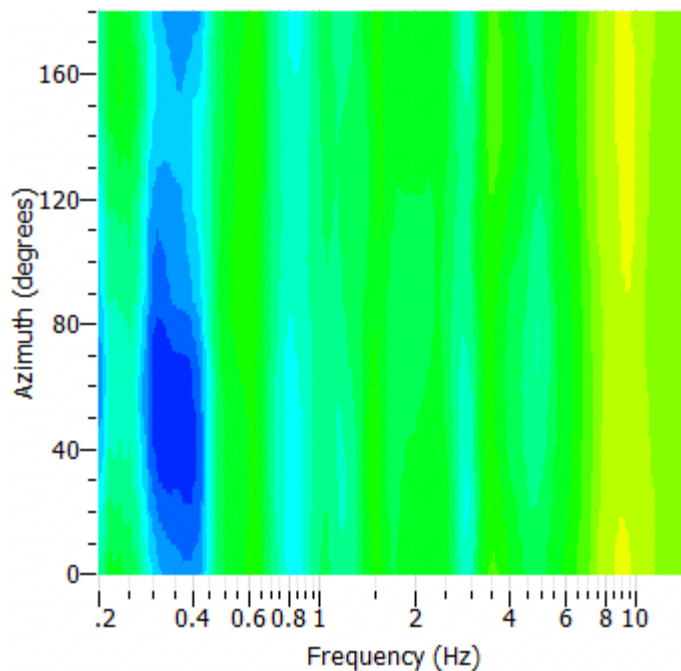


Figura 4 - Grafico di direzionalità del rapporto H/V.

Elaborazione Array 2D

Per quanto riguarda l'indagine eseguita mediante gli array bidimensionali, i dati sono stati processati, con il metodo della frequenza-numero d'onda a 3 componenti per l'array SS e con il metodo *fk* ad alta risoluzione per l'array GE. Per quest'ultimo array si è applicata anche la tecnica dell'autocorrelazione spaziale dei segnali utilizzando il metodo di autocorrelazione spaziale modificato (MSPAC) proposto da Bettig *et al.* (2001). Le tecniche sopra descritte consentono di ottenere le curve di dispersione delle onde di Rayleigh che possono successivamente essere invertite per ottenere i modelli della velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo. L'utilizzo di due array di dimensioni, e quindi di risoluzione diversa, permette di ottenere curve di dispersione ben definite in un intervallo di frequenza che va da 2 a 25 Hz e di investigare quindi spessori anche elevati di terreni sedimentari.

In figura 5 è rappresentato l'andamento delle curve di dispersione per i due array utilizzati e per le due tecniche applicate. Le velocità che si osservano vanno da circa 1000 m/s a circa 1 Hz, frequenza che corrisponde ad alte profondità di investigazione, per poi decadere regolarmente ad alte frequenze (25 Hz) fino a circa 230 m/s, velocità rappresentativa della porzione più superficiale di sottosuolo. In figura 6 si mostrano le tre curve di dispersione unificate e sovrapposte al picking dei loro punti massimi (curva nera), da utilizzare per l'inversione del modello di velocità. In figura 7 si mostra la funzione di ellitticità ricavata dall'analisi a 3 componenti per l'array SS. Tale funzione è ben definita nell'intervallo 0.5 – 5 Hz.

L'inversione simultanea della curva di dispersione e della funzione di ellitticità consente di esplorare con continuità l'intervallo di frequenze 0.5 – 25 Hz e di ottenere quindi modelli di velocità ben vincolati sia per la parte superficiale che per le parti più profonde.

