



Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique

Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, veloce ed economica

Silvia Castellaro, Francesco Mulargia, Luca Bianconi

Dipartimento di Fisica, settore Geofisica
Università degli Studi di Bologna
Viale Carlo Berti Pichat, 8 - 40127 Bologna
silvia.castellaro@unibo.it

ABSTRACT

The HVSR technique enjoyed its greatest popularity in Japan as a fast tool for seismic microzonation, although its capability in this respect is still debated. What appears not questionable is the capability of this technique to retrieve the resonance frequencies of surficial sedimentary layers and to infer from these the relative stratigraphy, which can be transformed into the absolute stratigraphy if at least an approximate estimate of shear wave velocity (V_S) is available. In order to exploit this potential in practical stratigraphic applications, we used a new type of ultra-portable high resolution instrument and applied the HVSR technique to 5 different settings: 1) a slope debris in Predappio Alta (Forlì, Northern Apennines), 2) a classical problem of engineering geology: the foundation earths of a damaged building in Vodo di Cadore (Belluno, Eastern Alps), 3) the landslide bodies at Scascoli (Bologna, Northern Apennines), 4) the landslide of Ca' di Malta (Bologna, Northern Apennines), 5) a study of deep stratigraphy in a sedimentary basin (Casaglia, Ferrara, Po Valley). We found that the HVSR technique a) is an invaluable fast, cheap and fully non invasive stratigraphic tool, b) capable of resolving multiple strata, even in case of low seismic impedance contrast, c) applicable to nonplanar, d) 3-dimensional geometries, e) allowing deep prospections (of the order of 1 km depth) and, finally, f) if stratigraphy is known at some point, capable to provide fast and cheap estimates of average V_S .

Note. *In this paper the terms layer and stratum will be used in the seismic meaning to identify a stratigraphic unit which is distinguished from the units above and below it for its impedance contrast (that is for different values of density and seismic wave velocities).*

RIASSUNTO

La tecnica HVSR ha raggiunto la massima popolarità in Giappone, come strumento per una microzonazione sismica speditiva. Tuttavia in quest'ambito le potenzialità della tecnica sono ancora dibattute, mentre la sua capacità di rilevare le frequenze di risonanza degli strati sedimentari superficiali è ormai accertata. A partire da questo, è possibile ricavare una stratigrafia assoluta, a patto che sia nota una stima almeno approssimata della velocità delle onde di taglio V_S . Abbiamo verificato questa potenzialità, usando un nuovo tipo di strumento altamente portatile ad alta risoluzione, applicando la tecnica HVSR ad un insieme di situazioni differenti: 1) i detriti di versante di Predappio Alta (Forlì), 2) un problema classico di geologia tecnica: i terreni di fondazione di un edificio dissestato a Vodo di Cadore (Belluno), 3) i corpi di frana di Scascoli (Bologna), 4) la frana di Ca' di Malta (Bologna), 5) uno studio di stratigrafia profonda in un bacino sedimentario (Casaglia, Ferrara). Abbiamo trovato che la tecnica HVSR a) è uno strumento stratigrafico efficace, economico e totalmente non invasivo, b) capace di identificare più strati, anche in caso di contrasti di impedenza sismica bassi, c) applicabile a geometrie non planari, d) e tridimensionali, e) applicabile a prospezioni profonde (dell'ordine di 1 km di profondità) e, infine, f) se la stratigrafia è nota in un punto, capace di stime speditive dei valori medi di V_S .

Nota. *In questo lavoro il termine strato viene impiegato nella sua accezione sismica per identificare un'unità che si distingue da quelle sopra e sottostanti per il contrasto di impedenza (quindi per diversi valori di densità e velocità delle onde sismiche).*

INTRODUCTION

All the available in site investigation methods of the subsoil can be divided into two classes: *i*) the first class, which comprehends the classical geotechnical prospection (drillings, penetration tests, borehole tests, etc.), gives only point values, which cannot be immediately taken as representative of the surrounding area; *ii*) the second class, which comprehends all the classical geophysical prospections (seismic, geoelectric, magnetic, gravimetric, etc.) gives results extended in space but uses tools and requires a processing work which are cumbersome to be used in common practice. In some cases, for example in urban centres, it may result thoroughly inapplicable. Shared by both classes are the costs, which increase exponentially with the depth of investigation, forbidding in most cases any exploration below one hundred meters.

In this work we explore the use of a passive seismic technique (HVSr, Horizontal to Vertical Spectral Ratio) for the stratigraphic investigation of the subsoil, together with a new class of portable high resolution instruments which has recently become available. The HVSr stratigraphic technique is totally non-invasive, fast, cheap and convenient: it does not need any drilling nor deployment of cables, nor other energization than the ambient tremor which exists everywhere in nature.

The HVSr technique for stratigraphic purposes can be employed: *i*) as a preliminary surveying technique with the aim of locating the most representative sites on which investigation can possibly be refined with the classical techniques, *ii*) to verify, when other data already exist, the presence of significant heterogeneities around the sites investigated, *iii*) as an element which can supplement other investigations when these do not lead to clear interpretations.

We start by describing the theoretical bases of the HVSr technique and the instrumental apparatus used. We then present the results of the application of this technique to 5 interesting geological settings which have been extensively studied by standard surveying tools (Fig. 1): 1) a slope debris in Predappio Alta (Forlì, Northern Apennines), 2) a classical problem of engineering geology: the foundation earths of a damaged building in Vodo di Cadore (Belluno, Eastern Alps), 3) the landslide bodies at Scascoli (Bologna, Northern Apennines), 4) the landslide of Ca' di Malta (Bologna, Northern Apennines), 5) a study of deep stratigraphy in a sedimentary basin (Casaglia, Ferrara, Po Valley).

THE THEORETICAL BACKGROUND

The shape of a seismic wave recorded by an instrument at a site x is a function of:

1. the wave form produced from the source s ,
2. the wave path from the source s to the site x (which involves attenuations, reflections, refractions, wave guide phenomena),
3. the instrumental response.

We can write this as:

$$\text{signal recorded at the site } x = \text{source} \cdot \text{path effects} \cdot \text{instrumental transfer function} [1]$$

Let us ignore for the moment the instrumental transfer function and describe the other elements of equation [1].

Source

Seismic *tremor*, or seismic *ambient noise*, is present everywhere on the Earth surface and is generated by atmospheric phenomena (ocean waves, wind), anthropic activity as well as, obviously, the earth dynamics. It is also called *microtremor* because it involves very small oscillations (10^{-15} [m/s²]² in acceleration), much smaller than those induced by earthquakes of any size in the near field.

The geophysical methods based on tremor are called *passive* because they do not require any signal generated *ad hoc*, as for example the explosions used in the seismic prospection.

The frequency spectrum of tremor on flat rock has the pattern shown in Fig. 2, where the peaks at 0.14 and 0.07 Hz are commonly interpreted as originated by ocean waves. These spectral components are only slightly attenuated even after thousands kilometers because of wave guide effects. Local anthropic sources (traffic, industrial activity as well as the simple walk of a man) and natural sources overlap this general pattern – which is always present – but attenuate strongly at frequencies above 20 Hz due to the anelastic absorption produced by rock internal friction.

Path effects

Along the path between the source s and the site x , elastic waves (be them earthquake or tremor waves) undergo reflections, refractions and trapping due to wave guide effects, as well as attenuations, which depend on the nature of the subsoil along the path. On the one hand this means that the information relative to the source is quickly lost, so that the classical “ray

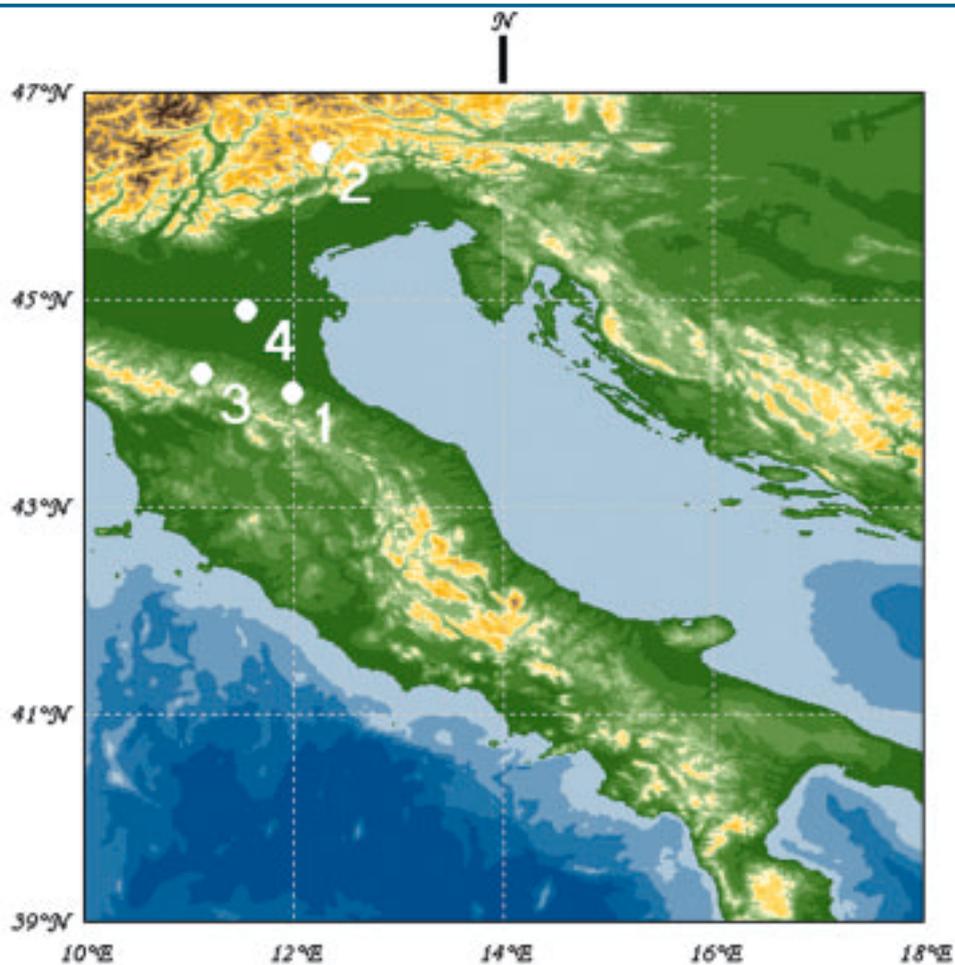


Fig. 1 - Location of the sites investigated in this study. 1) Predappio Alta (Forlì), 2) Vodo (Belluno), 3) Scascoli e Ca' di Malta (Bologna), 4) Casaglia (Ferrara).

Localizzazione dei siti investigati in questo studio. 1) Predappio Alta (Forlì), 2) Vodo (Belluno), 3) Scascoli e Ca' di Malta (Bologna), 4) Casaglia (Ferrara).

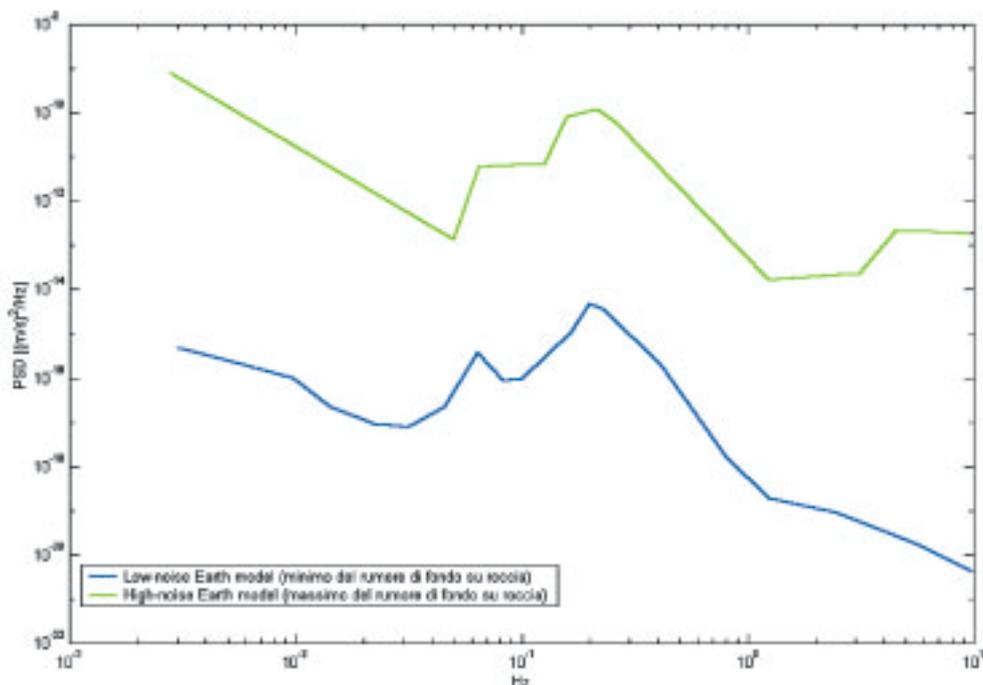


Fig. 2 - Maximum and minimum seismic noise spectra (in terms of velocity, vertical component of motion) according to the standard models of the USA Geologic Survey (USGS) (J. Peterson, Observations and modelling of background seismic noise, Open-file report 93-322, USGS, 1993).

Spettro del rumore sismico (in termini di velocità, componente verticale del moto) minimo e massimo secondo i modelli standard del servizio geologico USA (USGS) (J. Peterson, Observations and modelling of background seismic noise, Open-file report 93-322, USGS, 1993).

tracing” techniques of seismology cannot be applied. On the other hand, this also means that the only (weakly) coherent part of the signal will contain information relative to the local structure of subsoil in the vicinity of the sensor. Therefore seismic noise, which traditionally constitutes the part of the signal discarded in the classical seismologic/seismic investigation, contains valuable information about the subsoil structure. This information is deeply buried into random noise, and can only be extracted through appropriate techniques: HVSR is one of them.

The HVSR technique

Since the first empirical studies of KANAI [1957], a variety of methods have been proposed to retrieve information about the subsoil from tremor spectra recorded at a single station. Among them, the most popular is by far the HVSR technique, which consists of studying the ratio between the spectral and horizontal components of motion and was first applied by NOGOSHI and IGARASHI [1970]. The method was relaunched and divulged by NAKAMURA [1989; 2001] as a fast tool to measure the local seismic amplification. Consensus has not been reached on this point, although it is widely recognized that HVSR is capable of providing a reliable estimate of the main resonance frequencies of subsoil, which is nevertheless a crucial information for the seismic engineer. Given the acknowledged capability of this technique to provide correct estimates of resonance frequencies, and given the fact that, if estimates of elastic wave velocities are available, these can be translated into lengths, it seems that the HVSR technique can also act as a stratigraphic tool. The present paper attempts to substantiate this issue, providing also an answer to some of the questions which are still debated, and in particular: 1) whether HVSR is capable to resolve multiple strata, 2) whether it is able to resolve strata with low contrast, 3) whether it is applicable to nonplanar geometries, 4) whether it is capable to resolve 3 dimensional geometries and, finally, 5) whether it is applicable to deep prospection down to several hundred meters. We will see that, in all cases, the data support a positive answer.

The theoretical bases of HVSR are relatively simple in a 1-D layered configuration. Let us consider a system (see Fig. 3) where layers 1 and 2 differ for their density value (ρ_1 and ρ_2) and seismic wave propagation velocities (V_1 and V_2). A wave travelling across layer 1 is (partially) reflected at the transition with layer 2, and the reflected wave will interfere with incident waves and will give a maximum amplitude (fundamental

resonance frequency), when the wavelength of the incident wave (λ) is 4 times (or odd multiples) the thickness h of the first layer. In other words the fundamental resonance frequency (f_r) of layer 1 for the P waves is:

$$f_r = V_{P1} / (4 h) \quad [2]$$

while the fundamental resonance frequency for the S waves is:

$$f_r = V_{S1} / (4 h). \quad [3]$$

Theoretically, this effect is summable so that the HVSR should show (as relative maxima) the resonance frequency of layers. This, together with an estimate of seismic velocities which is generally available at least as a first approximation, allows one to predict the thickness h of the first (or more that one) layer. This information is mostly contained in the vertical component of motion, but the idea of using the ratio of horizontal to vertical spectra rather than the vertical spectrum alone derives from the fact that the ratio provides for an important normalization of the signal for a) frequency content, b) instrumental response and c) overall signal amplitude if the recordings are taken at times of higher or lower noise levels. This normalization, which makes signal interpretation simpler, is at the basis of HVSR popularity. An example of HVSR curve derived from a model built as in Fig. 3, for different impedance contrasts z is given in Fig. 4.

An apparent problem with this view is that microtremors are only partially constituted of body waves, P or S, and are also composed of surface waves (and in particular of Rayleigh waves; [cf. LACHET e BARD, 1994]). However, since surface waves are produced by the constructive interference of the body waves, the above equations still hold approximately.

