



think energy

WPD TRIOLO S.r.l.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL TERRITORIO COMUNALE DI SAN SEVERO (FG)

PROGETTO DEFINITIVO

prima emissione: febbraio 2020

REV.	DATA	DESCRIZIONE:

PROGETTAZIONE



via Volga c/o Fiera del Levante Pad.129 - BARI (BA)
ing. Sebanino GIOTTA - ing. Fabio PACCAPELO
ing. Francesca SACCAROLA - ing. Giuseppe NOBILE



via Beatrice Acquaviva D'Aragona n.5 - CAVALLINO (LE)
ing. Daniele CALO'

ARCHITETTURA E PAESAGGIO



VIRUSDESIGN®
arch. Vincenzo RUSSO
via Puglie n.8 - Cerignola (FG)



GEOLOGIA

geol. Giuseppe CALO'



ACUSTICA

ing. Sabrina SCARAMUZZI



ARCHEOLOGIA

Nostòi S.r.l.

Nostoi S.R.L.
Via San Marco, 1511
30015 CHIOGGIA (VE)
C.F.P. e Iscra. n. 03 653 560 276
REA VE 327005

STUDIO PEDO-AGRONOMICO

dr. agr. Pierangelo RUSSO

ASPETTI NATURALISTICI, FAUNISTICI E PEDOLOGIA

dott. Rocco LABADESSA



COMUNICAZIONE

Flame Soc. Coop. a.r.l.

PD.R. ELABORATI DESCRITTIVI

R.4 RELAZIONE GEOLOGICA, MORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA



INDICE

1	PREMESSA	1
2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE	2
3	STRATIGRAFIA E LITOLOGIA	4
3.1	ARGILLE SUBAPPENNINE (PLIOCENE MEDIO - PLEISTOCENE INFERIORE)	5
3.2	SINTEMA DI VIGNA BOCOLA (PLEISTOCENE MEDIO).....	5
3.3	SINTEMA DI MASSERIA LA MOTTICELLA (PLEISTOCENE MEDIO-SUPERIORE)	6
3.4	SINTEMA DI FOGGIA (PLEISTOCENE MEDIO-SUPERIORE).....	7
3.5	SINTEMA DI MOTTA DEL LUPO (PLEISTOCENE SUPERIORE)	7
3.6	SINTEMA DI MASSERIA FINAMONDO (PLEISTOCENE SUPERIORE).....	9
3.7	DEPOSITI ALLUVIONALI RECENTI (OLOCENE).....	9
4	GEOMORFOLOGIA E IDROGRAFIA	10
5	IDROGEOLOGIA	15
5.1	L'ACQUIFERO POROSO PROFONDO	15
5.2	L'ACQUIFERO POROSO SUPERFICIALE.....	16
6	SISMICITÀ E PERICOLOSITÀ SISMICA	19
6.1	SISMICITÀ STORICA.....	19
6.2	SISMICITÀ DI EPOCA RECENTE	21
6.3	PERICOLOSITÀ SISMICA.....	23
7	INDAGINI SISMICHE CON METODOLOGIA HVSR	25
7.1	DESCRIZIONE DEL METODO DI INDAGINE.....	26
7.2	RISULTATI D'INDAGINE.....	28
8	MODELLAZIONE GEOTECNICA	30
9	FONTI DOCUMENTALI E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	34
10	ALLEGATO 1	36

1 PREMESSA

La presente relazione geologica è stata redatta a supporto del progetto per realizzazione di un parco eolico per la produzione di energia elettrica nel territorio amministrativo del Comune di San Severo (FG).

L'area interessata dagli interventi di progetto si estende a ventaglio a Sud e SE del centro urbano di San Severo da Mass. S. Giusta fino a Mass. Amendola.

Nella presente si descrivono le caratteristiche geologico-strutturali, stratigrafiche geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche del territorio interessato dalle opere in progetto, con l'obiettivo di ricostruire il modello geologico locale.

Verranno inoltre forniti gli elementi necessari a definire il grado di pericolosità geomorfologica, idraulica e sismica del territorio, da considerare in fase progettuale al fine di garantire la conformità delle opere ai sensi della vigente normativa tecnica di settore.