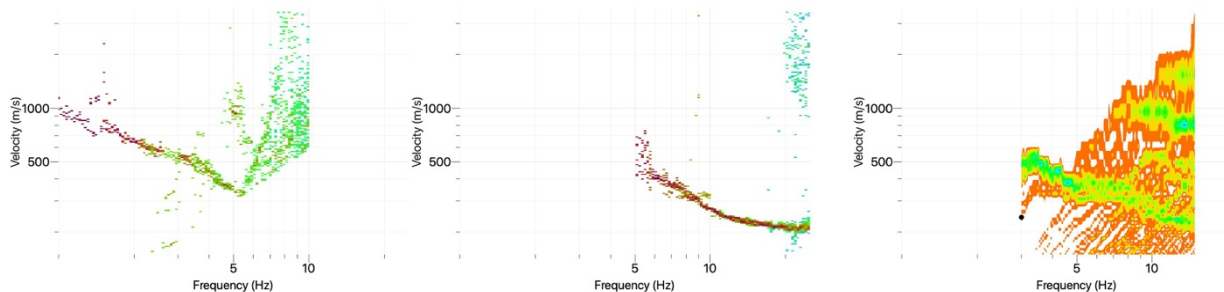


Figura 5 – Curve rappresentazione nel piano *fk* dei risultati ottenuti per: *fk* a tre componenti applicata all'array SS (pannello di sinistra), analisi *fk* high resolution applicata all'array GE (pannello centrale); analisi di autocorrelazione applicata all'array GE (pannello di destra).

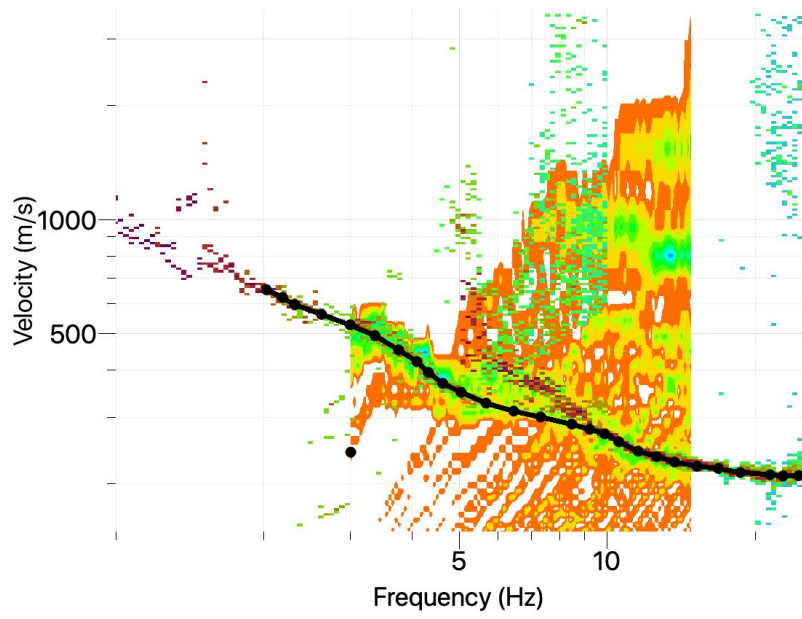


Figura 6 – Picking della curva di dispersione per le onde di Rayleigh

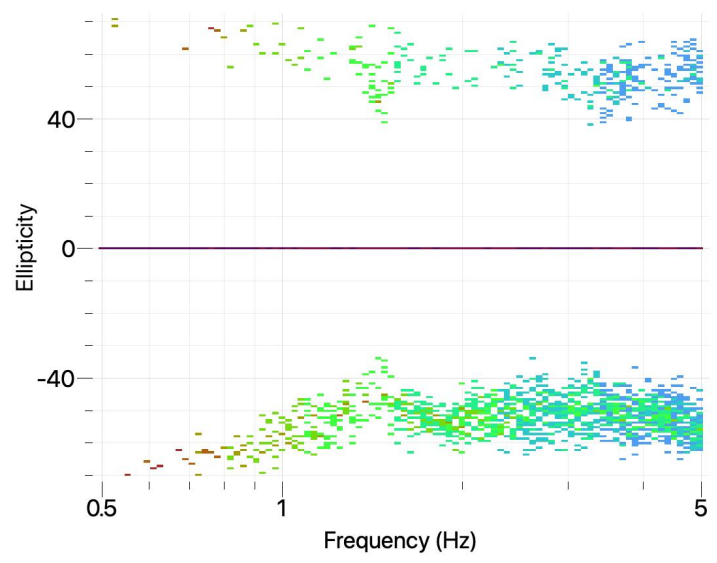


Figura 7 – Grafico dell'ellitticità per l'array SS.