The practical applicability of equation [3] has already been discussed in many studies both in the

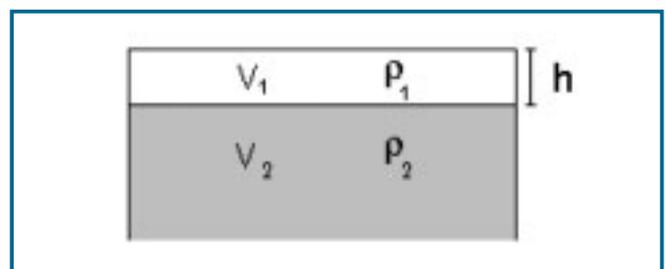


Fig. 3 - Schematic model of a subsoil constituted of two layers with different densities and seismic wave velocities.

Modello di suolo costituito da due strati a diverse velocità delle onde sismiche e densità.

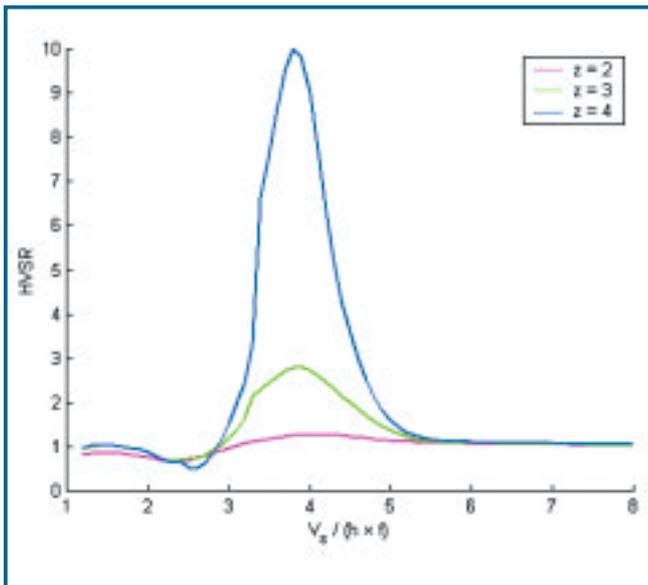


Fig. 4 - HV ratio obtained from a theoretical model for different impedance contrasts z between to layers.

Rapporti HV ottenuti da un modello teorico per diversi contrasti di impedenza z tra due mezzi.



Fig. 5 - The portable instrumentation used (TROMINO).

La strumentazione portatile impiegata (TROMINO).

fields of geophysical prospection and engineering [see MUCCIARELLI e GALLIPOLI, 2001, for a summary]. Since the situation depicted in Fig. 3 is typical of the sedimentary covers overlying the bedrock, the HVSR method was first of all applied to the problem of determining the thickness of the sedimentary covers [cf. IBS-VON SEHT e WOHLBERG, 1999, for an excellent example]. In this paper we will apply the HVSR method to a set of cases more specific in the practice of applied geology.

INSTRUMENTATION EMPLOYED

All the tremor recordings presented in this study have been acquired with the digital tromograph TROMINO (www.tromino.it), which is an instrument specifically designed to accomplish this task. It is a highly portable all-in-one device (dimensions: 10 x 7 x 14 cm, weight 1 kg) equipped with three orthogonal electrodynamic sensors (velocimeters), powered by two 1.5 V AA batteries, which includes an internal GPS antenna and does not have any external cable (Fig. 5). The extreme portability of this instrument allowed measurements on any kind of soil or slope on sites unreachable with instruments mounted on vehicles or the classical heavy seismographs. One operator sufficed to perform all the recordings and the quickness of installation and operation (1 min for the installation, 20 min for a full signal acquisition) allowed a large number of investigations at a very low cost.

DATA ANALYSIS PROCEDURES

The results of each analysis presented in this work have been obtained through the standard software Grilla which accompanies TROMINO. In short, recalling from the accompanying manual, after the motion has been digitized at 24 bit, for all the 3 motion components:

1. the acquired signal is divided into windows of length L (in this work usually 30 s),
2. each window is detrended,
3. tapered with a Bartlett window,
4. and padded with zeros.
5. The Fast Fourier Transform (FFT) is then computed for each window,
6. as well as the amplitude spectrum.
7. The spectra of each window are smoothed according to a function f , and the horizontal to vertical spectral ratio is computed at each frequency, for each window.

The final HVSR function at each frequency is given by the average of the HVSR of each window. In this work the HVSR have been computed by averaging the horizontal spectra with the quadratic average and dividing it by the vertical spectrum.

All the HVSR presented in this work have been obtained by smoothing the spectra with a triangular smoothing function f with a width equal to 5% the central frequency.

Case 1. **Mapping the landslide bodies** **at Predappio Alta (Forlì)**

We applied the HSVR technique to infer the principal stratigraphic horizons at Predappio Alta. The town of Predappio Alta is site of a large landslide with rotational sliding on noncircular surfaces which developed within cohesive materials [CANCELLE *et al.*, 1987]. This landslide involves mainly the conglomerate of the Formazione a Colombacci which outcrops in a series of disarticulated blocks, joined by a silty-sandy matrix and by slope debris (CGL). The Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) and, in some points, the Formazione a Colombacci (FCO) constitute the stiff basement of the landslide.

This landslide has been studied in detail since it threatened the urban center of Predappio Alta to such

an extent that it was considered the option of moving it to a safer place. The landslide has been extensively studied also during the seismic hazard analyses because it was reactivated several times by earthquakes [QUASCO, 2000].

The topography of the area is shown in Fig. 6, together with the location of some drillings for which data are available. The sites investigated with the HSVR technique are also shown. They are clustered on a secondary landslide body, dotted in Fig. 6, which overlies the main structure.

A schematic geological section (1'-1) crossing the landslide in the direction of motion, as inferred on the basis of the available drillings, is given in Fig. 7.

The site named G2 presents a first resonance peak at 2.8 Hz. Using an average V_s value equal to 350 m/s (inferred from a cross-hole measurement performed in

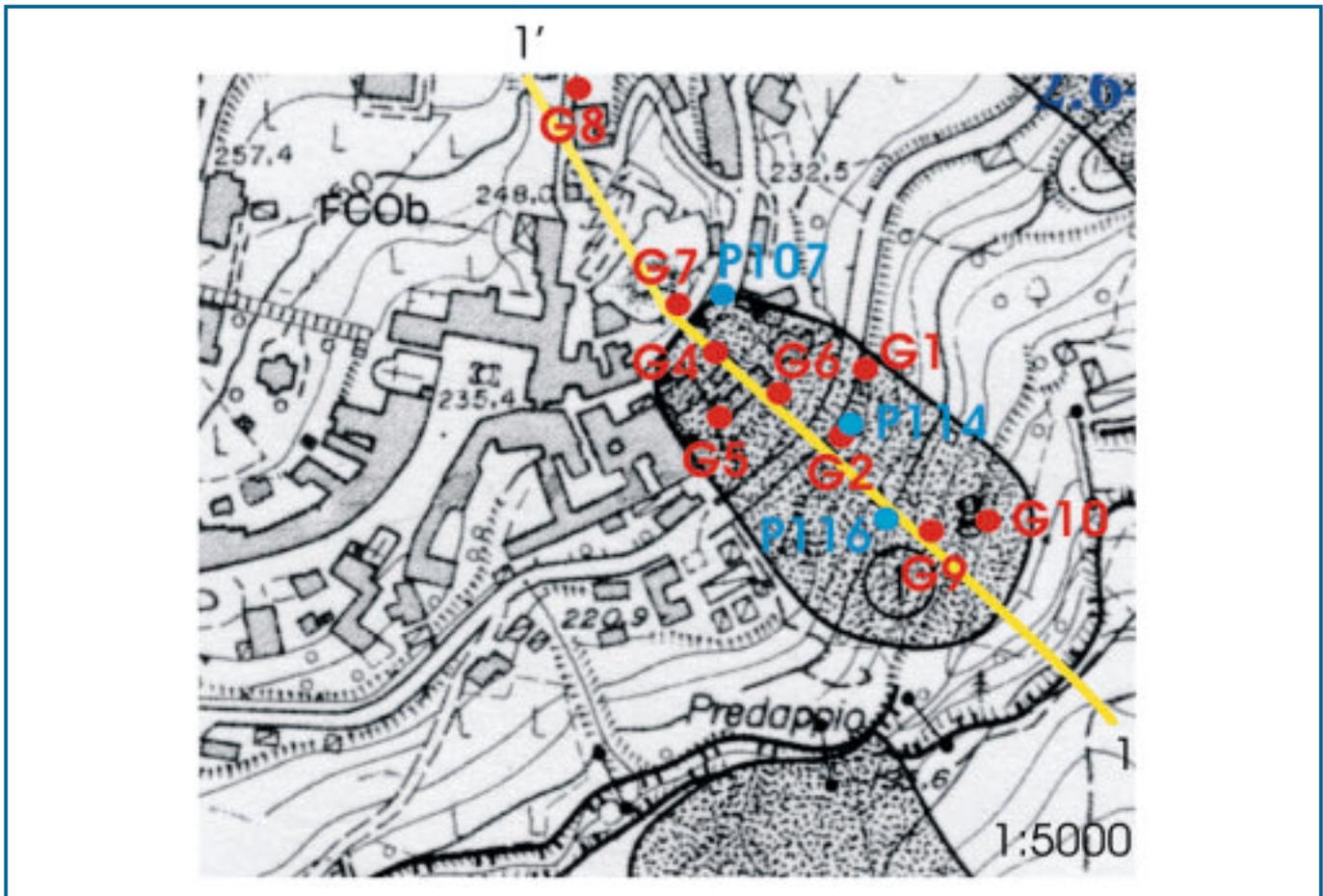


Fig. 6 - Partial cartography of the area including the Predappio Alta landslide. The blue markers locate the mechanical drillings; the red markers indicate the sites in which the HSVR surface measurements have been executed; the yellow line is the trace of section 1'-1' shown in Fig. 7. The close lines filled with dots indicate the slope debris deposit.

Cartografia parziale della zona comprendente la frana di Predappio Alta in esame. In blu sono indicate le localizzazioni dei sondaggi meccanici, in rosso le localizzazioni delle misure effettuate in superficie con la tecnica HSVR, in giallo la traccia della sezione 1'-1' mostrata in Fig. 7. Le linee chiuse riempite a puntini indicano gli accumuli del detrito di frana.

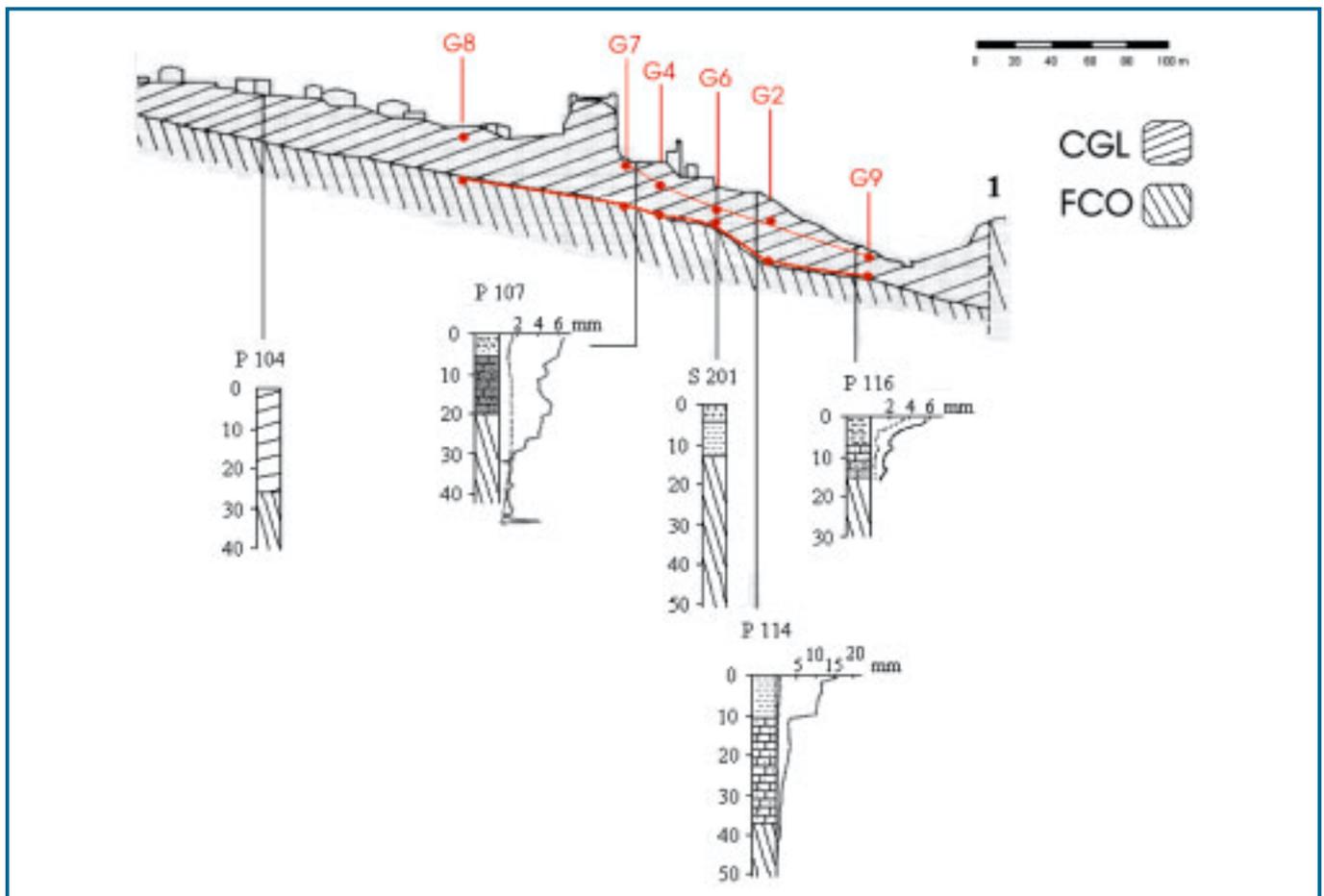


Fig. 7 - Part of the geological section 1'-1' which crosses the landslide. The main discontinuity (CGL vs. FCO) as inferred from the available drillings is marked in black. The schematic stratigraphic columns and the inclinometric profiles (dashed = 1996, solid = 1999) are shown on the bottom. Figure redrawn from QUASCO [2000]. The two discontinuity horizons as given by the passive seismic technique applied in this study are marked in red. Synthetic description of the stratigraphic columns, from top to bottom: P104 → conglomerates, bedrock; P107 → gravel, clayey marl with sand, bedrock; S201 → gravel, sand, conglomerate; P114 → gravel with sand, conglomerate and silty marl, bedrock; P116 → clay, conglomerate, bedrock.

Porzione della sezione geologica 1'-1' che attraversa la frana nel senso del suo movimento. In nero è la discontinuità principale (CGL vs. FCO) così come ricostruita sulla base dei sondaggi disponibili. In basso sono riportate le colonne stratigrafiche schematiche e le deformate inclinometriche (a tratteggio = 1996, continua = 1999). Figura ridisegnata da QUASCO [2000]. In rosso sono riportati i due orizzonti di discontinuità così come rilevati dalla tecnica di sismica passiva applicata in questo studio. Descrizione sintetica delle colonne stratigrafiche, dall'alto al basso: P104 → conglomerati, bedrock; P107 → ghiaia, marna argillosa con sabbia, bedrock; S201 → ghiaia, sabbia, conglomerato; P114 → ghiaia con sabbia, conglomerato e marna siltosa, bedrock; P116 → argilla, conglomerato, bedrock.

the same area), equation [3] leads to estimate the depth of the deeper horizon at -32 m. In the same site another clear peak is visible at 9.6 Hz and this, associated to a V_s equal to 250 m/s, let us estimate the depth of the second horizon at about 7 m. These values agree very well with boring P 114 drilled a few meters uphill, which met the first discontinuity at -10 m (transition from gravel assorted with sand vs. marl with sandstones and conglomerates) and a second discontinuity at -36 m (transition between marl with sandstones and conglomerates vs. bedrock marls). Further evidence of a first discontinuity at -10 m is also given by an inclinometer located at P 114 which indicates

movements of the order of 15-20 mm (data referred to 1999) in the first, as said, 10 m depth.

Two peaks can also be recognized in all the other sites investigated on the landslide body (Fig. 8 and Tab. 1), all corresponding to two different horizons with a clear impedance contrast. It may happen, as in G5, that when the distance between the two horizons is small and the relative frequency peaks are therefore close, the HVSR curve smoothing can give a plateau and does not allow to immediately resolve them. In these cases, the analysis of the time history of the HVSR curve can help recognizing the two peaks. This will be further discussed in the Discussion section below.

