



Determinazione del profilo V_s dall'analisi congiunta delle velocità di gruppo delle componenti Z e R (*HoliSurface*®) e HVSR: caso studio con commenti

Determination of the V_s profile from the joint analysis of group velocities of the Z and R components (*HoliSurface*®) and the HVSR: commented case study



1. INDICE

| | |
|---|----|
| 1. Breve introduzione | 3 |
| 2. Metodologie HS e HVSR in estrema sintesi | 4 |
| 2.1 <i>HoliSurface</i> ® | 4 |
| 2.2 HVSR..... | 7 |
| 3. Analisi | 8 |
| 3.1 HVSR..... | 8 |
| 3.2 Inversione congiunta Z+R+HVSR | 11 |
| 4. Commenti | 12 |
| 5. Risposta Sismica Locale | 14 |
| 6. Riferimenti bibliografici | 15 |



2. BREVE INTRODUZIONE

In riferimento alla relazione geologica allegata al progetto di intervento per una struttura inserita nel centro urbano di Spoleto (danneggiata dagli eventi sismici del 24/08/2016 e successivi – e.g. Stemberk et al., 2019), si è proceduto all’effettuazione di un’indagine sismica *HoliSurface*[®] (*Holistic analysis of Surface waves - HS*) + *HVSR* (*Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio*) utile a definire il profilo verticale delle V_s (velocità di propagazione delle onde di taglio) e la determinazione della V_{s30} e velocità equivalente per individuare il tipo di sottosuolo così come indicato nelle nuove norme tecniche per le costruzioni entrate in vigore nel Marzo di questo del 2018.

La tecnica HS si fonda sulla determinazione di diversi *observables* (spettri di velocità di gruppo delle componenti verticale (Z), radiale (R) e trasversale (T), *Radial-to-Vertical Spectral Ratio* – *RVSR* e curve *Rayleigh-wave Particle Motion*, RPM) che, anche congiuntamente alla curva *HVSR*, consentono di impostare un’inversione congiunta utile a determinare in modo robusto e puntuale il profilo V_s (vedi schema concettuale riportato in Figura 1 e tratto da Dal Moro, 2019).

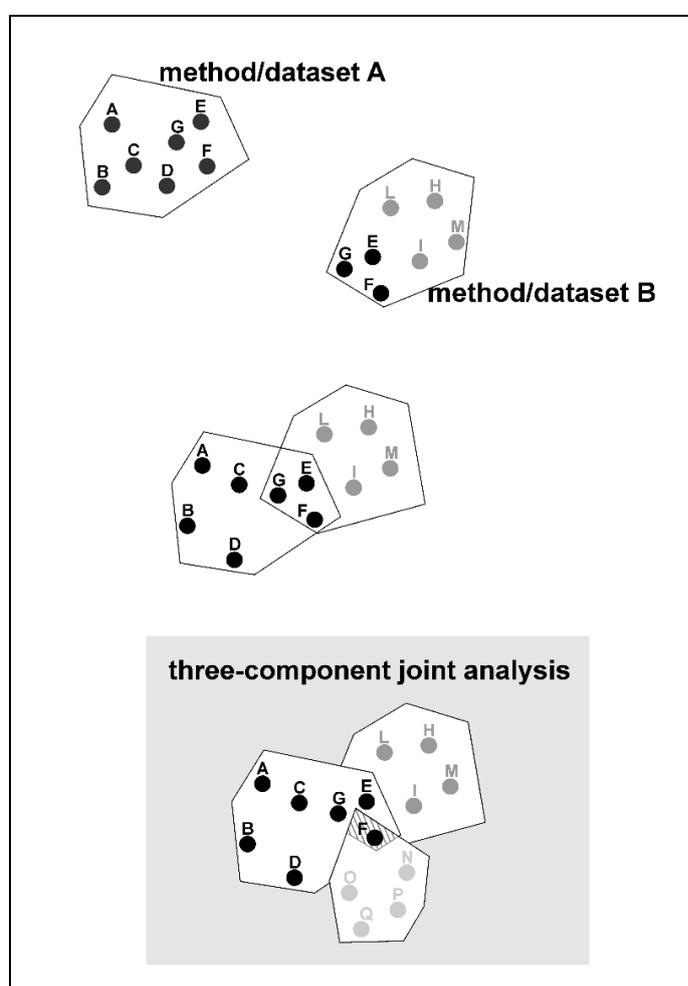


Figura 1. Schema concettuale per descrivere il significato dell’analisi congiunta possibile da dati multi-componente. Solamente l’utilizzo di diversi “oggetti di analisi” (*observables*) consente di restringere l’ambiguità che, altrimenti, caratterizza qualsiasi indagine di superficie.

3. METODOLOGIE HS E HVSR IN ESTREMA SINTESI

2.1 *HoliSurface*[®]

La metodologia *HoliSurface*[®] (HS) è una procedura di acquisizione ed analisi di dati di sismica attiva che considera in modo congiunto (olistico) tutta una serie di *oggetti di analisi (observables)* che, nel loro insieme, descrivono in maniera appunto olistica la propagazione delle onde di Rayleigh e Love (vedi riferimenti bibliografici in calce e il documento di presentazione disponibile al seguente [link](#)).

Tale tipo di indagine è una evoluzione (oggetto di brevetto – www.holisurface.com) del metodo di analisi delle velocità di gruppo tramite MFA (*Multiple Filter Analysis* – Dziewonski et al., 1969) e/o FTAN (*Frequency Time ANalysis* – Natale et al., 2004), quindi basata sulla dispersione delle onde di superficie (velocità di gruppo; rapporto tra spazio e tempo di arrivo dell'onda frequenza per frequenza) e la sua analisi secondo l'approccio FVS (*Full Velocity Spectrum*).

Per il presente lavoro si sono considerate entrambe le componenti dell'onda di Rayleigh (componente Z e R) e il rapporto spettrale H/V, ovvero si è svolta un'inversione congiunta di tali *observables* secondo i principi del fronte di Pareto così come presentato ad esempio in Dal Moro et al. (2015; 2016; 2019).

L'acquisizione tanto dei dati HS (attivi) che HVSR (passivi) avviene grazie ad un semplice geofono triassiale (evidentemente *triggerabile*).