Processo di inversione

Per valutare l'andamento delle velocità delle onde di taglio V_s più completo ed affidabile ad elevate profondità, è stata eseguita, come già ricordato, l'inversione congiunta della curva di dispersione e della curva di ellitticità.

Si ricorda che l'utilizzo di inversioni congiunte è un utile strumento per superare le ambiguità tipiche dei processi inversi che non sono in grado di fornire soluzioni uniche qualora si utilizzino dati provenienti da un unico approccio in mancanza di vincoli esterni (Parolai et al., 2005). Il processo di inversione è stato eseguito tramite il programma DINVER che fa sempre parte del pacchetto software Geopsy (Wathelet, et al., 2004, Wathelet, 2008).

Il modello iniziale alla base del processo di inversione è stato parametrizzato attraverso una successione di 6 strati piano-paralleli basandosi sulle conoscenze pregresse del sottosuolo dell'area romana. Si è quindi ipotizzato un primo strato costituito da terreno antropico, un secondo da rocce vulcaniche, un terzo da limi e ghiaie. Il quarto strato rappresenta l'unità geologica pliocenica delle Marne Vaticane comunemente interpretata come substrato per tutta l'area romana (Funciello e Giordano 2008). Il quinto strato rappresenta i depositi flyschoidi ubicati alla base delle Marne Vaticane e sovrapposti al substrato rigido (*bedrock*) di natura calcarea. Per ognuno degli strati del modello si è ipotizzato un intervallo di variabilità per le velocità di propagazione delle onde P ed S e per il coefficiente di Poisson.

I risultati dell'inversione sono rappresentati in Figura 8. Come si nota l'inversione individua l'interfaccia con il bedrock calcareo a profondità comprese tra 800 e 1000 in buon accordo con i risultati ottenuti in altri siti ubicati nell'area romana. L'interfaccia tra le coperture vulcaniche e sedimentarie più recenti e lo strato delle Marne Vaticane è ubicata a una profondità compresa tra 45 e 60 metri, anche in questo caso in accordo con i risultati ottenuti in altri siti dell'area romana.

La qualità dei risultati forniti dal processo di inversione è sintetizzata nella Figura 9 in cui le curve di dispersione e di ellitticità sintetiche ricavate dal processo di inversione sono confrontate con il dato sperimentale ricavato dalle analisi di rumore ambientale.

Come si può notare il "*misfit*" che quantifica la differenza tra dato sperimentale e dato simulato è basso confermando l'elevata qualità dei risultati prodotti dall'inversione.