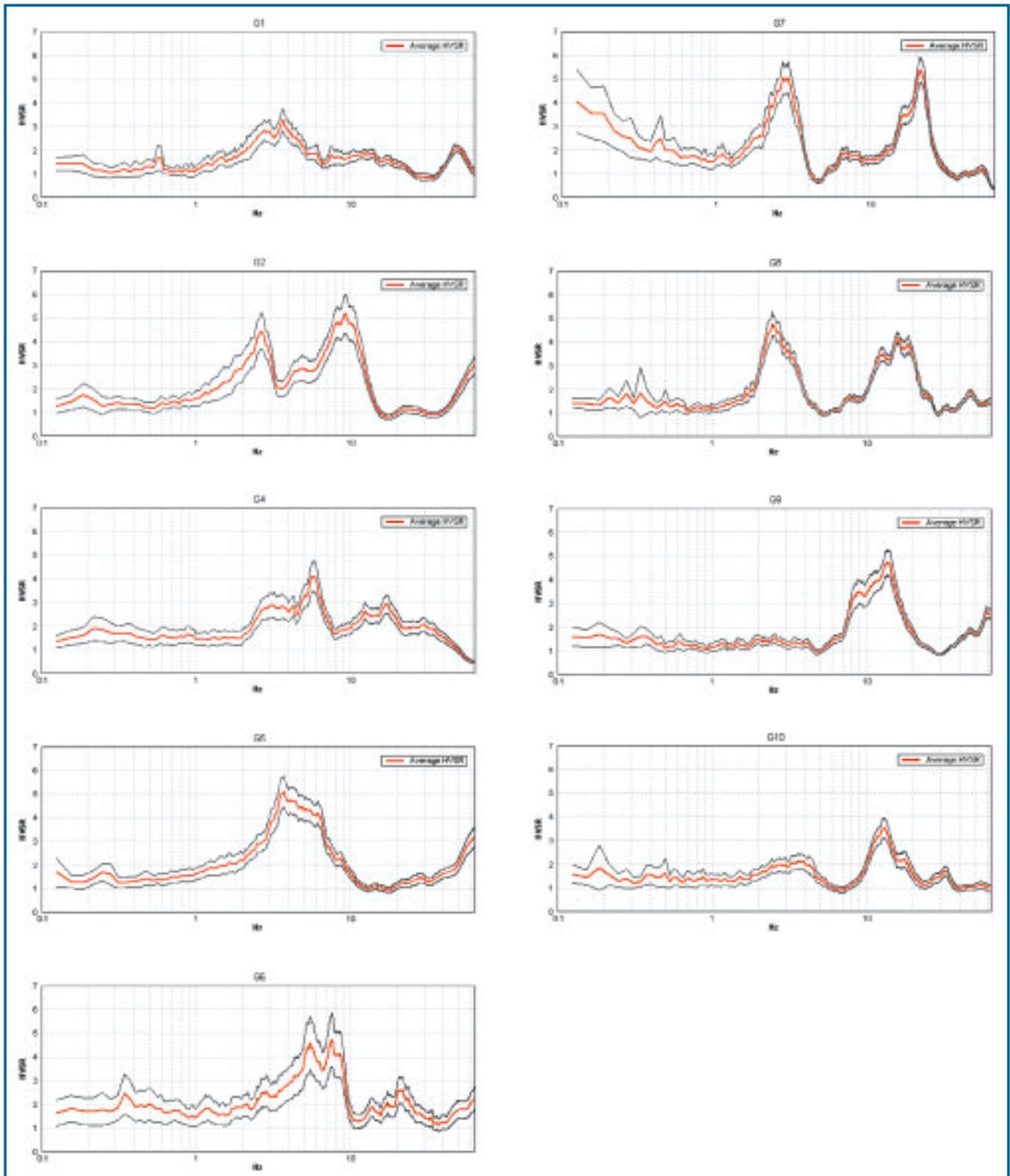


Fig. 8 - HV spectral ratios recorded at the sites G2, ..., G10 located as in Fig. 6. The red line is the average HV and the black lines the 95% confidence intervals.

Rapporti spettrali HV registrati nei punti di misura (G2, ..., G10) indicati su ciascuna grafico e localizzati come in Fig. 6. In rosso è l'HV medio, in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Table 1 - Summary of the results of the HVSr measurements shown in Fig. 8 at Predappio Alta. The depth [m] of the horizon which generates the impedance contrast is associated to the main peaks in the frequency domain [Hz]. Depths are calculated assuming an average V_s equal to 250 m/s in the first 10 m depth and equal to 350 m/s at higher depths (data retrieved from a cross-hole measurement executed in the same area).

Riassunto dei risultati ottenuti dalle misure HVSr riportate in Fig. 8 a Predappio Alta. Ad ogni picco in frequenza [Hz] corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza. Le profondità sono calcolate assumendo una V_s media pari a 250 m/s nei primi 10 m di profondità e una V_s media pari a 350 m/s per profondità superiori (dati evinti da misura cross-hole effettuata in zona).

Site <i>Sito</i>	Bedrock		Surficial discontinuity <i>Discontinuità superficiale</i>	
	Hz	m	Hz	m
G2	2.8	-32	9.6	-7
G4	3	-29	5.4	-11
G6	5.5	-16	7.6	-8
G7	2.9	-30	21.1	-3
G8	2.5	-35	15.8	-4
G9	9	-10	13.6	-4.5

In conclusion, in this case the HVSr method allowed to infer the presence of two main discontinuities in the subsoil: the deeper at about -30 m, which is the contact between the Formazione a Colombacci and the conglomerates facies. The second, which is encountered at a depth variable between 5 and 10 m, constitutes the landslide body within the conglomerates themselves (dotted area in Fig. 6).

QUASCO [2000] draws a schematic stratigraphical section based on the drillings which evidences only the main discontinuity, relative to the contact between CGL and FCO. We have slightly corrected this section between G6 and G2 (Fig. 7) on the basis of some further borings which have recently become available. We have then marked in red the results provided by the HVSr technique applied in this study. It is evident that the results are in very good agreement: the main discontinuity (conglomerates vs. bedrock) is located at the same depth and with the same pattern by both methods; while the secondary discontinuity coincides with data of the inclinometries.

Case 2.

A classical problem of applied geology: foundation earths of a damaged building in Vodo di Cadore (Belluno)

Second, we applied the HVSr technique as a tool to complement standard stratigraphies of engineering geology. The object of study was a building located in Vodo di Cadore (Belluno, 867 m above sea level) which

has recently undergone heavy damage due to an error in the design of its structure, as well as to the inadequacy of the foundations and the nature of the foundation soil. The building has two separate blocks, founded at the same depth, rigidly connected – and this is the design error – by metallic beams. One block underwent differential sinking and the rigid joints provided by the beams severely damaged the walls. From the geological relation kindly granted us by dr. Geol. M. Cabriel who took care of the study for the building restoration, we draw that the housing is “located at the foot of the slope, in an area which corresponds to the more distant part of an old rock fall constituted of blocks and gravels of calcareous-dolomitic nature. [...] The basis of this deposit swamped with following deposition of silty-clayey organic soils and peat. The wide fluvioglacial quaternary deposits [...], part of the rock fall, debris-flow and some localized swampy deposits mask the rocky subsoil”. Since according to the communal general planning project (PRG) the whole area is classified as “soil good for building purposes”, when the housing was built (1993?) no geologic investigation was performed while it has been conducted this year, after the differential sinking which involved the two blocks of the house.

The classical geognostic survey comprehended three continuous drillings (S1, S2 and S3 in Fig. 9) and two dynamic penetration test (SPTC in P1 and P2), commissioned and provided to us by dr. Geol. M. Cabriel.

The results of the drillings are shown in Tab. 2 - Tab. 4.

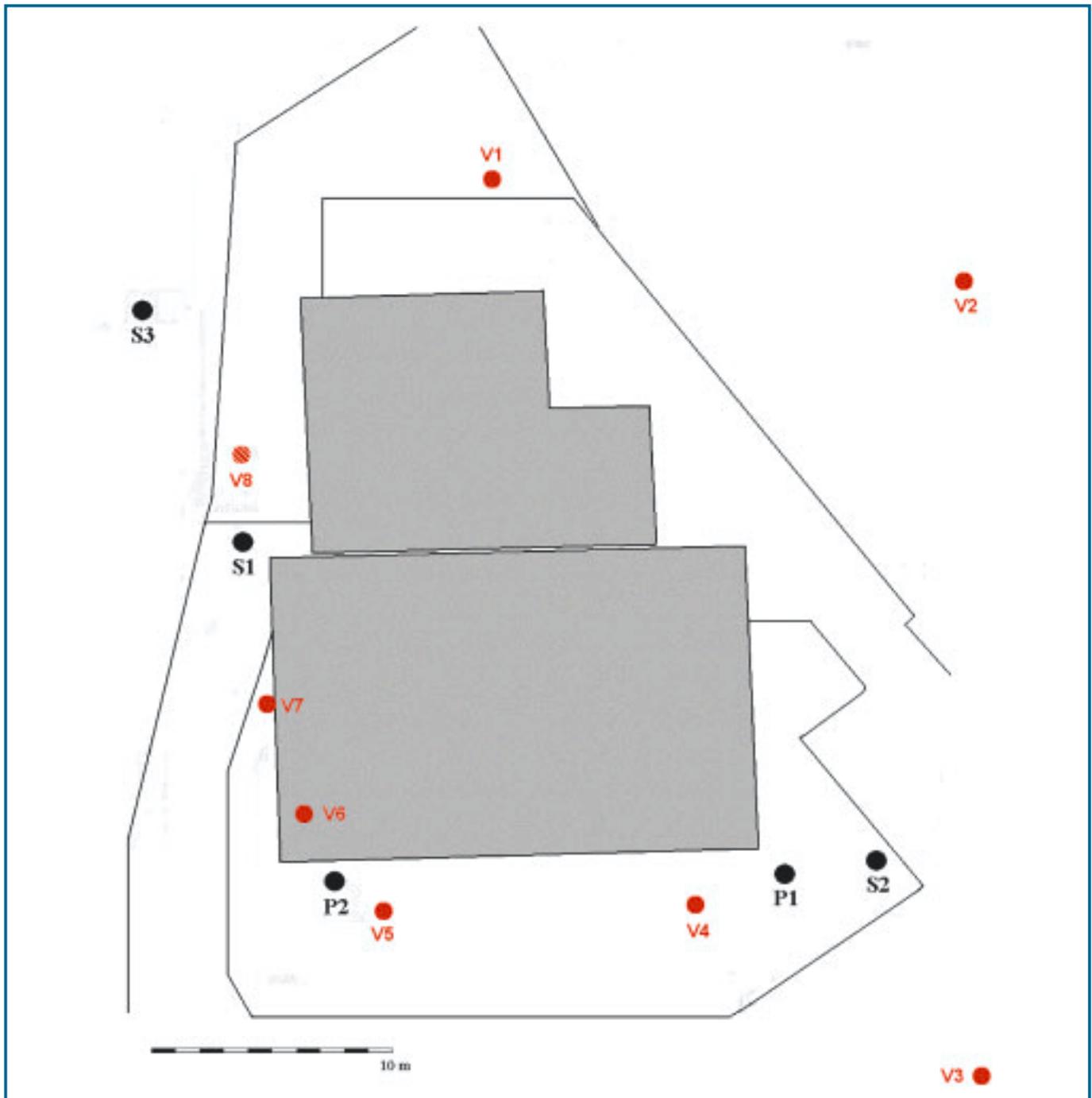


Fig. 9 - Planimetry of the building interested by the study performed at Vodo di Cadore (Belluno) with the location of the drillings and of the HVSR probes.

Planimetria dell'edificio interessato dallo studio a Vodo di Cadore (Belluno), localizzazione dei sondaggi e delle prove HVSR effettuate.

The dynamic penetration tests have been performed up to the depth of 6.20 m (Fig. 10, left) and showed that the earths under P2 have inferior geotechnical parameters in respect to P1 in the first 2.4 m depth (admissible pressure about 2.4 N/cm² against 6 N/cm² under P1 computed with the *formula*

degli Olandesi) while the situation reverses starting from 4.8 m depth and downwards, when the admissible load under P2 gradually starts to increase. The admissible load under P1, instead, after a marked peak at -1 m, diminishes under 2.40 m from the ground level and settles at about 3 N/cm² up to 5.80 m depth. Only below

Table 2 - Results of the drilling performed at site S1 in Fig. 9 [granted by dr. Geol. M. Cabriel].

Risultati del sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel punto S1 di Fig. 9 [per gentile concessione del dr. Geol. M. Cabriel].

Depth Profondità [m]	Stratigraphic description Descrizione stratigrafica
Up to 0.90 <i>Fino a 0.90</i>	Fill material <i>Materiale di riporto</i>
0.90 - 1.50	Sandy, slightly clayey gravel <i>Ghiaia sabbiosa moderatamente argillosa</i>
1.50 - 1.80	Peat <i>Torba</i>
1.80 - 2.70	Silty clay with gravel <i>Argilla limosa con ghiaia</i>
2.70 - 4.00	Sandy gravel <i>Ghiaia sabbiosa</i>
4.00 - 5.00	Dolomitized limestone (isolated block) <i>Calccare dolomitizzato (trovante)</i>
5.00 - 11.00	Gravel and cobbles with clay <i>Ghiaia e ciottoli con argilla</i>
11.00 - 15.00	Highly altered sandstone-marl (bedrock) <i>Ammasso roccioso arenaceo-marnoso (bedrock) molto alterato</i>

Table 3 - Results of the drilling performed at site S2 in Fig. 9 [granted by dr. Geol. M. Cabriel]. Site S2 is located at a quote 3 m above S1.

Risultati del sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel punto S2 di Fig. 9 [per gentile concessione del dr. Geol. M. Cabriel]. Il punto S2 si trova ad una quota relativa di +3 m rispetto a S1.

Depth Profondità [m]	Stratigraphic description Descrizione stratigrafica
Up to 1 <i>Fino a 1</i>	Fill material <i>Materiale di riporto</i>
1 - 5.70	Clayey deposit with little gravel <i>Deposito argilloso con poca ghiaia</i>
5.70 - 7.60	Clayey silt with gravel <i>Limo argilloso con ghiaia</i>
7.60 - 10.00	Sand and gravel <i>Sabbia e ghiaia</i>
2.70 - 4.00	Sandy gravel <i>Ghiaia sabbiosa</i>
10.00 - 15.00	Sandstone-marl (bedrock) little to highly altered <i>Ammasso roccioso arenaceo-marnoso da poco a molto alterato (bedrock)</i>

Table 4 - Results of the drilling performed at site S3 in Fig. 9 [granted by dr. Geol. M. Cabriel]. Site S3 is located at a quote 3.50 m above S1 and 0.5 m above S2.

Risultati del sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel punto S3 di Fig. 9 [per gentile concessione del dr. Geol. M. Cabriel]. Il punto S3 si trova ad una quota relativa di +3.50 m rispetto a S1 e +0.5 m rispetto a S2.

Depth Profondità [m]	Stratigraphic description Descrizione stratigrafica
Up to 0.70 <i>Fino a 0.70</i>	Fill material (organic) <i>Materiale di riporto (vegetale)</i>
0.70 - 2.40	Made ground <i>Materiale di riporto (limo argilloso con laterizi)</i>
2.40 - 5.70	Peaty clay with woods inclusions <i>Argilla torbosa con inclusi di legno</i>
5.70 - 10.00	Silty clay with gravel and cobbles <i>Argilla limosa con ghiaia e ciottoli</i>
Bedrock not crossed by drilling <i>Ammasso roccioso non raggiunto</i>	

this depth the admissible load in P1 instantly increases up to 12 N/cm². No data are available below this depth.

On the basis of these probes one can already expect a much higher impedance contrast at a 6 m depth under P1 rather than under P2, where the improvement of the soil properties is more gradual. It should be noted that the vertical scale in Fig. 10 is logarithmic and can therefore slightly mask the slow rise of the admissible load under P2, which occurs between -5 and -6 m, with respect to the fast one under P1, which occurs instantaneously at -5.8 m.

We have then investigated the subsoil around the whole building with the HVSR technique and results are shown in Fig. 11 and Tab. 5. The main peak allows to infer the depth of the bedrock which is located, around the whole building, between -10 and -12 m.

It should be noted that the impedance contrast between the soil immediately above the bedrock and the bedrock itself is much higher in V4 in respect to the other sites, as confirmed by the penetration test in P1. The HVSR peak amplitude in V4, in fact, is on average 17 versus an average amplitude of 7-8 in the other cases. Note in particular the difference in amplitude between V4 and V5 (17 against 6), in proximity of which the penetration tests are available.