Acquisire un dato per analisi *HoliSurface*[®] non è molto diverso rispetto alle tradizionali acquisizioni di sismica attiva finalizzate, ad esempio, ad effettuare analisi MASW o a rifrazione (lo zero dei tempi è determinato dal trigger, il quale dà inizio alla registrazione).

Rispetto la cosiddetta tecnica MASW (ma tale acronimo è stato abbondantemente frainteso – vedi libro “*Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica*” pubblicato per la Flaccovio nel 2019), la differenza sostanziale sta nel fatto che per effettuare acquisizioni e analisi *HoliSurface*[®], invece di utilizzare *n* geofoni a componente singola, si utilizza un unico geofono a tre componenti (geofono triassiale) opportunamente orientato in modo da poter definire nell'ordine la componente verticale (Z), quella radiale (R) e la trasversale (T).

Video introduttivo all'approccio *HoliSurface*[®] : [qui](#)

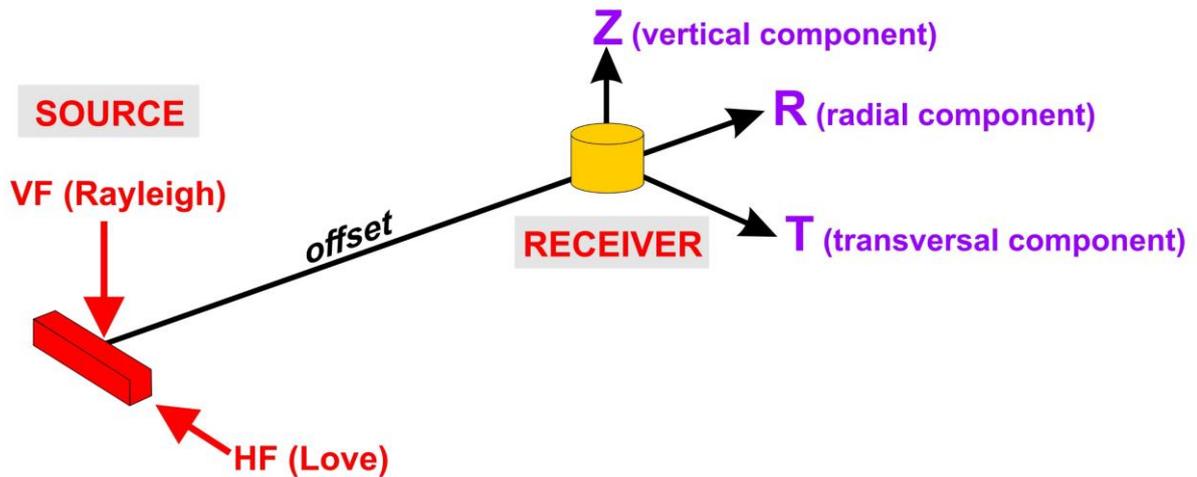


Figura 2. Componenti sismiche.

La seguente tabella riporta i principali parametri di acquisizione (svolta di necessità su asfalto).

| | |
|-----------------------------------|---|
| offset | 30 m (questioni di "opportunità logistiche" hanno limitato l' <i>offset</i> adottato ma la regola da seguire è che tale <i>offset</i> va scelto in modo da ottenere stendimenti più lunghi possibile) |
| lunghezza registrazione | 2 s (poi ridotto a 0.7 s in fase di elaborazione) |
| frequenza di campionamento | 1000 Hz |
| sorgente | Mazza da 10 kg su piastra (per la generazione delle onde di Rayleigh) e su traversina (per la generazione delle onde di Love) |
| stack | 5 (trovandosi in ambito urbano sarebbe però stato preferibile un valore maggiore, non inferiore a 10) |



Figura 3. Battuta trasversale (HF - *Horizontal Force*) per la generazione delle onde di Love (qui non considerate in virtù della chiarezza delle onde di Rayleigh considerate).

2.2 HVSR

Il rapporto HVSR è in uso in sismologia indicativamente dalla fine degli anni '60 (vedi ad esempio Mark and Sutton, 1975). Negli anni ottanta, in Giappone, si sono poi svolti diversi studi sul suo utilizzo in relazione alla valutazione del rischio sismico (vedi studi di Nakamura riportati tra i riferimenti bibliografici). Di fatto non è mai stata dimostrata la relazione tra amplificazione e curva HVSR. Tanto considerazioni teoriche che osservazioni sperimentali non supportano infatti l'idea (purtroppo molto popolare) che la curva HVSR rappresenti, *sic et simpliciter*, la curva di amplificazione.

Diversi studi hanno infatti dimostrato (vedi ad esempio Perron et al., 2018 e riferimenti bibliografici in esso contenuti), l'amplificazione effettivamente registrata durante un terremoto si discosta anche di molto rispetto la curva HVSR (vedi ad esempio dati riportati in Figura 4).

Se quindi, unicamente a dati riguardanti la velocità di propagazione delle onde di superficie, l'HVSR rappresenta un valido sussidio a stimare le V_s delle parti più profonde (e.g. Arai & Tokimastu, 2005; Dal Moro, 2015), essa non deve essere intesa come stima dell'amplificazione di sito.