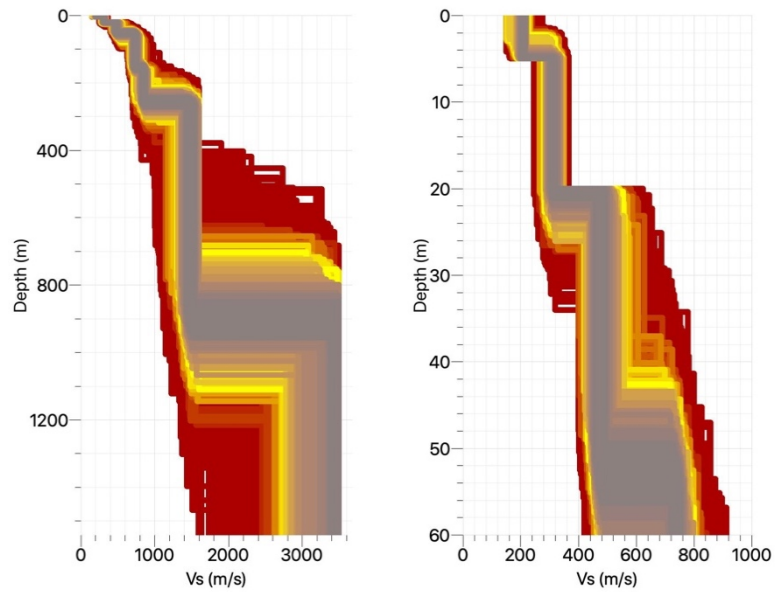


Figura 8 – Profilo di velocità per le onde S ricavato dal processo di inversione. Il pannello di sinistra mostra il modello ottenuto fino alla profondità del basamento carbonatico, il pannello di destra mostra lo stesso profilo fino alla profondità di 60 metri.

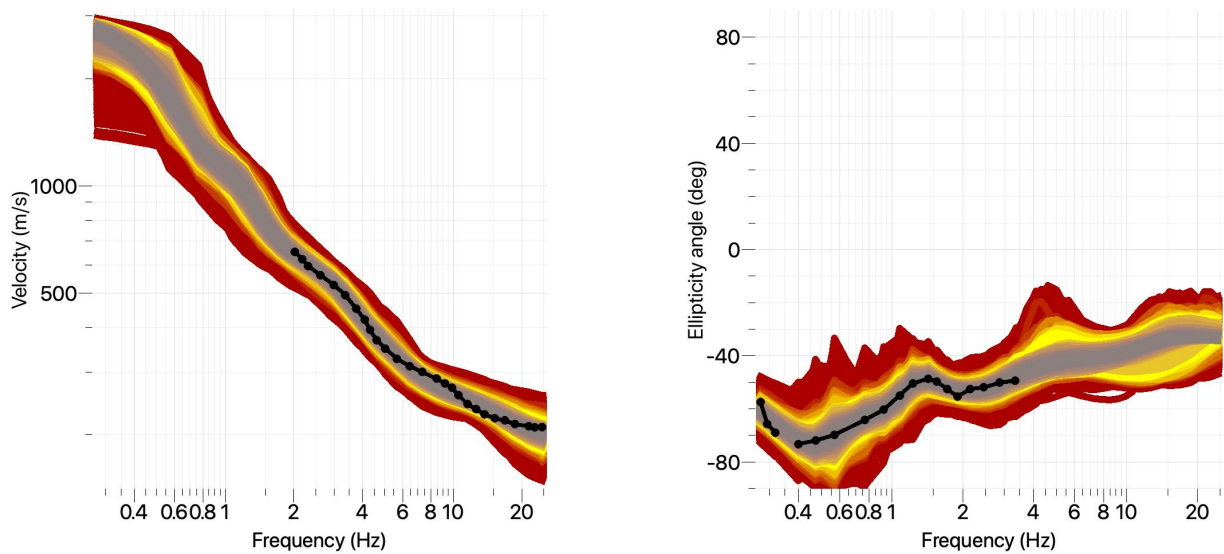


Figura 9 – Confronto tra dati modellati (bande colorate) e dati sperimentali (curve nere sovrapposte) per la curva di dispersione (pannello di sinistra) e per la funzione di ellitticità (pannello di destra).

Conclusioni

Le indagini eseguite nell'area adiacente la Basilica di Santa Croce in Gerusalemme hanno consentito di ricavare un modello di velocità per le onde sismiche che potrà essere utilizzato per la valutazione della risposta sismica locale secondo quanto previsto dalle norme tecniche per le costruzioni (NTC, 2018), Tabella 1.

Spessore (m)	Profondità (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
5.0	0	349	210
15.2	5.0	547	313
32.9	20.2	1009	475
101.0	53.1	1707	738
101.0	154.1	1707	850
628.0	255.1	2491	1484
	883.1	5743	3500

Tabella1: Miglior modello di velocità ricavato dall'inversione.