Let us also note that at sites V1, V2 and V4 the method allows to correctly locate the depth of the fill material (in particular, at the site closer to the site S2, it

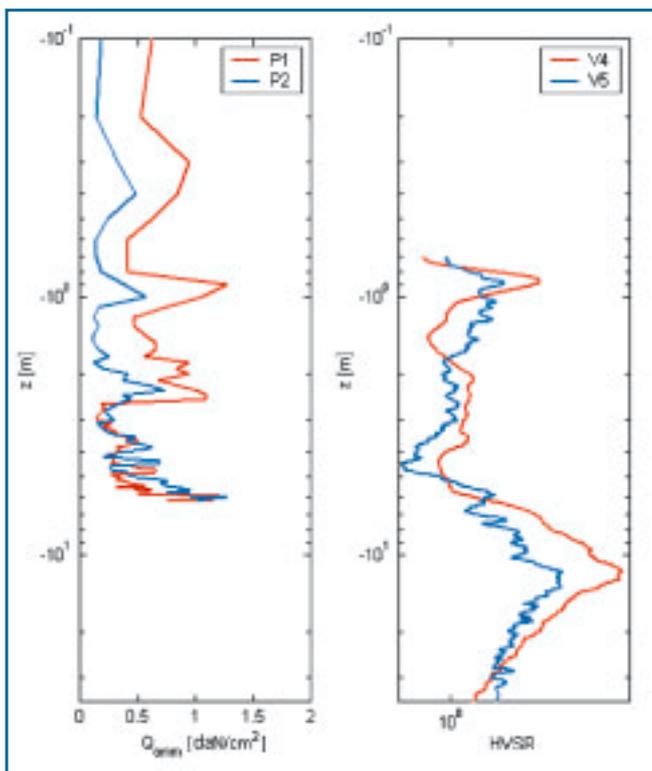


Fig. 10 - Comparison between the SPTC (left) performed at sites P1 and P2 and the HVSR plots (right) at sites V4 and V5. In this last case an increase in the sampling frequency (e.g. from 128 Hz to 256 Hz) could have given information relative to depths above 60 cm. On the other side the HVSR technique gives stratigraphic indications at depths much higher than those which can be reached in an economic way by penetration tests.

Raffronto tra gli SPTC (a sinistra) effettuati nei punti P1 e P2 e i rilievi HVSR (a destra) effettuati nei punti V4 e V5. In quest'ultimo caso notiamo che aumentando la frequenza di campionamento (per es. da 128 Hz a 256 Hz) si sarebbero potute ottenere informazioni anche per profondità inferiori ai 60 cm. D'altro lato la tecnica HVSR dà indicazioni stratigrafiche a profondità di indagine molto maggiori di quelle raggiungibili in modo "economico" dalle penetrometrie.

was 1 m and around it, with the HVSR method, 0.85 m). It can also be seen from Fig. 11 that the impedance contrast relative to this horizon is higher under V4 with respect to V5, as it is confirmed by the penetration tests where the transition at -0.85 m marks the step from an admissible load of 4 to 13 N/cm² under P1 and only from 2 to 5.5 N/cm² under P2.

The method allows also to recognize a set of other discontinuities both above and below this depth. As an example, at site V5 there is a clear discontinuity (albeit smaller in terms of amplitude with respect to the one relative to the bedrock) at 7.7 Hz, which corresponds to 5.5 m depth. And it is exactly at this depth that penetration test shows an improvement in the mechanical properties of the medium. In this same way, the plateau between 4 and 7 Hz, which is present at all the sites investigated, stands for a coalescence of minor peaks corresponding to minor discontinuities located between 6 and 10 m depth.

In conclusion, our survey performed with the HVSR technique appeared capable to provide information about the depth of the strata as well as about the relative impedance contrast between the strata. Since a very high peak indicates a strong impedance contrast, this stands for a possibly alarming poor mechanical coherence of the formations above the contrast horizon.

Table 5 - Summary of the results of the HVSR measurements at Vodo di Cadore. The depth [m] of the horizon which generates the impedance contrast is associated to the main peaks in the frequency domain [Hz]. Depths are calculated assuming an average V_s equal to 170 m/s.

Riassunto dei risultati principali ottenuti dalle misure HVSR a Vodo di Cadore. Ad ogni picco in frequenza [Hz] corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza. Le profondità sono calcolate assumendo una V_s media pari a 170 m/s.

Site	Bedrock						Fill material	
							Materiale riporto	
Sito	Hz	m	Hz	m	Hz	m	Hz	m
V1			3.7	-11.5			30	-1.4
V2			3.7	-11.5			37	-1.1
V3			3.7	-11.5				
V4			3.9	-10.8			50	-0.85
V5			3.7	-11.5	7.7	5.5		
V6	1.7	-25/-30	3.7	-11.5				
V7			3.7	-11.5				
V8	1.7	-25/-30	3.7	-11.5				

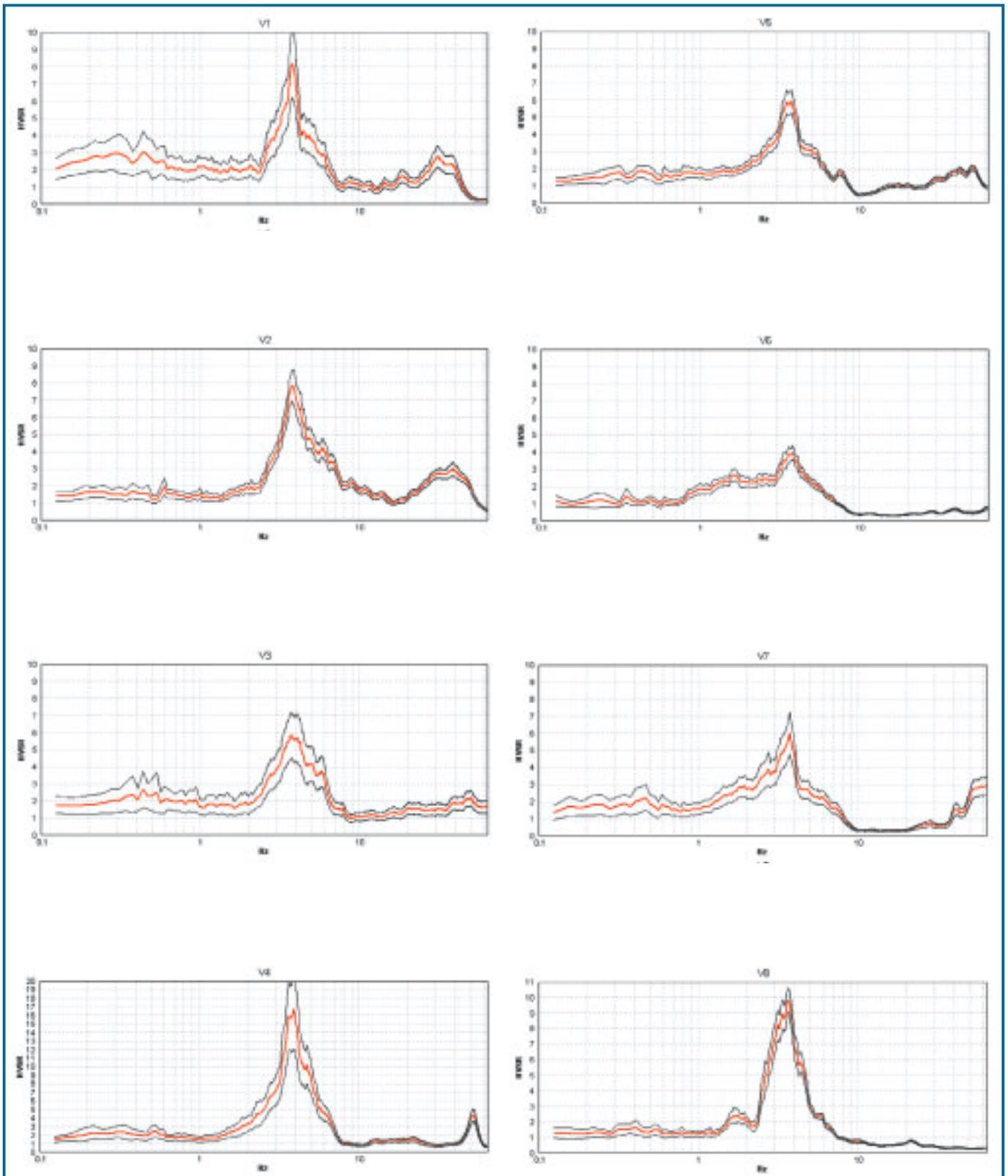


Fig. 11 - Spectral HV ratios recorded at sites V1, ..., V8 located as in Fig. 9. The red line is the average HV, the black lines are the 95% confidence interval.

Rapporti spettrali HV registrati nei punti di misura V1, ..., V8 localizzati come in figura 9. In rosso è l'HV medio, in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Case 3. **Landslide bodies mapping at Scascoli (Bologna)**

The Scascoli gorges (Bologna) are located in an area historically prone to landslides, crossed by river Savena. The stratigraphic succession of the area presents an alternation of sandstones and marls (Formazioni di Antognola and Bismantova), interrupted by sliding surfaces at large and small scale. The presence of an important road on the valley bottom and the historical instability of the slopes caused this area to be extensively studied. Four borings along section A-A'

(Fig. 12) which crosses the provincial road have been drilled to depth between 20 and 50 m, until the bedrock was reached. Along this section, in particular, it seems to exist two minor slipping surfaces which would constitute the landslips on the foot of the much wider Scascoli landslide. The deeper slipping surface is linked to a quiescent landslide and has a 20 m thickness in the central part. A more surficial slipping surface, which has been crossed only by boring S6 and S6bis, seems to involve a part of the still evolving landslide and to have a 7-10 m thickness in the central part.

Along this section we have performed a series of HVSR measurements by placing the instrument on sites

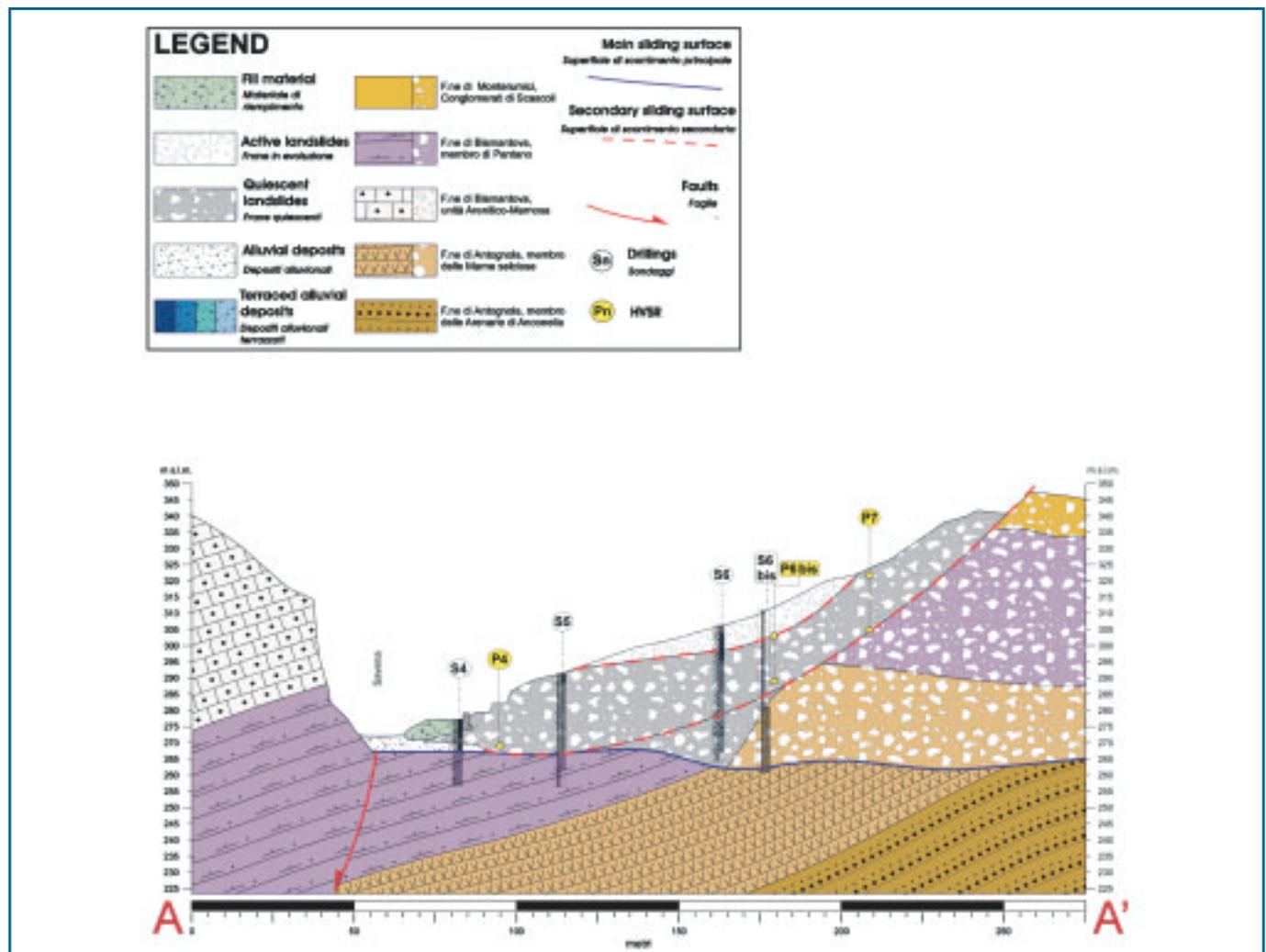


Fig. 12 - Geological section of Scascoli gorges (Bologna), modified from the original of Ferro [2003], location of the drillings (S#) and of the HVSR measurements performed on the surface (P#). Drillings S5 and S6 have been equipped with inclinometers. The red dashed lines indicate the land sliding surfaces inferred on the basis of drillings. The yellow circles indicate the land sliding surfaces inferred on the basis of the HVSR method.

Sezione geologica delle gole di Scascoli (Bologna), modificata dall'originale di Ferro [2003] e localizzazione dei sondaggi meccanici (S#) e delle misurazioni HVSR effettuate in superficie (P#). I sondaggi S5 e S6 sono stati attrezzati con inclinometri. Le linee a tratteggio rosso indicano le superfici degli scorrimenti di frana inferite sulla base dei sondaggi meccanici effettuati. I cerchi gialli indicano invece la posizione delle superfici degli scorrimenti di frana inferita sulla base del metodo HVSR applicato in questo studio.

P7, P6bis and P4 and recording at each site for 20 minutes. The results obtained in terms of spectral ratios are shown in Fig. 13. Under site P7, where no mechanical drillings are available, two seismic discontinuities exist: the principal one, in terms of impedance contrast, is located at a depth of 16 m (main peak at 4 Hz, average $V_S = 250$ m/s), the second at about 4 m depth (peak at 15 Hz).

Under site P6bis two partially overlapping peaks can be identified: the first one at 3 Hz and the second one at 5.5 Hz, corresponding to discontinuities at 20 and 11 m depth.

Last, site P4 has a clear peak at 7 Hz, which corresponds to a discontinuity at 9 m depth.

Fig. 12 shows the location of the main discontinuity surfaces inferred through the HVSR method (yellow

circles) compared to the discontinuity surfaces inferred on the basis of drillings (red dashed lines). There is a good agreement and the HVSR method suggests that the more surficial sliding surface could continue a little uphill with respect to site S6bis and that the depth of the quiescent landslide body under P4 is a little less than what extrapolated on the basis of the drillings.

Case 4.

Landslide body mapping at Ca' di Malta (Bologna): a difficult case

The Ca' di Malta landslide, located in the northern Apennines, on the eastern bank of the river Reno (Fig. 14), is active since 1914. In 1997, after its last reactivation which has partially obstructed the river, the landslide body has been equipped with several instruments in order to monitor its movements. Two drillings (localized on sites 1 and 3 in Fig. 14) have defined the stratigraphy described in Tab. 6 and Tab. 7.

It can be noted as the landslide body and basement are composed of clay. Drillings, inclinometers [MORA *et al.*, 2003], seismic and geoelectric investigations [MERNI, 2002] led to the conclusion that the first 4-6 m are characterized by reworked clays involved in the sliding, while the transition between the altered covering and the bedrock (constituted again of clay but not reworked) should be located at 12-16 m.

In principle, this is a particularly "difficult case" since it involves a single litotype, although this appears under more or less plastic and reworked forms. However the method seems to work well and, within the landslide body, the HVSR shows always two resonance peaks (C0, C1 in Fig. 15) while outside it (C2) a single peak is apparent. In particular, by using an average VS equal to 180 m/s, which seems adequate due to the incoherence of the surficial soil, the two peaks inside the landslide correspond to the depth of 6 and 18 m which mark the horizon between the grey reworked clay, and the green clay (Tab. 8). Below this depth the bedrock is expected (still constituted of clay but with different mechanical properties).

Under C0 a third discontinuity is apparent, at the depth of 11 m. Right on the rim of the landslide (C2) one discontinuity only can be recognized at the depth of 5 m. This is again expected to be linked to the transition between the reworked clay and the grey clay. An inclinometer located in C2 [MORA *et al.*, 2003] has in fact shown that also this point, although considered as located outside the main landslide, has been undergoing displacement since 1999 in the first few meters depth.