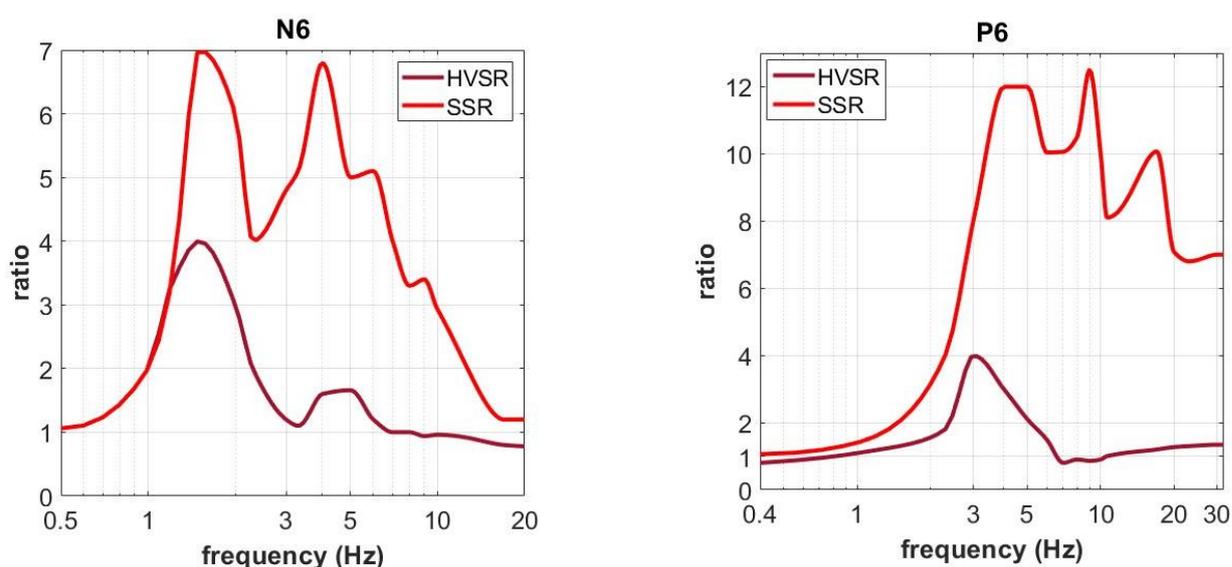
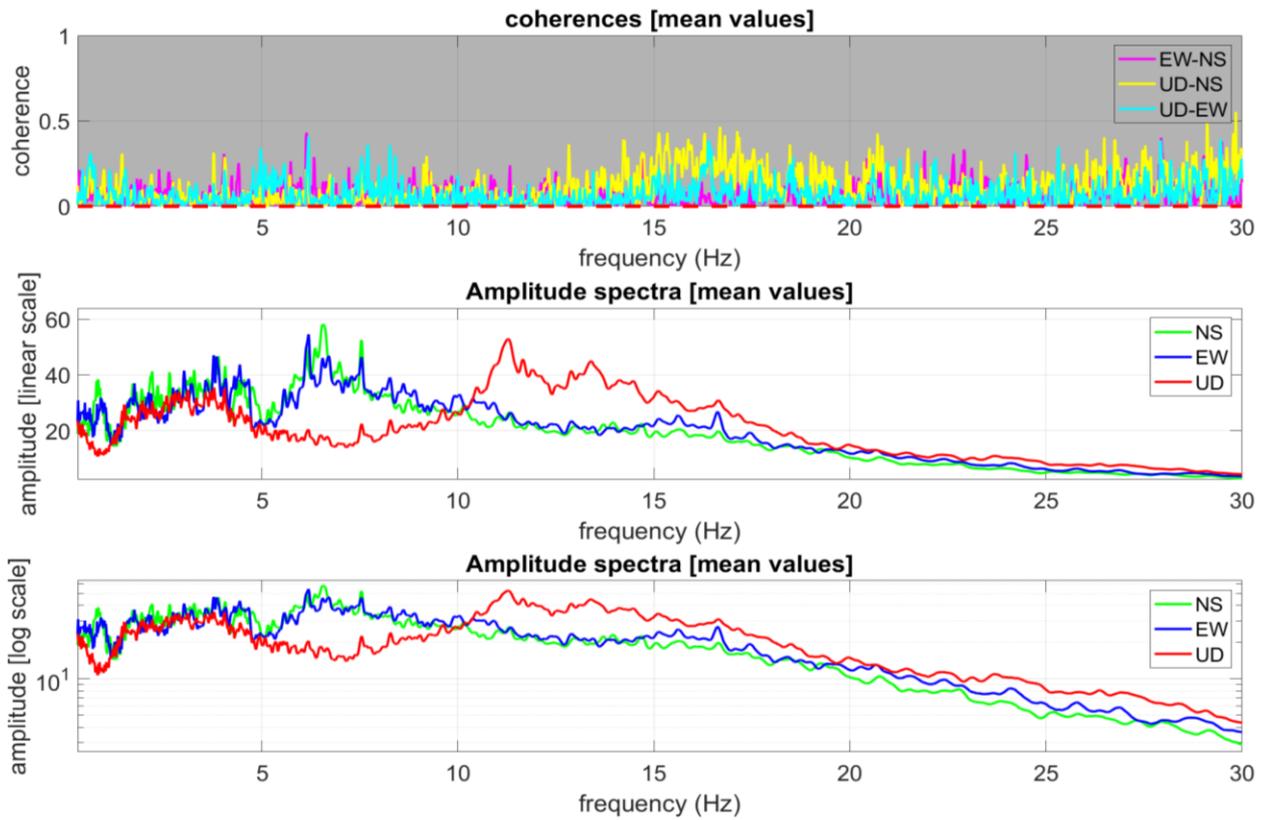


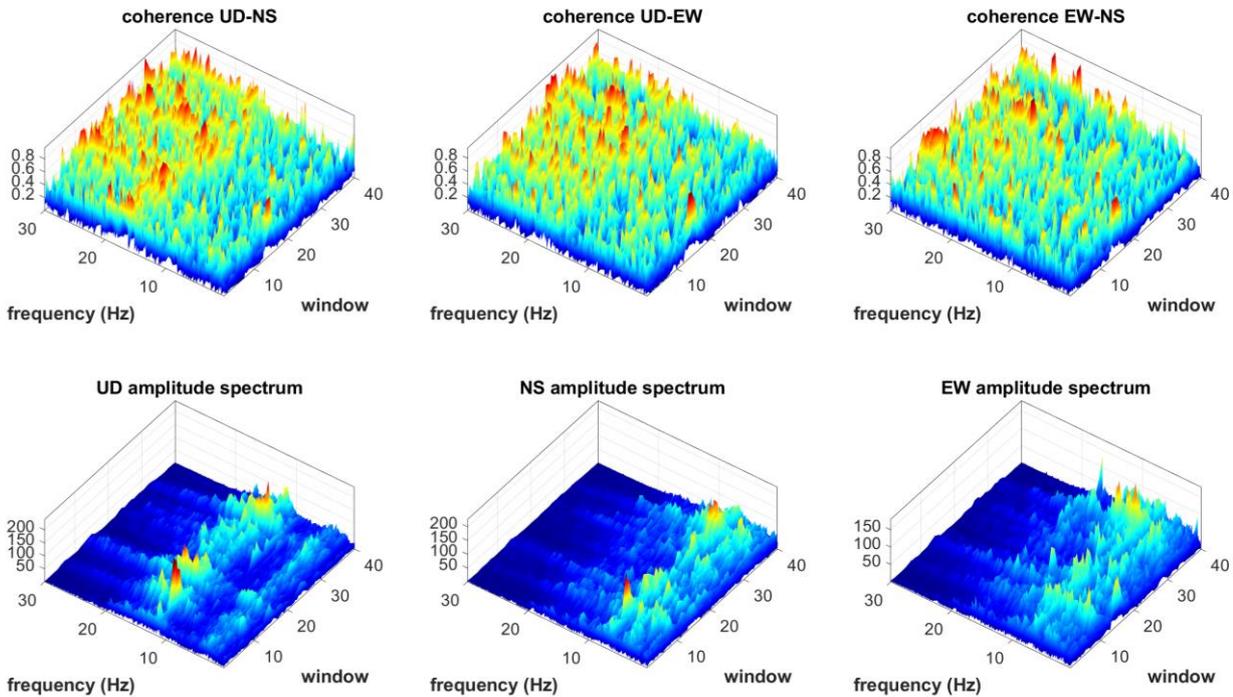
Figura 4. Confronto tra curva HVSR e curva di amplificazione reale (da analisi SSR – *Standard Spectral Ratio*) in caso di evento sismico (da Perron et al., 2018). Si noti la profonda differenza tra curva HVSR ed amplificazione effettivamente misurata.