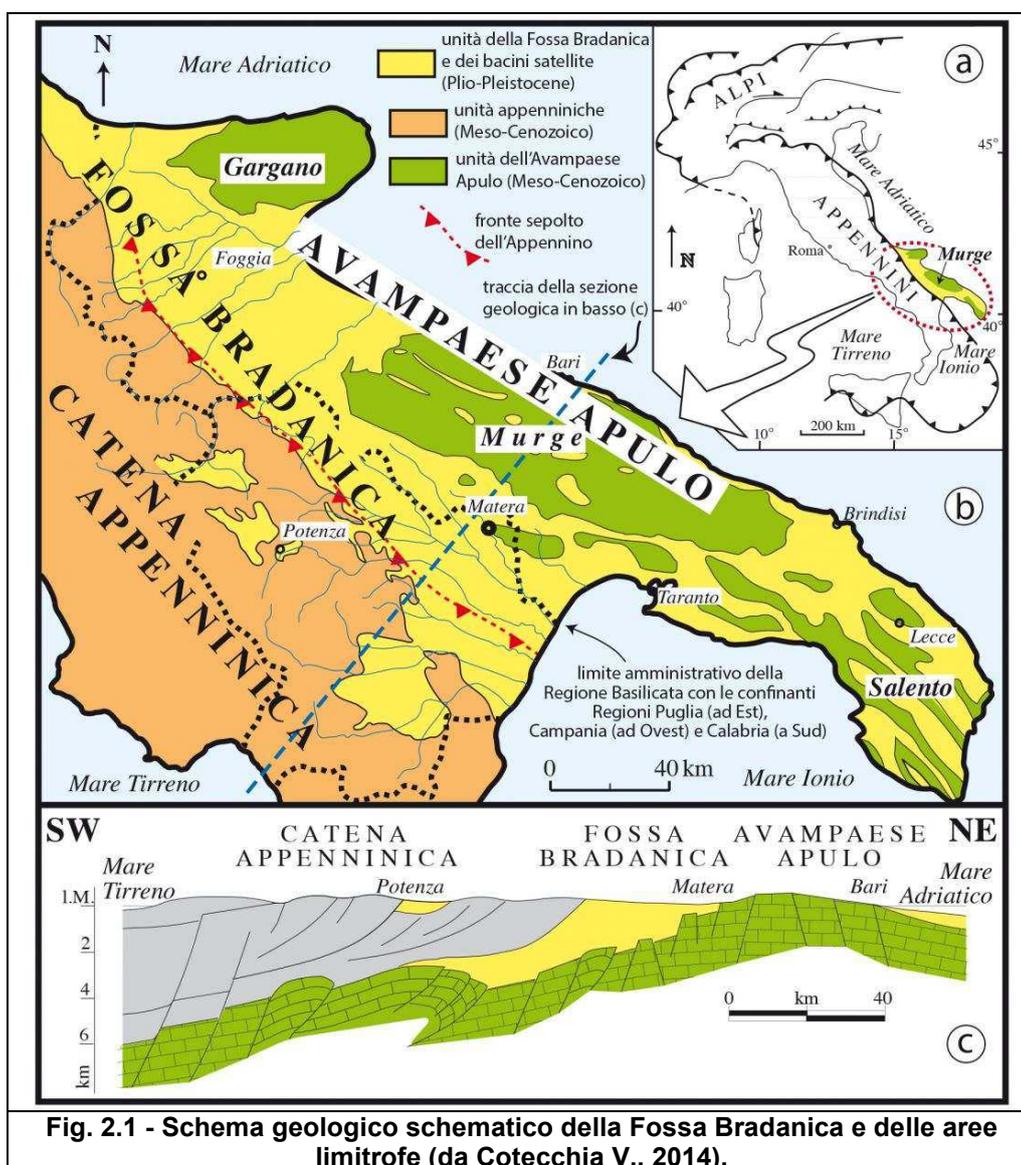
A supporto del presente studio sono state eseguite attività di rilevamento geologico funzionali a verificare la litologia e i rapporti stratigrafici tra le formazioni affioranti e a compilare gli elaborati grafici illustrativi del modello geologico locale (n. 3 carte geologiche in scala 1:100 e relative sezioni geologiche riportate nelle **Tav. G1, G2 e G3**).

Lo studio è stato inoltre supportato da n. 8 indagini sismiche del tipo HVSR, effettuate con l'obiettivo di integrare i dati acquisiti con il rilievo geologico di superficie, di fornire indicazioni sulle condizioni di assetto stratigrafico del sottosuolo e di classificare lo stesso ai sensi del par. 3.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

L'area interessata dagli interventi di progetto si colloca nella parte centro-settentrionale del Tavoliere foggiano, precisamente in un'area compresa tra il centro urbano di San Severo (a nord) e l'alveo del Torrente Salsola (a sud).

Dal punto di vista geologico-strutturale, il Tavoliere si configura come un'estesa depressione di origine tettonica interposta tra i rilievi strutturali delle Murge e del Gargano ed inquadrabile nel sistema di Avanfossa ("Fossa Bradanica") che delimita il margine orientale della catena appenninica (v. Fig. 2.1).