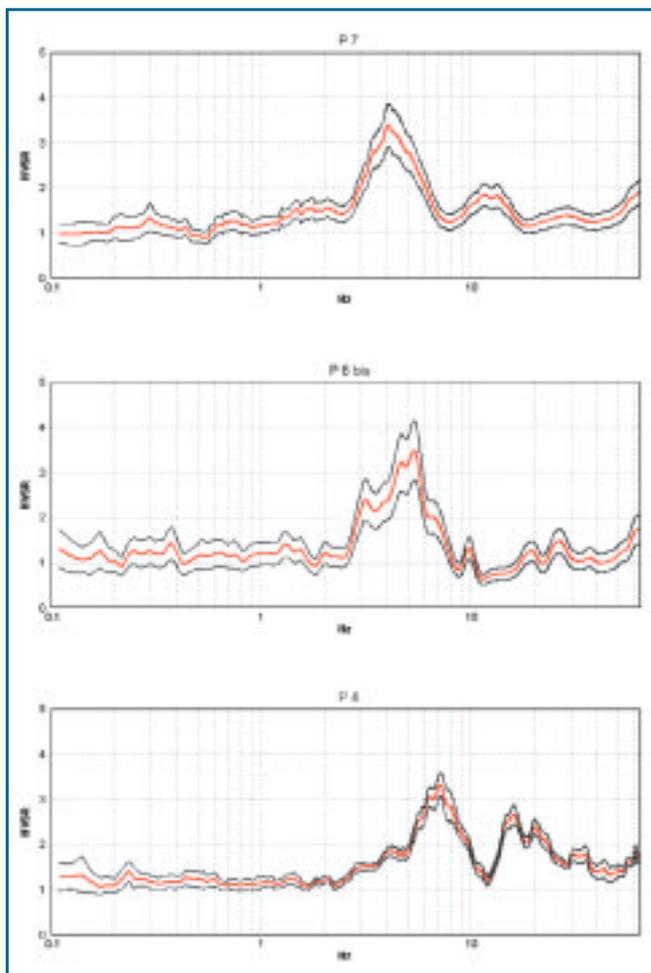


Fig. 13 - Spectral HV ratios recorded at sites P7, P6bis and P4 located as in Fig. 12. The red line is the average HV, the black lines are the 95% confidence interval.

Rapporti spettrali HV registrati nei punti di misura P7, P6bis e P4 localizzati come in Fig. 12. In rosso è l'HV medio, in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

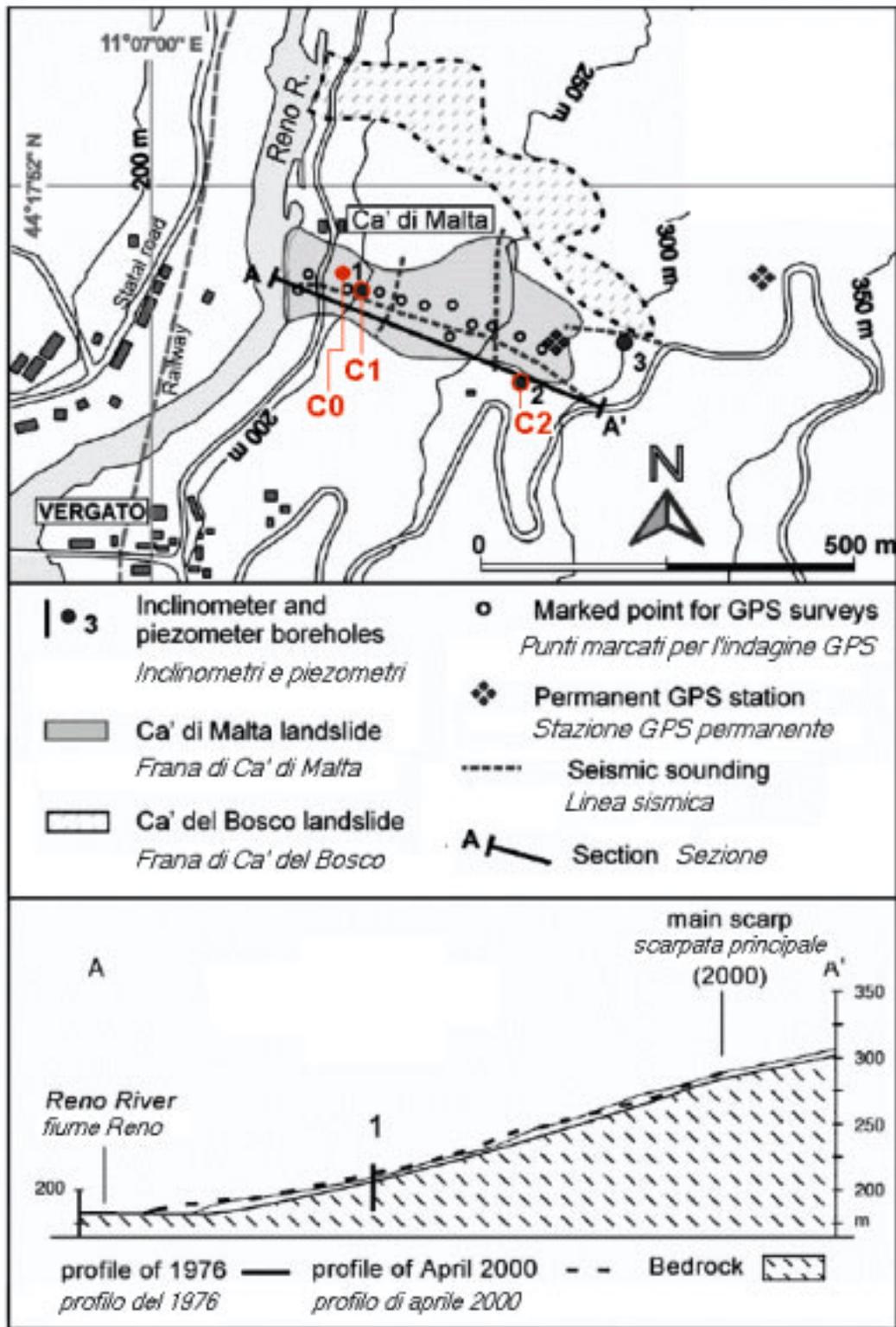


Fig. 14 - Top: location of the Ca' di Malta landslide and of the instrumentation installed to monitor it. **Bottom:** schematic profiles of the landslide in different years [modified from the original published in MORA *et al.*, 2003, with the permission of Elsevier].

In alto: localizzazione della frana di Ca' di Malta e della strumentazione installata per il suo monitoraggio. In basso: profili schematici della frana in anni diversi [modificata dall'originale pubblicato in MORA *et al.*, 2003, con il permesso di Elsevier].

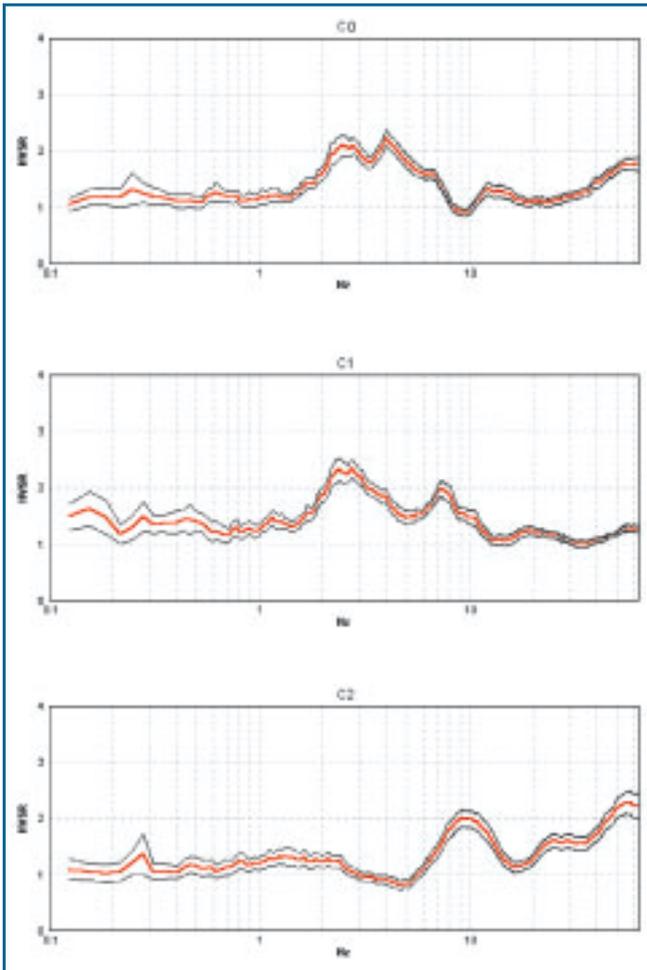


Fig. 15 - Spectral HV ratios recorded at sites C0, C1 and C2 located as in Fig. 14. The red line is the average HV, the black lines are the 95% confidence interval.

Rapporti spettrali HV registrati nei punti di misura C0, C1 e C2 localizzati come in Fig. 14. In rosso è l'HV medio, in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Table 6 - Stratigraphy of site 1 in Fig. 14 as inferred from drillings.

Risultati del sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel punto 1 di Fig. 14.

Depth Profondità [m]	Stratigraphic description Descrizione stratigrafica
Up to 5.30 Fino a 5.30	Grey-brownish silty clay with gravel and cobbles of calcareous origin <i>Argilla limosa grigio nocciola con ghiaia e ciottoli di natura calcarea</i>
Up to 18.00	Greenish-grey clay with argillite levels <i>Argilla grigio-verde con livelli più marcatamente argillitici</i>

Table 7 - Stratigraphy of site 3 in Fig. 14 as inferred from drillings.

Risultati del sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel punto 3 di Fig. 14.

Depth Profondità [m]	Stratigraphic description Descrizione stratigrafica
Up to 5.50 Fino a 5.50	Brownish silty clay with decimetric cobbles of calcareous origin <i>Argilla limosa nocciola con trovanti decimetrici di natura calcarea</i>
Up to 12.00	Slightly silty clay with decimetric cobbles of calcareous origin <i>Argilla debolmente limosa grigia con trovanti decimetrici di natura calcarea</i>

Table 8 - Summary of the results obtained from HVSR measures at Ca' di Malta. The depth [m] of the horizon which generates the impedance contrast is associated to each peak in the frequency domain [Hz]. Depths are calculated assuming an average V_s equal to 180 m/s.

Riassunto dei risultati ottenuti dalle misure HVSR a Ca' di Malta. Ad ogni picco in frequenza [Hz] corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza. Le profondità sono calcolate assumendo una V_s media pari a 180 m/s.

Site Sito	Peak Picco		Peak Picco		Peak Picco	
	Hz	m	Hz	m	Hz	m
C0	2.5	-18	4	-11	7	-6
C1	2.5	-18			7.5	-6
C2					9	-5

Case 5.
Retrieve a deep bedrock: Casaglia, Ferrara

In all the examples described above we have dealt with stratigraphic situations in which the impedance contrasts occurred at relatively low depths. In the case of Casaglia (Ferrara), we applied the HVSR technique to a deep stratigraphic problem. This site is located on a structural height of the Ferrarese ridge and precisely where the Quaternary basement (Oligocene

marls and sandstones) has been crossed by drillings at the depth of 135 m. Above this, the alluvial cover (alternation of sand, silt and two paleosoils) is present, as in Fig. 16.

The V_s pattern on this site is known, with the typical data dispersion, from other surveys and in the first 130 m its average value is 400 m/s. The inversion table can therefore be compiled (Fig. 17, Tab. 9), which shows a very good agreement with the drilling outputs.

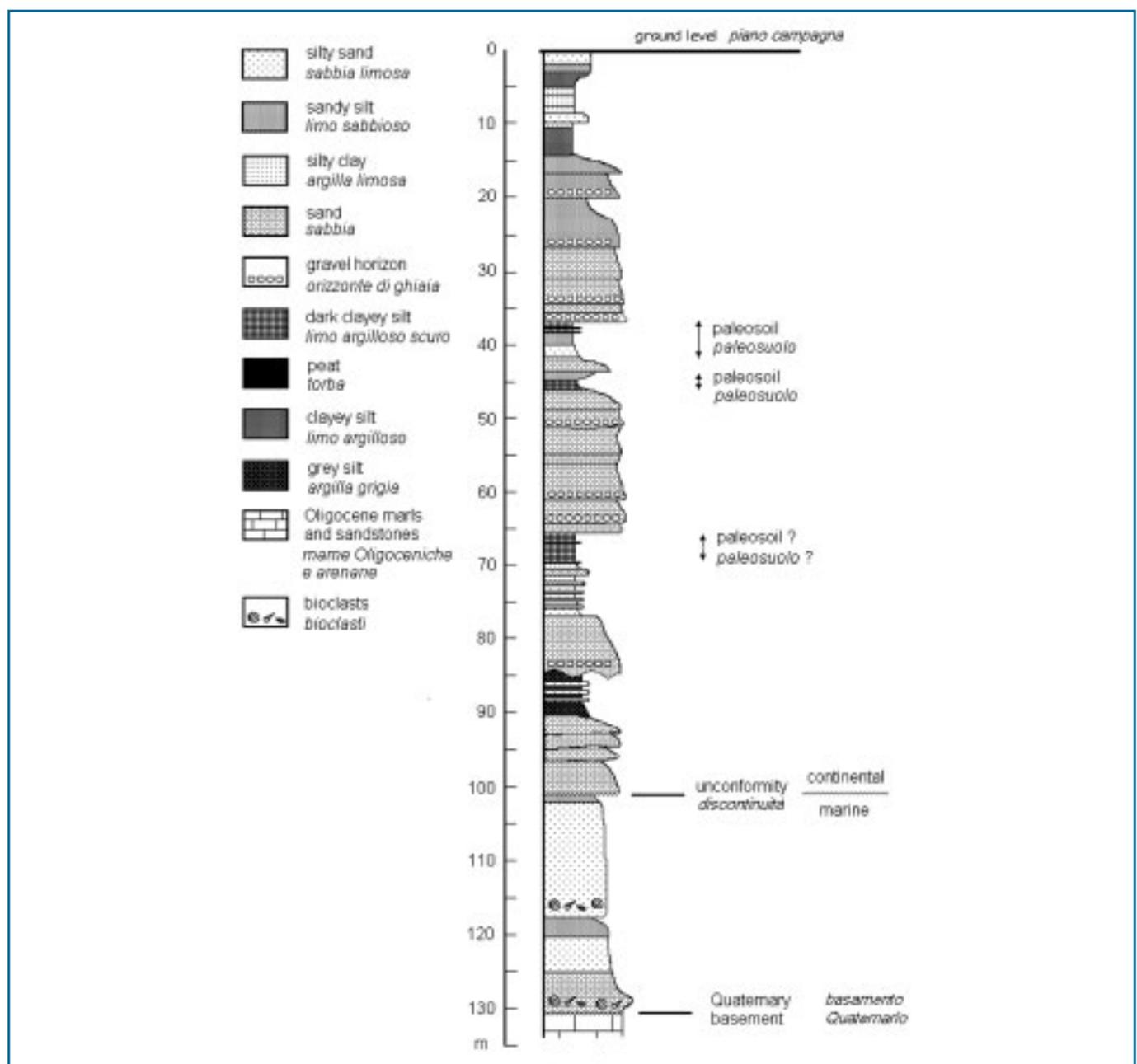


Fig. 16 - Stratigraphy at the site of (Ferrara). [Redrawn from COCCO et al., 2001].
 Stratigrafia al di sotto di Casaglia (Ferrara). [Ridisegnata da COCCO et al., 2001].