4. ANALISI

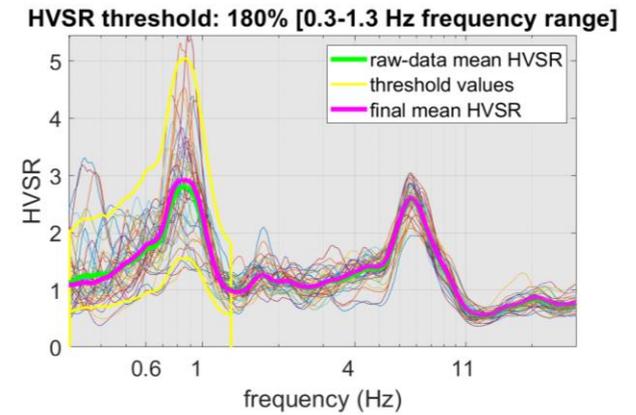
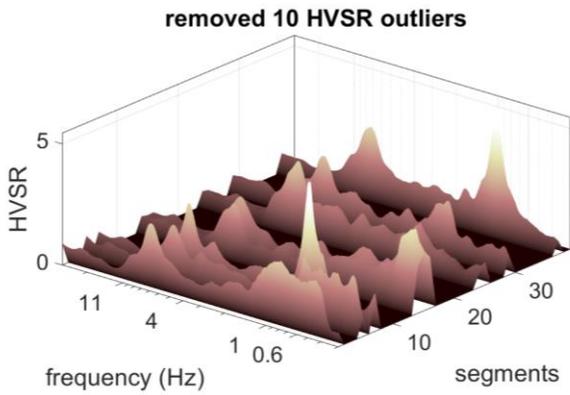
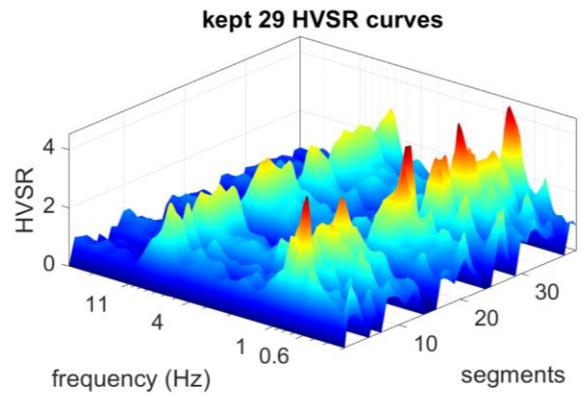
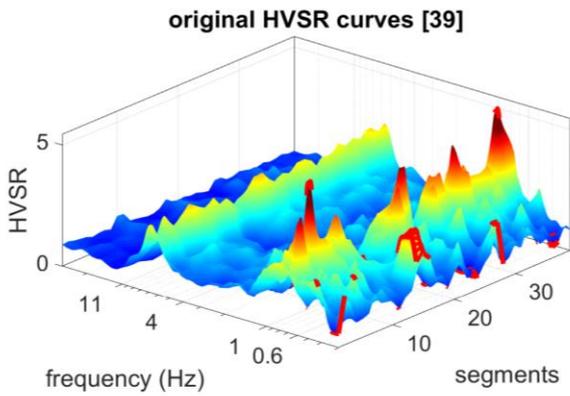
3.1 HVSR



Dall'alto: funzioni di coerenza per le tre coppie di sensori indicati, spettri di ampiezza (*smoothing* del 3%) delle tre componenti con scala verticale lineare, spettri di ampiezza con scala verticale logaritmica.



Funzioni di coerenza nel tempo per le tre coppie di sensori e, sotto, spettri di ampiezza nel tempo per le componenti UD, NS e EW (spetrogrammi).



Dall'alto a sinistra in senso orario: 1) totalità delle curve HVSR per tutte le finestre considerate; 2) curve HVSR mantenute successivamente alla rimozione delle curve *outliers*; 3) curve HVSR rimosse (in quanto *outlier*); 4) curve HVSR con indicato il limite fissato (curva in giallo) oltre il quale le curve vengono rimosse in quanto *outlier*.

show current data reset

step#1 (optional) - decimate
64 Hz new frequency resample

step#2 - HV computation
remove events both Rad & Tr clean axes
45 window length (s) 5 tapering (%) Min. freq.: 0.222 Hz
4 amplitude threshold 180 HVSR threshold test removal
15% spectral smoothing (triangular window)
6 detrending order no equalization

full output
particle motion, all HVSRs, time lapse videos
close windows
save videos quadratic mean compute