Per quanto riguarda la definizione della classe di sito facendo riferimento sempre alle norme tecniche per le costruzioni, si può ricavare il valore della velocità Vs equivalente definita dalla formula:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad 1)$$

dove:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Nel nostro caso, essendo la profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Applicando la relazione 1 al modello di velocità ottenuto nel presente studio la $V_{S,30}$ al sito risulta essere:

$$V_{S,30} = 323 \text{ m/s} \quad 2)$$

Che corrisponde ad una categoria di suolo di tipo C.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato possibile grazie alla collaborazione di enti ed istituzioni che hanno concesso l'autorizzazione ad effettuare le indagini descritte nelle aree di loro competenza. Si ringrazia in particolare il Generale Fulvio Poli, Capo dell' Ufficio Generale Promozione, Pubblicitica e Storia dello Stato Maggiore dell'Esercito, la direzione Museo Storico della Fanteria di Roma, la Dottoressa Anna De Santis della Soprintendenza Speciale di Roma, la Direzione del Museo Nazionale degli Strumenti Musicali, la Parrocchia di Santa Croce in Gerusalemme.

Bibliografia

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute Tokyo University*, 35, 415–456.
- Bettig, B., Bard, P. Y., Scherbaum, F., Riepl, J., Cotton, F., Cornou, C., et al. (2001). Analysis of dense array noise measurements using the modified spatial auto-correlation method (SPAC): application to the Grenoble area. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*, v, 42(3–4), 281–304.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., et al. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, 176(3), 925–937. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04020.x>.
- Cara, F., Di Giulio, G., Cavinato, G. P., Famiani, D., & Milana, G. (2011). Seismic characterization and monitoring of Fucino Basin (Central Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), 1961–1985. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9282-2>.
- Funiciello, R., & Giordano, G. (2008b). Carta geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 374 "Roma" e Note illustrative. APAT, Servizio Geologico d'Italia, p 158.
- Galli, P. A. C., & Molin, D. (2014). Beyond the damage threshold: the historic earthquakes of Rome. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 1277.
- Gueguen, P., Cornou, C., Garambois, S., & Banton, J. (2006). On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: application to the Grenoble valley (France), a small apex ratio basin. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 1–20.
- Hailemikael, S., Milana, G., Cara, F., Vassallo, M. P., Amoroso, S., Bordononi, P., et al. (2017). Subsurface characterization of the Amphiteatrum Flavium area (Rome, Italy) through single-station ambient vibration measurements. *Annals of Geophysics*, 60(4), S0438. <https://doi.org/10.4401/ag-7359>.
- Kvaerna, T., & Ringdahl, F. (1986). Stability of various FK estimation techniques, SemiAnnual technical summary, 1 October 1985–31 March 1986. NORSAR Scientific Report, Kjeller, Norway, 1-86/87, 29–40.
- Lacoss, R. T., Kelly, E. J., & Toksoz, M. N. (1969). Estimation of seismic noise structure using arrays. *Geophysics*, 34, 21–38.
- Molin, D., Castenetto, S., Di Loreto, E., Guidoboni, E., Liperi, L., Narcisi, B., Paciello, A., Riguzzi, F., Rossi, A., Tertulliani, A., & Traina, G. (1995). Sismicità. In R. Funiciello (Ed.) *Mem. Descr. a Carta Geol. Ital. La Geologia di Roma Il centro storico* (vol. 50, pp. 323–408).
- NTC (2018). Norme Tecniche per le Costruzioni, Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17/01/2018 (Gazzetta Ufficiale n. 42 20/02/2018).

Parolai, S., Picozzi, M., Richwalski, S.M, Milkereit, C (2005). Joint inversion of phase velocity dispersion and H/V ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes. <https://doi.org/10.1029/2004GL021115>

Regione Lazio (2009). Delibera della Giunta Regionale n. 387, 22 Maggio 2009.

Wathelet, M., Jongmans, D., Ohrnberger, M., 2004. Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurement. *Near Surface Geophysics*, 2, 211-221.

Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35, L09301. <https://doi.org/10.1029/2008GL033256>.