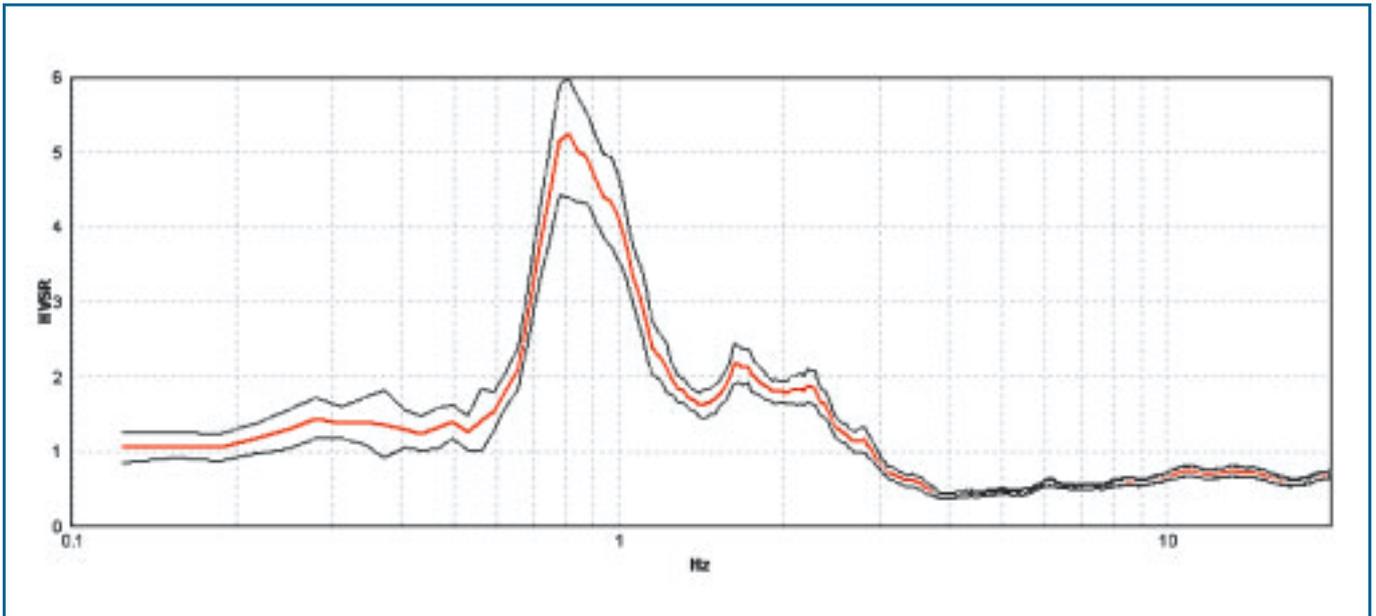


Fig. 17 - HVSr curve obtained at the Casaglia (Ferrara) site. The red line is the average HV, the black lines are the 95% confidence interval.

Curva HVSr ottenuta nel sito di Casaglia (Ferrara). In rosso è l'HV medio, in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

Table 9 - Summary of the results obtained from HVSr measures at Casaglia. The depth [m] of the horizon which generates the impedance contrast is associated to each peak in the frequency domain [Hz]. Depths are calculated assuming an average V_s equal to 400 m/s in the first 130 m depth and equal to 270 m/s in the first 45 m.

Riassunto dei risultati ottenuti dalle misure HVSr a Casaglia. Ad ogni picco in frequenza [Hz] corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto di impedenza. Le profondità sono calcolate assumendo una V_s media pari a 400 m/s nei primi 130 m e pari a 270 nei primi 45 m.

Site Sito	Bedrock		Hz	m
	Hz	m		
Casaglia (FE)	0.75	-133	1.72	-40

DISCUSSION

Our analysis allowed us to put on firmer grounds some practical issues on HVSr which we summarize in the following.

What do the HVSr curves mean? What do the amplitude in the HVSr curves mean?

The HVSr plot is traditionally a frequency (x) vs. amplitude of the HV (Horizontal to Vertical) ratio (y) plot. Since the frequency is related to depth through equation [3], the HVSr plot can be transformed into an amplitude of the HV ratio (x) vs. depth (y) plot, as shown in Fig. 10 where the amplitude of the HV ratio

(x) describes the amplitude of the impedance contrast between the means above and below that specific depth (y).

Each peak in the HV plot corresponds to a stratigraphic level which is distinguished from the underlying layer for the impedance contrast. The larger the contrast, the higher the amplitude expected for the HV peak (Fig. 4) although the relation between the two variables is not linear. It is clear that the number of peaks visible in a HVSr plot depends on the contrast, on the vicinity of the two layers, and on the smoothing function used. A low contrast between two close strata will not make them individually resolvable and at the same time a large smoothing, acting as a low pass filter, will make all minor discontinuities coalesce.

It should also be noted that for the same reason an increase in the smoothing may lead to a decrease of the absolute amplitude of each peak as illustrated in Fig. 18, and therefore the same analysis procedure should be used during the whole survey to make results comparable.

May peaks of anthropic origin, or however not linked to the subsoil nature, exist?

It may obviously happen that peaks of anthropic origin appear on HVSr. However, these are generally narrow and appear as positive peaks with different amplitudes on all the three motion components (vertical, north-south and east-west) while generally the

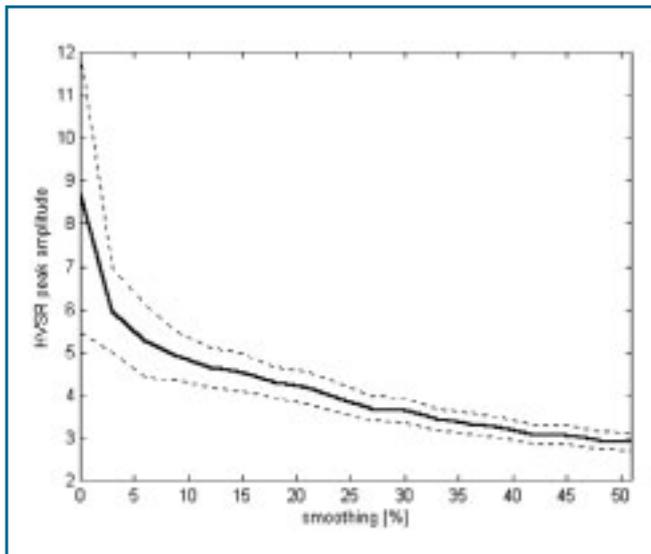


Fig. 18 - Amplitude variation of an HVSR peak (the one shown in Fig. 17) as a function of the amplitude of the smoothing window.

Variazione dell'ampiezza di un picco HVSR (quello riportato in Fig. 17) in funzione dell'ampiezza della finestra di lisciamento impiegata.

HVSR of natural origin is determined by a relative minimum of the amplitude spectrum of the vertical component.

Anthropic peaks, e.g. those related to industrial activity, can disappear at night and appear exactly with the same shape in all the recordings performed in the same area.

Another feature of the peaks with anthropic origin is their clear directionality which can easily be put in light by *ad hoc* graphs like those furnished by the software used to analyse the data in this study.

How can V_S be estimated?

In order to use HVSR as a stratigraphic tool it is necessary to estimate the shear wave velocity (V_S).

Should the V_S be known from other investigations, then it is sufficient to use these values to invert equation [3] and derive the depth. Otherwise it suffices to take an HVSR measurement at a site in which the stratigraphic discontinuities are known and to use the resonance frequencies found in this way and the depth of the associated horizons to find the V_S , always through formula [3].

Finally, it should be noted that since V_S generally increases with depth, it may be necessary to correct the V_S value as a function of depth when very deep and surficial horizons are considered in the same analysis, in order to obtain more precise estimates.

Lower and upper limits of depth of analysis.

The lower and upper limits of the depth which can be investigated through the HVSR technique depend on the amplitude of the frequency band of the employed instrument and on the average V_S of the means. In the example of Casaglia (Fig. 17), the peak at 0.75 Hz, for that V_S , corresponded to a depth of the resonance horizon of 130 m. In the literature many cases exist of peaks at 0.2-0.3 Hz which correspond to horizons at 500 m (or more) depth.

The instruments employed in this study allow to detect horizons with resonance frequencies down to 0.1 Hz, which means, in the case of an average V_S equal to 500 m/s, depths of 1 km.

What are the coalescent peaks?

When two horizons with a relevant impedance contrast are very close, as for example in Fig. 19, or when the V_S increase occurs very gradually in a large range of depths, then the relative peaks in the HVSR plot can originate a "coalescence", especially when spectra are smoothed. This condition can generally be recognized:

- 1) when the peak is much larger than usual (plateau),
- 2) when the plateau reveals the peaks which compose it when spectral smoothing is diminished,
- 3) by using the HVSR time history plot. As we said in the above, the HVSR plots shown in all the figures of this paper are obtained by averaging the HVSR calculated on contiguous windows with the same, specified, time length. Plotting one next to the other the HVSR curves of each window used to build up the average (Fig. 20) helps resolving the presence of two (or more) contiguous peaks inside a plateau and verifying their time persistence, which is necessary to ensure that they are not generated by transient conditions.

In the example of Predappio (Fig. 8) recordings G2 and G7 clearly show single peaks while the coalescence of peaks (plateau) is well apparent in G5, G6, G9. It should however be noted that a low contrast between two close strata will hardly make them individually resolvable.

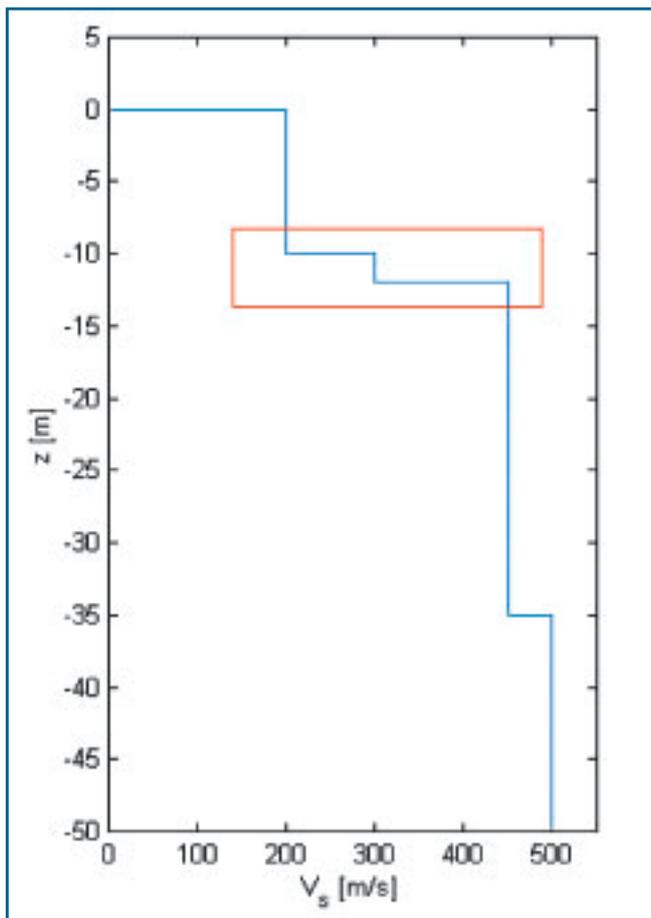


Fig. 19 - Example of a stratigraphy that can lead to "coalescent" peaks: the velocity jumps at -10 and -12 m (evidenced by the red rectangle) would produce peaks at about 5 e 4.5 Hz which, according to the smoothing used, may coalesce in a single peak with an intermediate frequency.

Esempio di situazione che può dare picchi "coalescenti": i due salti di velocità a -10 e -12 m (evidenziati dal rettangolo rosso) darebbero picchi a circa 5 e 4.5 Hz che, a seconda del liscio impiegato, possono coalescere in un solo picco di frequenza intermedia.

CONCLUSIONS

While the HVSR technique enjoyed its greatest popularity in Japan as a fast tool for seismic microzonation, its capability in this respect is still debated on both theoretical and practical counts. On the other hand, this technique appears unquestionably a stratigraphic tool practically applicable both to common geological practice as well as to larger scale explorations.

In order to exploit its potential, we applied to a set of practical types a highly portable instrument expressly designed to measure tremor which has recently become available.

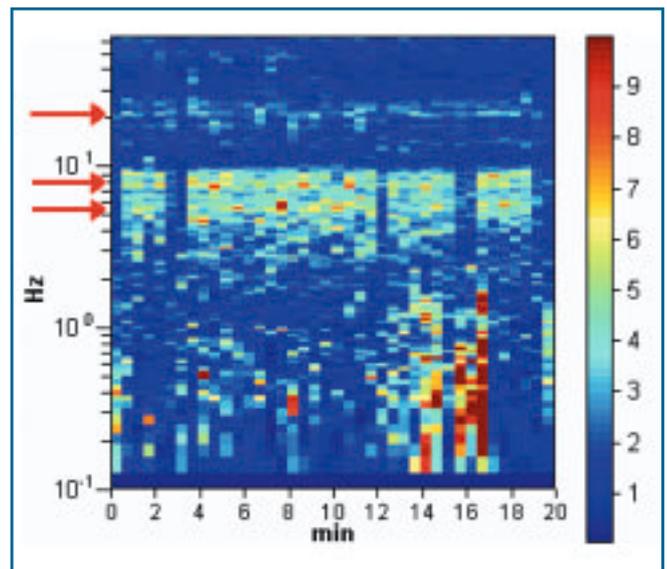


Fig. 20 - Time history of the HVSR recorded at site G6 in Predappio, frequency (y) vs time (x). Color scale represents the HVSR amplitude computed for each window. The average HVSR relative to this time history is given in Fig. 8. This kind of diagrams is useful to distinguish peaks characteristic of the site (in this case at 5 , 7.6 and 20 Hz) from those which are not (for example, the noise at low frequency occurred between minutes 14 and 16 after the start of the recording).

Storia temporale dell'HVSR registrato al sito G6 di Predappio. In ascissa è il tempo, in ordinata la frequenza e con la scala di colore è rappresentata l'ampiezza dell'HVSR calcolato su ciascuna finestra. L'HVSR medio relativo a questa storia temporale è dato in Fig. 8. Questo tipo di diagrammi è utile per identificare i picchi che sono propri del sito (in questo caso a 5, 7.6 e 20 Hz) e quelli che non lo sono (per esempio il rumore a bassa frequenza intervenuto tra i minuti 14 e 16 di registrazione).

The results presented in this study allows to conclude that:

- 1) the HVSR technique is able to detect the impedance contrast between layers, allowing not only to locate the bedrock but also many other discontinuities in a relative stratigraphy,
- 2) to estimate the absolute depth of these discontinuities, either drillings are needed at some points to calibrate the relative stratigraphy, or an estimate of V_s is needed. If the absolute stratigraphy is available at some point, the HVSR results can be inverted to derive an estimate of the average V_s ,
- 3) when the same processing routines are used, the HVSR peak amplitudes are a function of the impedance contrast which generates them and therefore of the geotechnical quality of the earths.

The HVSR technique, thanks to the extreme rapidity of installation and operation of recent portable

instrumentation and to its absolutely non invasive nature (no diggings, no drillings, no cables) can be effectively used:

- 1) as a preliminary probe to study the pattern of the main discontinuities of subsoil and of their relationship, locating in this way the most significant sites in which future investigation should be performed (e.g., sites for drillings and/or penetration test),
- 2) as a detailed investigation to verify, for example starting from existent drillings, possible significant lateral variations of the stratigraphy. In particular, large amplitude variation of a same peak in the HVSR curves stands for strong variations of the mechanical properties of the medium; the points with the largest HVSR values indicate where the mechanical coherence is lower,
- 3) as a preliminary investigation to estimate to what depth mechanical drillings should be performed (thus being able to estimate their cost beforehand) to find layers with good mechanical characteristics or the "bedrock".

Other great assets of HVSR stratigraphy are that it is passive, that it needs just surface measurements, that any place reachable by a man walking or climbing can be measured, without any need of vehicles or cables, that it has extremely low operative cost: each measurement takes at most 20 minutes and nothing is required apart from the instrument and the time of the operator.

The main disadvantage of HVSR as a stratigraphic tool is that, in order to give absolute depth values, it needs either one parameter (the average V_S) to be estimated or an absolute stratigraphy available at some point to calibrate the relative stratigraphy. In the latter case, HVSR provides also fast and cheap estimates of the average V_S velocities, which are often an equally valued piece of information.

Let us conclude with a comparison: the HVSR technique applied to the stratigraphic analysis stand to drillings and penetration test as ecography stands to surgery. While the second may be ultimately needed, the first one provides a non invasive general view capable of guiding any further action.

ACKNOWLEDGMENTS

For the data relative to Predappio Alta we thank dr. Geol. L. Martelli and dr. Geol. B. Raggi. For the geological and geotechnical study of the housing located in Vodo (Belluno) we thank dr. Geol. M. Cabriel. For the data about the Scascoli landslide we thank prof. M. Ghirotti and dr. M. Berti. For the data on the Ca' di Malta landslide we thank prof. P. Baldi and prof. M. Ghirotti. For the study on the site of Casaglia (FE) we thank dr. L. Dall'Olio and prof. D. Albarello.