continuity show 3D motion

directivity analysis
frequencies to highlight: 1.0 5.0 10.0 Hz compute

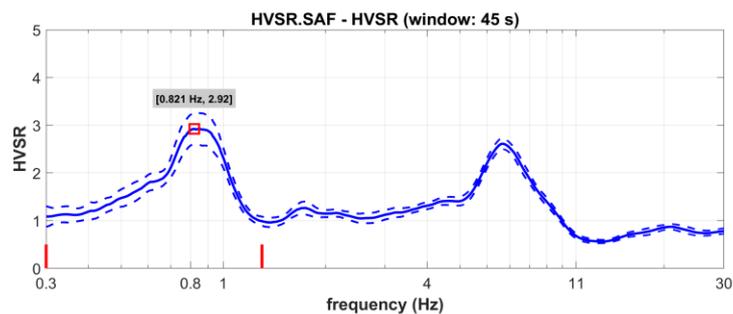
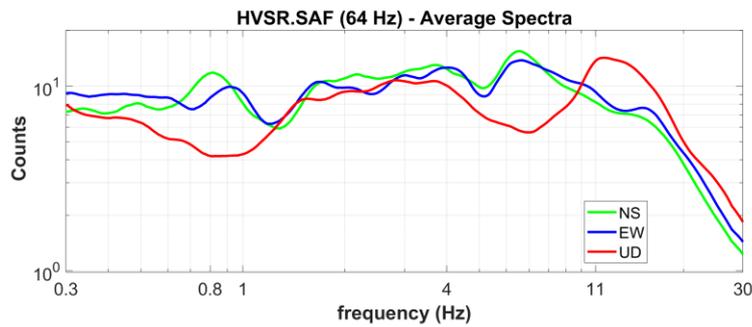
save-option#1: save HVSR as It is
save HV from: 0.3 to 30 Hz
save HV curve (as it is)

picking HV or amplitude spectra
HVSR pick data
save picked HV compute

quick analysis (H²/Vs/4H)
200 average Vs (m/s) (from surface to bedrock)
20 depth of the bedrock (m)
1000 Vs of the bedrock
clean compute

highlight a frequency
draw/highlight: 10 Hz upload HVSR curve

directivity over time
directivity in time time: 80 s



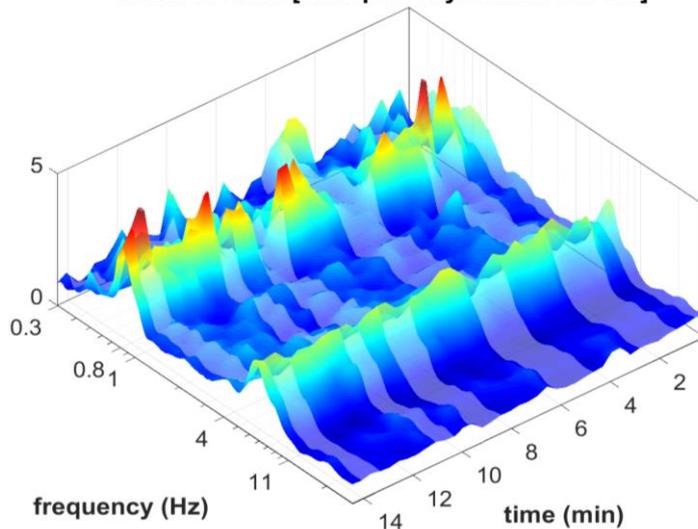
- Criteria for a reliable H/V curve
- #1: OK
 - #2: OK
 - #3: OK
- Criteria for a clear H/V peak [0.821 Hz]
- #1: OK
 - #2: OK
 - #3: OK
 - #4: OK
 - #5: OK
 - #6: OK

To model the HVSR (also jointly with MASW or ReMi/ESAC data), go to the "Velocity Spectrum", "Modeling & Picking" panels and upload the saved HV curve

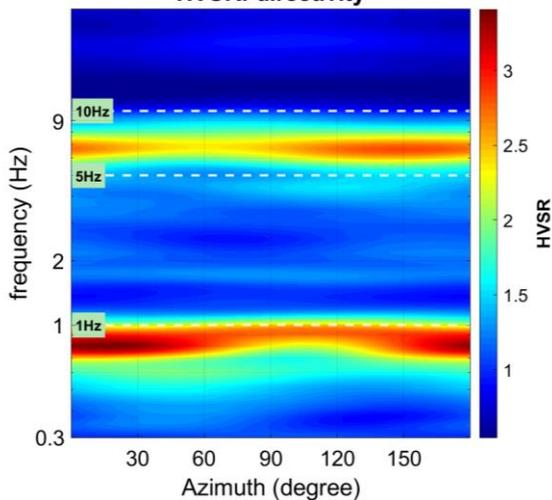
Spettri di ampiezza (smussati) e, in basso, curva HVSR finale (rimosse le curve *outlier*).

L'analisi dei dati mostra la completa assenza di segnali di qualsivoglia natura industriale (vedasi spettrogrammi e funzioni di coerenza –Dal Moro, 2020) e la presenza di due picchi (a circa 0.8 e 6.8 Hz) che soddisfano tutti i sei criteri SESAME.

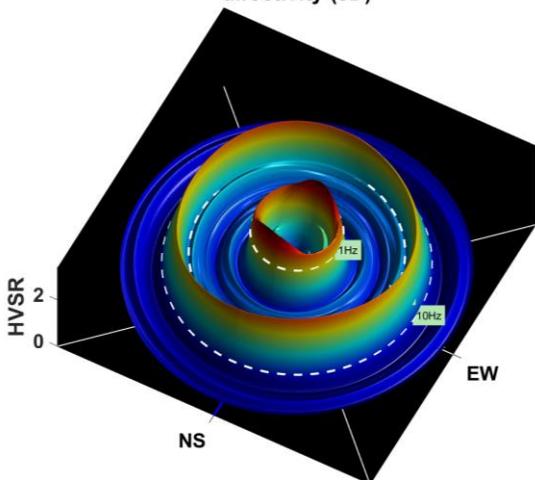
HVSR vs Time [transparency: outlier curves]



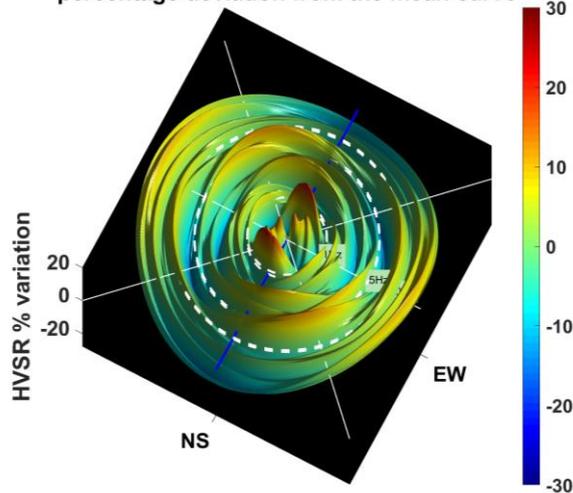
HVSR: directivity



directivity (3D)



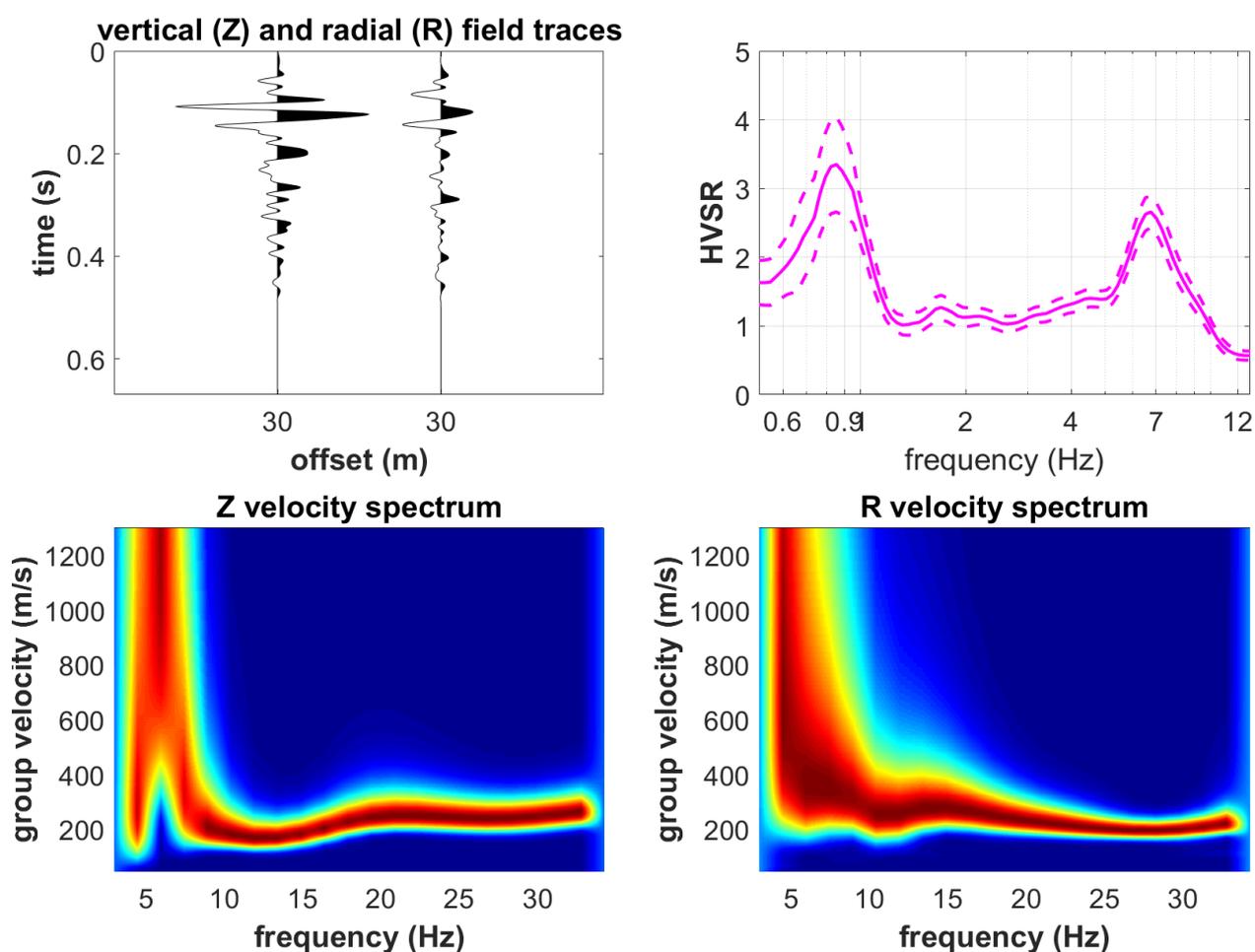
percentage deviation from the mean curve



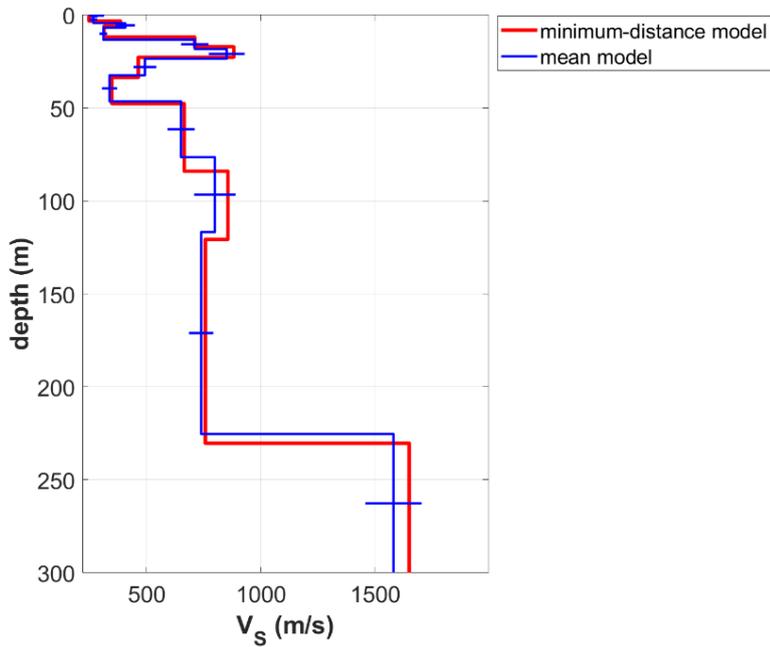
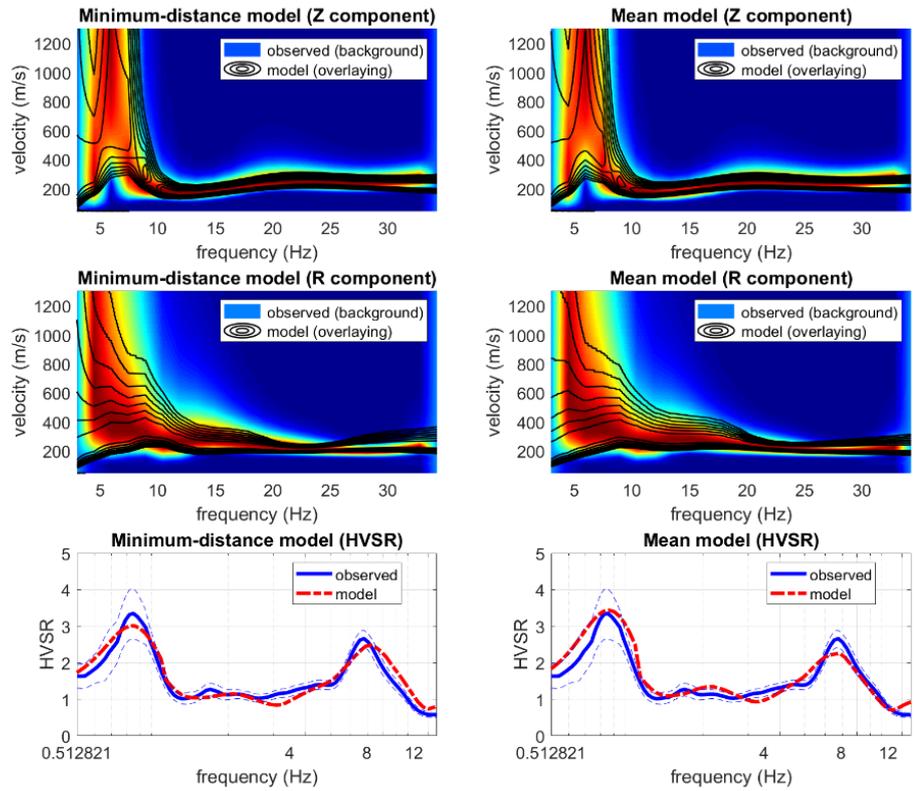
Continuità del rapporto H/V nel tempo e direttività (non si segnalano particolari direttività).