REFERENCES

- CANCELLI A., CAPOZZI R., GALLONI G. (1987): *Aspetti geologici e geotecnica della frana di Predappio Alta (Appennino Emiliano-Romagnolo, provincia di Forlì)*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. 106, pp. 53-69.
- COCCO M., ARDIZZONI F., AZZARA R.M. et al. (2001): *Broad-band waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy)*. Annali di Geofisica, Vol. 44, pp. 137-154.
- FERRO S. (2003): Tesi di Laurea Università di Bologna.
- IBS-VON SEHT M., WOHLBERG J. (1999): *Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments*. Bull. Seismol. Soc. America, Vol. 89, pp. 250-259.
- KANAI K. (1957): *The requisite conditions for predominant vibration of round*. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., Vol. 31, p. 457.
- LACHET C., BARD P.Y. (1994): *Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitation of Nakamura's technique*. J. Phys. Earth, Vol. 42, pp. 377-397.
- MERNI M. (2002): *Metodi geoelettrici nel monitoraggio di una frana*. Tesi di Laurea Università di Bologna.
- MORA P., BALDI P., CASULA G., FABRIS M., GHIROTTI M., MAZZINI E., PESCI A. (2003): *Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslides (northern Apennines, Italy)*. Engineering Geology, Vol. 68, pp. 103-121.
- MUCCIARELLI M., GALLIPOLI M.R. (2001): *A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique*. Bollettino di Geofisica Teoria ed Applicata, Vol. 42, pp. 255-266.
- NAKAMURA Y. (1989): *A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface*. QR of RTRI, Vol. 30, pp. 25-33.
- NOGOSHI M., IGARASHI T. (1970): *On the propagation characteristics of microtremors*. J. Seism. Soc. Japan, Vol. 23, pp. 264-280.
- QUASCO (QUALificazione e Sviluppo del Costruire) (2000): *Il centro storico di Predappio Alta nell'Appennino Forlivese*. Quaderno 34, 136 pp.

Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, veloce ed economica

INTRODUZIONE

I metodi d'indagine in sito del sottosuolo si dividono in due classi: *i*) la prima, che comprende le prospezioni geotecniche classiche (sondaggi, penetrometrie, prove in foro, ecc.), fornisce valori solo puntuali che non possono essere considerati direttamente rappresentativi dell'area circostante; *ii*) la seconda, che comprende le prospezioni geofisiche classiche (sismica attiva, geoelettrica, geomagnetica, gravimetrica, ecc.) fornisce prospezioni spazialmente più estese, ma impiega mezzi e ha tempi di elaborazione spesso inadatti alla normale pratica geologica e non può essere impiegata ovunque, come ad esempio nei centri urbani. Elemento comune ad entrambe le classi sono inoltre i costi, che aumentano esponenzialmente con la profondità di indagine, la quale rimane spesso limitata.

In questo lavoro proponiamo l'impiego di una tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o HVSR, Horizontal to Vertical Spectral Ratio) ai fini dell'indagine stratigrafica del sottosuolo, abbinata ad una nuova classe di strumenti portatili resasi disponibile recentemente. La tecnica è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e ha costi molto bassi poiché non necessita né di perforazioni, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

La tecnica HVSR a fini stratigrafici può essere impiegata: *i*) come indagine preliminare, al fine di localizzare i punti più rappresentativi nei quali eventualmente affinare l'indagine con tecniche puntuali classiche, *ii*) per verificare o meno, laddove esistano già altre indagini puntuali, eterogeneità significative attorno ai punti indagati, *iii*) come elemento di supporto ad altre indagini, qualora queste presentino dubbi interpretativi.

Descriviamo dapprima le basi teoriche della tecnica HVSR e la strumentazione impiegata. Presentiamo poi i risultati dell'applicazione di detta tecnica a 5 situazioni geologicamente interessanti e largamente studiate con altri mezzi (Fig. 1): 1) i detriti di versante di Predappio Alta (Forlì), 2) un problema classico di geologia applicata: terreno di fondazione di un edificio in dissesto a Vodo di Cadore (Belluno), 3) i corpi franosi di Scascoli (Bologna), 4) la frana di Ca' di Malta (Bologna), 5) uno studio di stratigrafia profonda (Casaglia, Ferrara).

LE BASI TEORICHE

La forma di un'onda sismica registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ,
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda),
3. dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

segnale registrato al sito x =
sorgente · effetti di percorso · funzione trasferimento strumento [1]

Trascuriamo per il momento la funzione di trasferimento dello strumento e descriviamo gli altri elementi dell'equazione [1].

Sorgente

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche,

vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* in quanto riguarda oscillazioni molto piccole (10^{-15} [m/s^2]² in termini di accelerazione), molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato in Fig. 2, dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati come originati dalle onde oceaniche. Tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ma anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

Effetti di percorso

Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "ray tracing", è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazione. Questa informazione è però 'sepolta' all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste è la tecnica dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR.

La tecnica HVSR

Dai primi studi di KANAI [1957] in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSR), applicata da NOGOSHI e IGARASHI [1970]. Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da NAKAMURA [1989] come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Su questo punto non è però ancora stato raggiunto consenso sebbene sia ampiamente riconosciuto che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli, informazione che è comunque di notevole importanza nell'ingegneria sismica. Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico. Questo lavoro ha come scopo la verifica di questa potenzialità. In particolare, studieremo: 1) se il metodo HVSR è in grado di 'vedere' più di una discontinuità (strati multipli), 2) se è in grado di riconoscere stati con basso contrasto di impedenza, 3) se è applicabile a geometrie non planari, 4) e tridimensionali e 5) se è appli-

cabile alla prospezione profonda. Vedremo che in tutti i casi i dati sembrano sostenere risposte affermative.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Consideriamo il sistema di figura 3 in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'orizzonte che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore h del primo strato. In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1}/(4h) \quad [2]$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{S1}/(4h) \quad [3]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità che è solitamente disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per *a*) il contenuto in frequenza, *b*) la risposta strumentale e *c*) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo. Un esempio di curva HVSR ricavata da un modello costruito come in figura 3, per diversi contrasti di impedenza z , è data in figura 4.

Il problema principale di questa visione è che i microtremiti sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S. Essi sono costituiti in misura molto maggiore da onde superficiali e in particolare da onde di Rayleigh [cf. LACHET e BAR D, 1994], tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime. L'applicabilità pratica della semplice formula [3] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico [per un riassunto cf. MUCCIARELLI e GALLIPOLI, 2001]. Poiché la situazione illustrata in figura 3 è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è infatti parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie [per un esempio magistrale si veda IBS-VON SEHT e WOHLBERG, 1999]. In questo lavoro applicheremo il metodo a casi di maggior interesse nella pratica del geologo applicato.

LA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Tutte le registrazioni dei microtremiti presentate in questo studio sono state effettuate con il tromografo digitale TROMINO (www.tromino.it) che è uno strumento progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Si tratta di un apparecchio portatile compatto di circa 10 x 7 x 14 cm e 1 kg di peso dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, fornito di GPS interno e senza alcun cavo esterno (Fig. 5). L'estrema portabilità dello strumento ha reso possibile la sua messa in opera su ogni tipo di terreno e versante permettendo di misure anche in siti non raggiungibili con strumenti montati su mezzi di trasporto o con i sismografi classici.

Un solo tecnico è sufficiente a svolgere tutte le operazioni mentre la rapidità di installazione e di misura (1 min per l'installazione, 20 min di acquisizione del segnale critica) permette di moltiplicare il numero di indagini senza aumentare i costi.

PROCEDURE DI ANALISI DATI

I risultati di ciascuna analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti col software Grilla in dotazione a TROMINO. In sintesi, il segnale dei velocimetri è acquisito in ciascun sito per un tempo t (solitamente 20 min), e digitalizzato a 24 bit.

Il software Grilla, per ciascuna delle 3 componenti del moto:

1. divide il tracciato acquisito in finestre di lunghezza L (in questo lavoro generalmente 30 s),
2. elimina il trend da ciascuna finestra,
3. ne fa il "taper" con una finestra Bartlett,
4. fa il "pad" di ciascuna finestra con degli zero,
5. calcola la trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra,
6. calcola lo spettro di ampiezza per ciascuna finestra,
7. liscia lo spettro di ogni finestra secondo la funzione di lisciamiento f ,

e calcola il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza, per ciascuna finestra.

La funzione HVSR finale è data dalle medie degli HVSR di ciascuna finestra. Per produrre l'HVSR finale le componenti orizzontali sono mediate tra loro con la media quadratica e vengono poi divise per la componente verticale.

Tutti i grafici presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con lisciamiento secondo finestre triangolari con ampiezza pari al 5% della frequenza centrale.

Caso 1.

Mappatura dei detriti di versante a Predappio Alta (Forlì)

In questo primo esempio vogliamo applicare la tecnica HVSR per ricostruire gli orizzonti stratigrafici principali di una parte di Predappio Alta. Il paese di Predappio Alta è interessato da una frana per scorrimento rotazionale lungo superfici non circolari sviluppatesi entro materiali coesivi [CANCELLI *et al.*, 1987]. Tale frana interessa principalmente un conglomerato della Formazione a Colombacci che affiora in una serie blocchi disarticolati, collegati da una matrice sabbiolo-limoso e da detrito di versante (CGL). La Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) e, altrove, la Formazione a Colombacci (FCO) costituiscono il substrato resistente della frana. La frana in questione è stata studiata dettagliatamente in quanto ha messo a rischio l'abitato di Predappio Alta fino al punto di portare a considerare la necessità di un suo trasferimento. L'indagine della frana è stata inserita anche nelle analisi del rischio sismico in quanto la frana si è riattivata in concomitanza di diversi terremoti [QUASCO, 2000].

In figura 6 è rappresentata la topografia della zona, le localizzazioni di alcuni sondaggi disponibili e dei punti di misura indagati con la tecnica HVSR. I punti prescelti per l'indagine sono concentrati sul corpo di frana, indicato a puntini in figura 6.

Una sezione geologica schematica (1'-1) che attraversa la frana nella direzione del movimento, così come ricostruita sulla base dei sondaggi disponibili, è data in figura 7.

Il sito G2 presenta un primo picco di risonanza a 2.8 Hz. Impiegando una V_s media di 350 m/s (come evinto da una prova cross-hole effettuata in zona), l'equazione [3] porta a stimare la profondità dell'orizzonte più profondo a 32 m. Nello stesso sito è evidente un altro picco a 9.6 Hz che, associato ad una V_s dell'ordine dei 250 m/s porta a tracciare la profondità del secondo orizzonte a circa 7 m. Questi valori sono in ottimo accordo con il sondaggio P 114 effettuato qualche metro più a monte che ha permesso di trovare una prima discontinuità a -10 m (transizione tra ghiaie assortite con sabbia vs. marne con arenarie e conglomerati) e una seconda discontinuità a -36 m (transizione tra marne con arenarie e conglomerati vs. mar-

ne del bedrock). Evidenza dell'esistenza della prima discontinuità a -10 m è data anche da un inclinometro collocato in P 114 che mostra spostamenti dell'ordine di 15-20 mm (dati relativi al 1999) nei primi 10 m di profondità, appunto.

Anche in tutti gli altri siti indagati sul corpo di frana secondario sono riconoscibili almeno due picchi (Fig. 8 e Tab. 1), corrispondenti a due diversi orizzonti con marcato contrasto di impedenza. In alcuni casi, come G5, quando la distanza tra i due orizzonti è bassa e i relativi picchi in frequenza sono perciò vicini, il lisciamiento della curva HVSR può dare un plateau e rendere i due picchi irriconoscibili. In questi casi l'analisi dell'evoluzione temporale del rapporto HVSR può aiutare nel riconoscere i due picchi originari, come descritto nella sezione *Discussione* più avanti in questo lavoro.

Concludendo, in questo caso, il metodo HVSR riesce a ricostruire la presenza di due discontinuità principali nel sottosuolo: la più profonda, attorno a 30 m di profondità, che corrisponde al contatto tra la Formazione a Colombacci e la facies conglomeratica. La seconda, a profondità variabile tra i 5 e 10 m, che costituisce il corpo di frana all'interno dei conglomerati stessi (racchiuso entro il circolo grigio puntinato in figura 6).

Sulla base dei sondaggi, QUASCO [2000] riporta una sezione stratigrafica schematica in cui mette in evidenza la sola discontinuità principale relativa al contatto tra CGL e FCO. Abbiamo lievemente corretto detta sezione (nel tratto tra G6 e G2 in Fig. 7) sulla base di qualche sondaggio aggiuntivo resosi disponibile recentemente ed abbiamo sovrapposto in rosso le interpretazioni stratigrafiche fornite dalla tecnica HVSR applicata in questo studio. Si può notare la coincidenza dei risultati nella rilevazione della discontinuità principale (conglomerati vs. bedrock) e la coincidenza dei risultati relativi alla discontinuità minore con i dati che si possono evincere dalle deformate inclinometriche

Caso 2.

Un problema di geologia applicata classico: terreno di fondazione di un edificio in dissesto a Vodo di Cadore (Belluno)

La tecnica HVSR può a nostro avviso essere impiegata anche come ausilio a indagini stratigrafiche più routinarie, come quelle geologico-geotecniche sui terreni di fondazione di opere civili. Illustriamo il caso con un esempio. L'oggetto di studio è un condominio sito in Vodo di Cadore (Belluno, 867 m s.l.m.) che ha recentemente subito un grave dissesto a causa della sua struttura, dell'inadeguatezza delle opere di fondazione e della natura del terreno di fondazione. Trattasi di due blocchi distinti con fondazioni alla stessa profondità, uniti – e questo è l'errore progettuale – da travi metalliche. I blocchi hanno subito cedimenti diversi ed il fatto di essere mantenuti uniti dalle travi ha comportato gravi danni ai muri. Dalla relazione geologica gentilmente concessa dal dr. Geol. M. Cabriel che si è occupato degli studi per il ripristino dell'edificio, ricaviamo che il condominio è "localizzato ai piedi del versante, in una zona che corrisponde alla parte più distale del corpo di una paleofrana di crollo costituita da massi, blocchi e ghiaie di natura calcareo-dolomitica. [...] Alla base del macereto di frana si è verificato impaludamento con conseguente deposizione di terreni organici limo-argillosi e torbosi. Gli ampi depositi quaternari fluvio-glaciali [...], alcuni lembi di frana di crollo e di debris-flow che sono discesi lungo il versante e alcuni localizzati depositi palustri mascherano il substrato roccioso". Poiché secondo il P.R.G. comunale la zona è classificata come "terreno buono ai fini edificatori", all'epoca della costruzione dell'edificio (1993?) non vennero effettuate indagini puntuali mentre queste sono state svolte nell'anno in corso a seguito del cedimento differenziale subito dai due corpi di cui è costituito lo stabile. Le indagini geognostiche classiche sono consistite in tre sondaggi continui (S1, S2 e S3 in Fig. 9) e due penetrometrie dinamiche (SPTC in P1 e P2), sempre effettuate e gentilmente concesse dal dr. Geol. M. Cabriel.

I risultati dei sondaggi sono riportati nelle tabelle 2, 3 e 4.

Le prove penetrometriche dinamiche continue sono state spinte fino alla profondità di 6.20 m (Fig. 10, a sinistra) ed hanno mostrato come il terreno in P2 abbia caratteristiche peggiori rispetto a P1 nei primi 2.4 m (carico ammissibile intorno a 2.4 N/cm² contro 6 N/cm² sotto P1 calcolati con la *formula degli Olandesi*) mentre la situazione si ribalta da 4.8 m di profondità in giù, quando il carico ammissibile sotto P2 inizia gradualmente ad aumentare. Il carico ammissibile sotto P1, invece, dopo un picco consistente a -1 m, diminuisce sotto i 2.40 m dal piano campagna e si assesta attorno a 3 N/cm² fino a 5.80 m. Solo al di sotto di questa profondità il carico ammissibile in P1 sale immediatamente a 12 N/cm² e oltre questa profondità non ci sono più dati disponibili.

Sulla base di queste prove possiamo sin d'ora attenderci un contrasto di impedenza molto maggiore a 6 m di profondità circa sotto P1 piuttosto che sotto P2, dove il miglioramento delle proprietà del terreno avviene più gradualmente. Si noti che la scala verticale in figura 10 è logaritmica e può quindi mascherare lievemente la risalita lenta del carico ammissibile sotto P2, che avviene tra -5 e -6 m, rispetto a quella sotto P1, che avviene istantaneamente a -5.8 m.

Abbiamo dunque investigato il sottosuolo attorno a tutto l'edificio con la tecnica HVSR ed i risultati sono riportati in figura 11 e tabella 5. Il picco principale permette di risalire alla profondità dell'ammasso roccioso che attorno a tutto il condominio si colloca tra i 10 e i 12 m di profondità.

Va immediatamente notato come il contrasto di impedenza tra quanto sta immediatamente sopra il bedrock e l'ammasso roccioso stesso sia molto più elevato in V4 rispetto agli altri siti, esattamente come confermato dalla penetrometria in P1. L'ampiezza del picco in V4 infatti ha una media di 17 contro un'ampiezza media di 7-8 negli altri casi. Si noti in particolare la differenza di ampiezza tra V4 e V5 (17 contro 6), in prossimità dei quali sono disponibili le prove penetrometriche.

Notiamo ancora che in corrispondenza ai punti V1, V2 e V4 il metodo permette di localizzare correttamente la profondità del materiale di riporto (in particolare nel punto più vicino sondato, S2, risultava di 1 m e col metodo HVSR, poco distante, 0.85 m). Dalla figura 11 si ricava inoltre che il contrasto di impedenza relativo a questo orizzonte è più marcato sotto V4 rispetto a V5 e questo è confermato dalle penetrometrie dove la transizione a -0.85 m segna il passaggio da un carico ammissibile di 4 a 13 N/cm² sotto P1 e "solo" da 2 a 5.5 N/cm² sotto P2.