4.2 INVERSIONE CONGIUNTA Z+R+HVSR

Gli spettri di velocità di gruppo delle componenti Z e R (verticale e radiale) dell'onda di Rayleigh e l'HVSR sono state invertite congiuntamente secondo i criteri dell'ottimo paretiano (e.g. Dal Moro et al., 2019). Gli spettri di velocità sono stati gestiti tramite approccio FVS (*Full Velocity Spectrum* – Dal Moro 2014; 2019) quindi senza alcun *picking*/interpretazione in termini di curve modali. La curva HVSR è stata modellata in accordo a Arai & Tokimastu (2004), quindi considerando anche l'apporto delle onde di Love presenti nel campo dei microtremori (fattore α - vedi Dal Moro, 2014; 2019).



I tre *observables* utilizzati per l'inversione congiunta: le tracce sismiche attive delle componenti Z e R, la curva HVSR e gli spettri delle velocità di gruppo computate dalle due tracce attive (Z e R).



Risultato dell'inversione congiunta svolta (mostrati i dati riferiti al modello medio e al *minimum-distance model*).

5. COMMENTI

L'indagine sismica realizzata tramite analisi congiunta degli spettri di velocità di gruppo delle componenti Z e R e della curva HVSR (approccio *HoliSurface*[®]) ha consentito la determinazione del profilo V_S in modo robusto (cioè scevro da assunzioni che possano andare ad incrementare l'ambiguità della soluzione).

I limiti del lavoro sono essenzialmente rappresentati da due aspetti legati alle modalità di acquisizione dei dati:

- 1) limitato *offset* dei dati di dispersione (per cui la parte profonda del profilo V_S che è, evidentemente, basata sul solo rapporto HVSR [lasciando dunque una certa ambiguità rispetto la parte più profonda]);
- 2) un unico HVSR a disposizione: si dovrebbero acquisire sempre *almeno* due HVSR in due punti diversi dello stendimento (anche più di due se abbiamo a che fare con stendimenti molto lunghi) e computare poi la curva media (per dettagli vedi libro *Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica*, Dal Moro 2019).

D'altra parte, tanto i dati HS che HVSR a disposizione sono ben caratterizzati e l'accordo tra dati di campagna e dei modello risulta piuttosto buona (vedi sezione 3.2).

Tale profilo è stato successivamente utilizzato per la definizione degli spettri di risposta (la cosiddetta *Risposta Sismica Locale*), qui omessa per motivi di *privacy* rispetto la committenza del lavoro.

6. RISPOSTA SISMICA LOCALE

[*omissis*]

7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arai, H., Tokimatsu, K., 2005. *S-Wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical (H/V) spectrum*. Bull. Seism. Soc. Am. 95, 1766–1778.
- Arai, H., Tokimatsu, K., 2004. *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*. Bull. Seism. Soc. Am 94, 53–63.
- Dal Moro G., 2020. *On the identification of industrial components in the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) from microtremors*. Pure and Applied Geophysics (in stampa)
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S., 2019. *On the efficient acquisition and holistic analysis of Rayleigh waves: Technical aspects and two comparative case studies*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 125. On-line: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726118310613>
- Dal Moro G., 2019. *Effective Active and Passive Seismics for the Characterization of Urban and Remote Areas: Four Channels for Seven Objective Functions*. Pure and Applied Geophysics, 176, 1445-1465. Available on-line: <https://rdcu.be/bbT04>
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2017. *Improved Holistic Analysis of Rayleigh Waves for Single- and Multi-Offset Data: Joint Inversion of Rayleigh-wave Particle Motion and Vertical- and Radial-Component Velocity Spectra*. Pure and Applied Geophysics, on-line: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00024-017-1694-8.pdf>
- Dal Moro G. and Puzzilli L.M., 2018. *Single- and multi-component inversion of surface waves acquired by a single 3-component geophone: an illustrative case study*, Acta Geodyn. Geomater., 14, 4 (188), 431-444, online: https://www.irsm.cas.cz/materialy/acta_content/2017_doi/DalMoro_AGG_2017_0024.pdf
- Dal Moro G., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2017. *Analysis of Rayleigh-Wave Particle Motion from Active Seismics*. Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA), 107, 51-62
- Dal Moro G., Keller L., Al-Arifi N., Moustafa S.R., 2016. *Shear-wave velocity profiling according to three alternative approaches: a comparative case study*. Journal of Applied Geophysics, 134, 112-124
- Dal Moro G., 2016. *Four Geophones for seven possible objective functions: active and passive seismics for tricky areas*. Invited presentation and Extended Abstract for the Urban Geophysics workshop of the 22nd EAGE Near Surface Geoscience conference (4-8 September 2016 - Barcelona, Spain)
- Dal Moro G., Moustafa S.R., Al-Arifi N., 2015. *Less is more: from van der Rohe to the 4-channel system for the efficient and holistic acquisition and analysis of surface waves. An urban case study*. Proceedings of the GNGTS (Gruppo Nazionale Geofisica della Terra Solida - ogs.trieste.it) congress (17-19 November 2015 - Trieste, Italy)
- Keller L., Weber T., Dal Moro G., 2015. *Geophysikalische In-situ-Bestimmung der Eingangsparameter in die seismischen Standortanalysen am Beispiel des Ambassador House Opfikon*. Proceedings of the 14th D-A-CH conference of the Swiss Society for Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Zurich, August 21-21, SIA D0255, ISBN 978-3-03732-060-0
- Dal Moro G., Keller L., Poggi V., 2015. *A Comprehensive Seismic Characterization via Multi-Component Analysis of Active and Passive Data*. First Break, 33, 45-53
- Dal Moro G., Moustafa S.R., Al-Arifi N., 2015. *Efficient acquisition and holistic analysis of Rayleigh waves*. Proceedings of the Near-Surface EAGE 2015 congress (Turin - Italy) [having received a very high score from the reviewers, the work was invited to be published in *Near Surface Geophysics* (the paper was instead published in *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*)]

- Dal Moro G., 2015. *Joint Inversion of Rayleigh-Wave Dispersion and HVSR of Lunar Seismic Data from the Apollo 14 and 16 sites*. ICARUS, 254, 338-349
- Dal Moro G., Ponta R., Mauro R., 2015. *Unconventional Optimized Surface Wave Acquisition and Analysis: Comparative Tests in a Perilagoon Area*. Journal of Appl. Geophysics, 114, 158-167
- Dziewonski A., Bloch S., Landisman N., 1969. *A technique for the analysis of transient seismic signals*. Bull Seism. Soc. Am. 59, 427-444.
- Keller L., Dal Moro G., Spillmann T., Deplazes G., Madritsch H., 2019. *Mapping bedrock topography of the Lower Aare valley using seismic surface waves*. 7th Swiss Geoscience Meeting, Fribourg 2019 (22-23 November 2019)
- Mark, N., Sutton, G.H., 1975. *Lunar shear velocity structure at Apollo sites 12, 14, and 15*. J. Geophys. Res.80, 4932–4938.
- Nakamura, Y., 2000. *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. In: Proc XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand. Paper no 2656.
- Nakamura, Y., 1996. *Realtime Information Systems for Seismic Hazard Mitigation*. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI), 37, 112–127.
- Nakamura, Y., 1989. *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI), 30, 25–33.
- Natale M., Nunziata C., Panza G.F. 2004. *FTAN method for the detailed definition of Vs in urban areas*. In 13th World Conference on Earthquake Engineering, p. 2694. Vancouver, B.C., Canada.
- Perron V., Gélis C., Froment B., Hollender F., Bard P.-Y., Cultrera G., Cushing E.C., 2018. *Can broadband earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins*. Geophysical Journal International, 215, 1442–1454.
- Stemberk J., Dal Moro G., Stemberk J., Blahůt J., Coubal M., Košťák B., Zambrano M., Tondi E., 2019. [Strain monitoring of active faults in the central Apennines \(Italy\) during the period 2002–2017. Tectonophysics, 750, 22-35, https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.033](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.10.033)



Documento di presentazione del software *HoliSurface*[®]: qui

Giancarlo Dal Moro



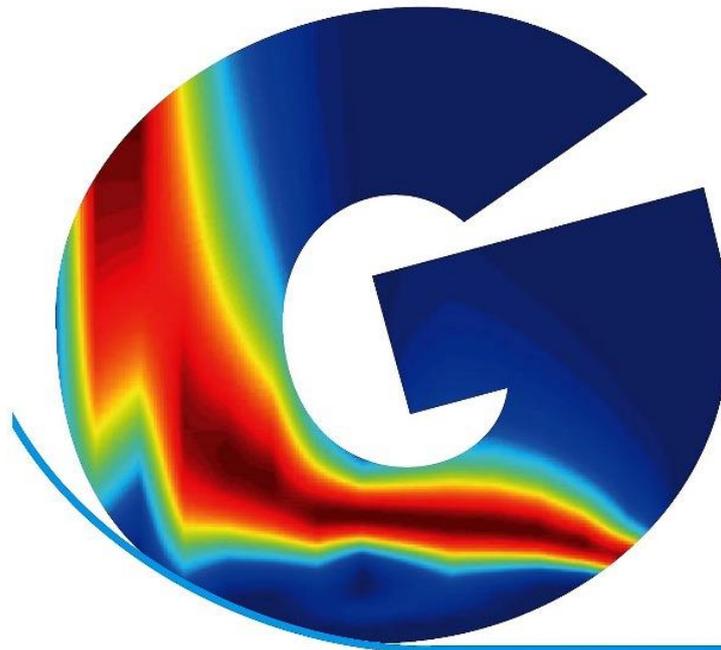
Dario Flaccovio Editore

Giancarlo Dal Moro

ACQUISIZIONE E ANALISI DI
DATI SISMICI E VIBRAZIONALI
PER STUDI DI
CARATTERIZZAZIONE SISMICA E GEOTECNICA



Acquisizione e analisi di dati sismici e vibrazionali
per studi di caratterizzazione sismica e geotecnica



- Le NTC nello scenario italiano ✓
- MASW multi-componente, HoliSurface[®], ESAC, MAAM e HVSR ✓
- Analisi FVS e RPM - Analisi congiunta: concetti e pratica ✓
- Analisi vibrazionali di cantiere ✓
- Analisi vibrazionali per la caratterizzazione di edifici (metodo classico e GHM) ✓

Shear source: the plate is set vertically (in a small hole dug in the ground). The horizontal force (hammer) is applied perpendicularly to the geophone array.



New book available in 2020:

**Efficient Joint Acquisition and Analysis of Surface Waves and
Introduction to Vibration Analysis: Beyond the Clichés**

(titolo provvisorio)



contact: winmasw@winmasw.com