Il metodo permette di individuare altre discontinuità a profondità sia maggiori che minori. In V5, ad esempio, è chiara una discontinuità (sebbene minore in termini di ampiezza rispetto a quella del bedrock) a 7.7 Hz, pari a 5.5 m di profondità. È proprio a questa profondità, infatti, che le penetrometrie mostrano un miglioramento delle proprietà del mezzo. Allo stesso modo si possono riconoscere nel plateau tra 4 e 7 Hz presenti in tutti i siti indagati una coalescenza di picchi minori corrispondenti a discontinuità minori tra 6 e 10 m di profondità.

L'indagine totalmente di superficie effettuata con la tecnica HVSR è stata quindi in grado di fornire informazioni sulla profondità degli strati e sul contrasto di impedenza relativo tra di essi in accordo con la teoria (Fig. 3). Un picco molto alto è tipico di una bassa coerenza meccanica nelle formazioni sovrastanti l'orizzonte di contrasto.

Caso 3.

Mappatura dei corpi franosi di Scascoli (Bologna)

Le gole di Scascoli (Bologna) si trovano in una zona storica soggetta a frane, attraversata dal fiume Savena. La successione stratigrafica della zona presenta un'alternanza di arenarie e marne (Formazione di Antognola e Formazione di Bismantova) interrotte da superfici di scorrimento franoso a grande e piccola scala. La presenza nel fondo valle di una strada provinciale e la storica instabilità dei versanti, hanno fatto sì che quest'area fosse studiata estensivamente.

Lungo la sezione A-A' (Fig. 12) che interseca la strada provinciale sono stati condotti 4 sondaggi a profondità variabili tra i 20 e i 50 m, fino ad incontrare il basamento roccioso. Lungo questa sezione, in particolare, sembrano esserci due scorrimenti minori che costituirebbero le frane al piede della molto più grande frana di Scascoli. Lo scorrimento più profondo dei due riguarda una frana ormai quiescente con spessore di circa 20 m nella parte centrale. Esisterebbe poi uno scorrimento più superficiale, intercettato solo dai sondaggi S6 e S6bis, che riguarderebbe una parte di frana ancora in evoluzione con spessore di 7-10 m nella parte centrale.

Lungo questa sezione abbiamo effettuato una serie di misure HVSR, posizionando lo strumento nei punti P7, P6bis e P4 ed effettuando in ciascun punto una registrazione di 20 min. I risultati ottenuti in termini di rapporti spettrali sono illustrati in Fig. 13. Sotto il punto P7, per il quale non sono disponibili sondaggi meccanici, esistono due discontinuità "sismiche": la principale, in termini di contrasto di impedenza, si colloca a 16 m di profondità dal piano campagna (picco principale a 4 Hz, $V_s = 250$ m/s in media), la seconda a circa 4 m di profondità (picco a 15 Hz).

Sotto il punto P6bis possiamo invece identificare due picchi parzialmente sovrapposti: uno a 3 Hz e uno a 5.5 Hz, corrispondenti a discontinuità a 20 e 11 m di profondità.

Il punto P4 presenta invece un netto picco a 7 Hz, corrispondente ad una discontinuità posta a 9 m dal piano campagna.

In figura 12 sono riportate le superfici di discontinuità principali inferite dal metodo HVSR (cerchietti gialli) e confrontate con le superfici inferite sulla base dei sondaggi (tratteggi rossi). L'accordo è buono e il metodo HVSR suggerisce anche che il fronte dello scorrimento più superficiale possa continuare un po' più a monte del sondaggio S6bis e che la profondità del corpo di frana quiescente sotto il punto P4 sia leggermente inferiore rispetto a quanto estrapolato sulla base dei sondaggi.

Caso 4.

Mappatura dei corpi franosi di Ca' di Malta (Bologna): un caso complesso

La frana di Ca' di Malta localizzata nell'Appennino settentrionale, sul fianco orientale del fiume Reno (Fig. 14), è attiva sin dal 1914. Nel 1997, a seguito di una sua riattivazione che ha parzialmente ostruito il letto del fiume, il corpo franoso è stato equipaggiato con diversa strumentazione per monitorarne i movimenti. Sono stati effettuati anche due carotaggi continui (localizzati nei punti 1 e 3 in Fig. 14) che hanno portato alla definizione della stratigrafia descritta in tabella 6 e tabella 7.

Si può notare come la natura del sottosuolo sia nei pressi della frana costituita interamente da argille. Le perforazioni, gli inclinometri [MORA *et al.*, 2003], i rilievi sismici e geoelettrici [MERNI, 2002] hanno portato alla conclusione che i primi 4-6 m presentano argille elasticizzate (quelle in cui è avvenuto lo scivolamento), mentre tra 12 e 16 m sarebbe situato il passaggio tra la coltre di alterazione e il bedrock, costituito sempre da argilla ma non scompagnata.

Si tratta di un caso "difficile" in quanto coinvolge praticamente sempre lo stesso litotipo, sebbene esso si presenti in forme più o meno rimaneggiate e plastiche.

All'interno della frana l'analisi HVSR mostra sempre due picchi di risonanza (C0, C1 in Fig. 15) mentre all'esterno (C2) appare un solo picco. In particolare, applicando una V_s media pari a 180 m/s che appare adeguata data la scioltezza dei terreni superficiali, si fanno risalire i picchi principali all'interno della frana alle profondità di 6 e 18 m che corrispondono, come da sondaggio (Tab. 8) all'orizzonte tra argilla grigia rimaneggiata ed argilla verde. Al di sotto di questa profondità è atteso quindi il bedrock (sempre argilla ma con diverse proprietà meccaniche).

In corrispondenza al punto C0 appare una terza discontinuità alla profondità di 11 m.

Nell'immediata periferia della frana, invece, (C2) si vede solo una discontinuità a 5 m di profondità, legata ancora una volta, vero-

similmente, alla transizione tra argille rimaneggiate e argille verdi. Un inclinometro situato in C2 [MORA *et al.*, 2003] ha mostrato infatti che anche questo punto, sebbene considerato esterno alla frana principale, è stato soggetto a spostamenti dal 1999 ad oggi nei primi metri di profondità.

Caso 5.

Ritrovare il bedrock in condizioni profonde: Casaglia, Ferrara

In tutti gli esempi sinora riportati abbiamo trattato situazioni stratigrafiche con contrasti di impedenza a profondità relativamente basse.

Il metodo HVSR si dimostra invece capace di identificare strati profondi, come nel caso di Casaglia (Ferrara). Il sito è localizzato su un alto strutturale della dorsale Ferrarese e precisamente dove il basamento quaternario (marne Oligoceniche e arenarie) è stato intercettato da sondaggi alla profondità di 135 m. Al di sopra si trovano coperture alluvionali (alternanze di sabbie e silt e due paleosuoli) come illustrato in figura 16. Nel sito la V_s è nota da altre indagini (seppure con la dispersione che le è tipica) e nei primi 130 m il suo valore medio è stimato in 400 m/s. Si ottiene dunque la tavola di inversione di tabella 9 che corrisponde a quando trovato tramite sondaggio meccanico.

DISCUSSIONE

La nostra analisi ha fornito basi più solide per l'applicazione della tecnica HVSR a fini stratigrafici che riassumiamo di seguito.

Come si leggono i grafici HVSR? Cosa significano le ampiezze nei grafici HVSR?

Il grafico HVSR è generalmente un grafico frequenza (x) – ampiezza del rapporto HV (y). Poiché la frequenza è relazionata alla profondità secondo la formula [3], il grafico HVSR può tramutarsi in un grafico ampiezza del rapporto HV (x) – profondità (y) come illustrato in figura 10 dove l'ampiezza del rapporto HV (x) descrive in modo relativo l'ampiezza del contrasto di impedenza tra i mezzi sopra e sotto quella determinata profondità (y).

Ciascun picco nel grafico HV corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco HV (Fig. 4) sebbene la relazione tra le due variabili non sia lineare. È ovvio che il numero di picchi visibili in un grafico HVSR dipende dal contrasto, dalla distanza tra le due discontinuità e dalla funzione di lisciamento impiegata. Un contrasto basso tra due discontinuità vicine le renderà difficilmente individuabili singolarmente ed allo stesso tempo un lisciamento ampio, agendo da filtro passa basso, renderà coalescenti le discontinuità minori.

Va notato che per le stesse ragioni l'aumento del lisciamento porta anche ad una diminuzione dell'ampiezza assoluta di ciascun picco come illustrato in figura 18. Pertanto, per ovviare a questi problemi, è sufficiente adottare la stessa procedura di analisi dei dati durante tutta la campagna di misura in modo da rendere confrontabili i risultati ottenuti.

Possono esistere picchi HVSR di natura antropica o comunque non legata alla natura del sottosuolo?

Naturalmente possono esistere anche picchi HVSR di natura antropica ma questi sono solitamente molto stretti e si presentano come picchi positivi, di diversa ampiezza, su tutte e tre le componenti (verticale, Nord-Sud ed Est-Ovest) del moto mentre generalmente il picco HVSR di origine naturale è determinato da una depressione nello spettro di ampiezza della componente verticale.

I picchi antropici, ad esempio quelli legati alle attività industriali, possono scomparire di notte e compaiono esattamente con la stessa forma in tutte le registrazioni effettuate in una determinata area.

Altra caratteristica dei picchi non naturali è solitamente la loro spiccata direzionalità che è facilmente messa in risalto da apposito grafico come quello fornito dal software impiegato per analizzare i dati di questo lavoro.

Come si stima V_s ?

Per usare l'HVSR come strumento stratigrafico assoluto è necessaria una stima della velocità delle onde di taglio (V_s). Se la V_s è nota da altre indagini è sufficiente impiegare questi valori per invertire l'equazione [3] e ricavare la profondità. Diversamente è sufficiente effettuare una misura HVSR in un punto in cui siano note le discontinuità stratigrafiche e usare le frequenze di risonanza trovate e le profondità degli orizzonti associati per trovare la V_s , sempre tramite la formula [3].

Va notato che poiché V_s generalmente varia, aumentando, con la profondità, quando si considerano orizzonti molto profondi e superficiali nella stessa analisi può essere opportuno aggiustare il valore di V_s in funzione della profondità per avere stime più precise.

Limite inferiore e superiore della profondità di analisi.

I limiti inferiori e superiori della profondità indagabile con la tecnica HVSR dipendono dall'ampiezza della banda di frequenza rilevabile dallo strumento in uso e dalla V_s media nel mezzo attraversato. Nell'esempio di Casaglia (Fig. 17), il picco a 0.75 Hz, a quella determinata V_s , corrispondeva ad una profondità dell'orizzonte di 130 m. Esistono in letteratura e nella pratica casi di picchi a 0.2-0.3 Hz che corrispondono a orizzonti profondi 500 m o più.

Lo strumento impiegato in questo studio permette di rilevare orizzonti che abbiano frequenze di risonanza fino a 0.1 Hz e quindi, ad es., nel caso di una V_s media pari a 400 m/s, fino a profondità di 1 km.

Cosa sono i picchi coalescenti?

Quando due orizzonti che presentano contrasto di impedenza marcato sono molto vicini, come ad esempio in figura 19, o quando l'aumento della V_s avviene gradualmente in una fascia estesa di profondità, senza salti marcati, i picchi relativi nel diagramma HVSR possono essere così vicini in frequenza da dare "coalescenza", specialmente quando gli spettri vengono lisciati. Generalmente questa situazione è riconoscibile:

- 1) quando il picco è molto più largo del normale (plateau),
- 2) quando il plateau rivela i picchi di cui è composto al diminuire del lisciamento degli spettri,
- 3) usando il diagramma temporale dell'HVSR. Come spiegato in precedenza, l'HVSR riportato in tutte le figure di questo lavoro è dato dalla media degli HVSR ottenuti su finestre contigue di lunghezza temporale prefissata. Plottando l'uno accanto all'altro le curve HVSR relative ad ogni finestra usata per costruire la media (Fig. 20) è più facile distinguere la presenza di due (o più) picchi contigui all'interno di un plateau e verificarne la persistenza temporale che è necessaria per garantire che non siano generati da situazioni transitorie.

Negli esempi di Predappio (Fig. 8) sono chiaramente picchi singoli quelli registrati in G2 e G7 mentre è chiara la coalescenza dei picchi (plateau) in G5, G6, G9. Va però sottolineato che un contrasto di impedenza basso tra due strati vicini può rendere difficilmente risolvibili le due discontinuità.

CONCLUSIONI

Nonostante la tecnica HVSR abbia raggiunto la massima popolarità in Giappone come strumento per una microzonazione sismica speditiva, le sue potenzialità a questo riguardo sono ancora dibattute sia a livello teorico che pratico. Al contrario la tecnica è senza dubbio molto promettente come strumento stratigrafico applicabile sia ai problemi della comune pratica geologica che alle esplorazioni a più larga scala.

Al fine di verificare questa potenzialità abbiamo applicato la tecnica ad un insieme di problemi pratici, impiegando uno strumento ultrapotabile ad alta risoluzione progettato espressamente per la misura del tremore sismico che si è reso disponibile in tempi recenti.

I risultati presentati in questo studio permettono di concludere che:

- 1) la tecnica HVSR è in grado di rilevare i contrasti di impedenza tra strati, permettendo non solo di localizzare il bedrock ma numerose altre discontinuità,
- 2) per localizzare in modo assoluto la profondità di dette discontinuità è necessaria una stima di V_s . Ove questa non sia né disponibile né presumibile, il metodo può comunque fornire una stratigrafia relativa. Viceversa, laddove la stratigrafia sia nota, il metodo HVSR può essere impiegato per ottenere una stima di V_s media,
- 3) l'ampiezza dei picchi HVSR, a parità di procedura di analisi dei dati, è funzione del contrasto di impedenza che li genera e quindi delle qualità geotecniche dei terreni.

La tecnica HVSR data la rapidità di messa in opera raggiunta dalla strumentazione portatile recentemente disponibile, data la rapidità di misura e dato che si tratta di una tecnica totalmente non invasiva (che con la strumentazione adatta non ha bisogno né di cavi né di fori) può dunque essere impiegata:

- 1) come indagine preliminare per studiare l'andamento delle discontinuità principali e non del sottosuolo e dei loro rapporti, localizzando in questo modo i punti più significativi per l'eventuale approfondimento delle indagini (ad es. i punti in cui effettuare sondaggi e/o penetrometrie),
- 2) come indagine di dettaglio per verificare, a partire da sondaggi esistenti, eventuali variazioni laterali significative della stratigrafia. Ad esempio, una variazione eclatante di ampiezza di uno stesso picco nei grafici HVSR di una determinata zona va letta come peggioramento consistente delle proprietà geotecniche del terreno sovrastante la discontinuità in quel punto,
- 3) come indagine preliminare per stimare la profondità a cui si debbano spingere i sondaggi meccanici (e quindi stimarne in anteprima il costo) per trovare terreni con buone caratteristiche meccaniche o i "bedrock".

Altri grandi vantaggi della tecnica sono quelli di essere passiva e di basarsi su misure effettuabili totalmente in superficie, in qualsiasi punto raggiungibile da un operatore senza bisogno di macchine/mezzi o stendimenti di cavi. Vantaggio conseguente, quindi, è il basso costo: ciascuna misura richiede non più di 20 minuti senza costi aggiuntivi oltre al tempo impiegato.

Lo svantaggio principale della tecnica HVSR come strumento stratigrafico è, come per tutte le metodologie geofisiche, l'essere una tecnica indiretta che ha bisogno della stima di un parametro (V_s media) per fornire valori assoluti di profondità. Questi valori possono anche essere ottenuti tarando la stratigrafia relativa nei punti in cui la stratigrafia assoluta è nota. In questo caso l'HVSR può anche fornire stime rapide ed economiche delle velocità V_s , valore che talvolta può essere ugualmente prezioso. Volendo fare un paragone, la tecnica HVSR applicata all'analisi stratigrafica si colloca rispetto ai sondaggi e alle penetrometrie come l'ecografia rispetto all'intervento chirurgico. Mentre il secondo può essere alla fine indispensabile, la prima fornisce una visione generale non invasiva in grado di guidare in modo mirato ogni intervento successivo.

RINGRAZIAMENTI

Per i dati su Predappio Alta si ringraziano il dr. Geol. L. Martelli e il dr. Geol. B. Raggi. Per lo studio geologico sul condominio di Vodo (Belluno) si ringrazia il dr. Geol. M. Cabriel. Per i dati sulla frana di Scascoli si ringraziano la prof.ssa M. Ghirotti e il dr. M. Berti. Per i dati sulla frana di Ca' di Malta si ringrazia il prof. P. Baldi e la prof.ssa M. Ghirotti. Per il lavoro sul sito di Casaglia (FE) si ringraziano la dr.ssa L. Dall'Olio e il prof. D. Albarello.