Il Tavoliere, inteso come macrostruttura costituente parte del sistema di avanfossa, risulta a sua volta solcato da numerosi sistemi di faglie che lo suddividono in vari settori dislocati nel sottosuolo a profondità variabili.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL TERRITORIO COMUNALE DI SAN SEVERO (FG)

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

Il Tavoliere centrale, in cui ricade l'area di specifico interesse, risulta delimitato da importanti lineazioni tettoniche a direzione anti-appenninica (ovvero ENE-OSO) quali la Fortore-Volturno a nord e la Manfredonia-Sorrento a sud.

L'altro sistema principale di faglie, ad andamento prevalentemente appenninico (ONO-ESE), determina invece la suddivisione del substrato carbonatico in una serie di blocchi, dislocati nel sottosuolo a profondità crescenti procedendo da est verso ovest (v. **Fig. 2.2**).

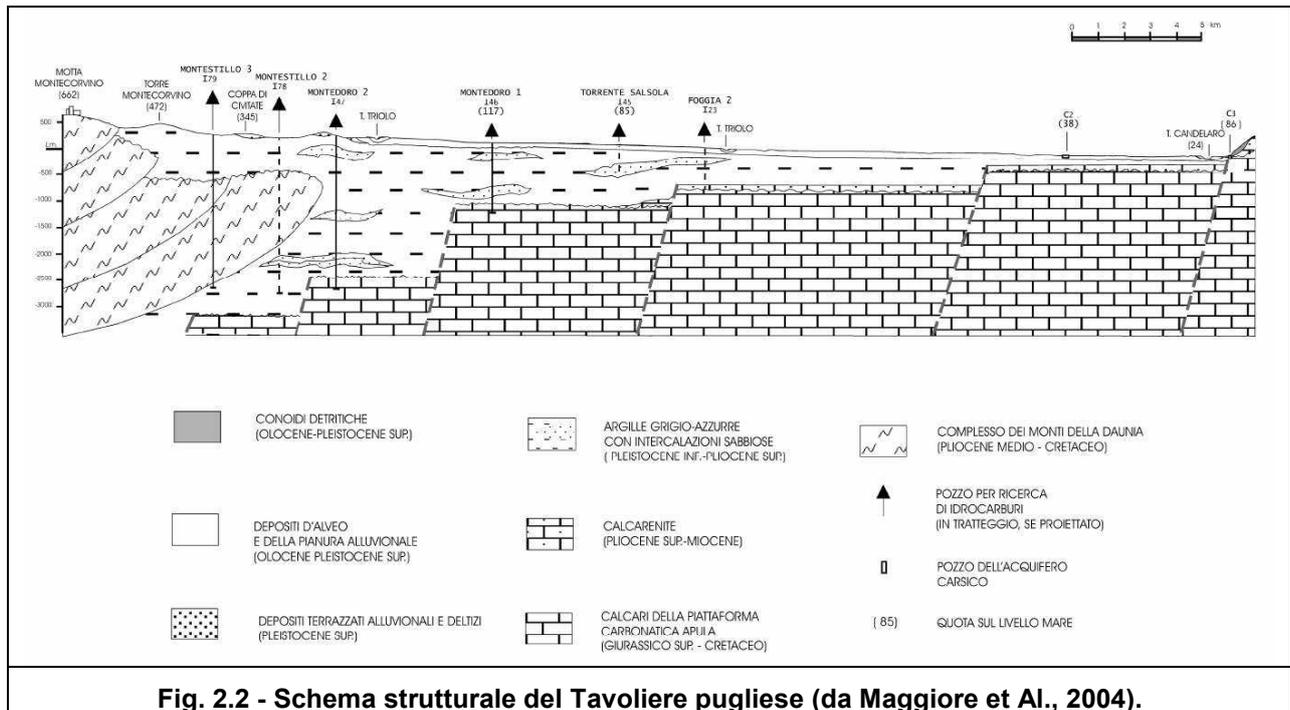


Fig. 2.2 - Schema strutturale del Tavoliere pugliese (da Maggiore et Al., 2004).

Dal punto di vista strutturale, il Tavoliere centrale è globalmente assimilabile ad un semi-graben con allungamento appenninico immergente a SO, localmente complicato da una serie di alti e bassi (come il graben di Ponte di Lama e l'horst di Villaggio Amendola).

Per le proprie caratteristiche altimetrico-strutturali, quest'area è stata interessata, soprattutto nel Pliocene, da notevoli fenomeni di subsidenza e da un'intensa sedimentazione, seguita da un sollevamento generalizzato su vasta scala innescatosi a partire dal Pleistocene inferiore.

In epoca tardo-pleistocenica ed olocenica questa zona ha invece risentito soprattutto delle oscillazioni glacio-eustatiche del livello marino, che hanno dato origine ad una serie di terrazzamenti che rappresentano uno degli elementi geomorfologici caratterizzanti di tutta l'area del Tavoliere.

3 STRATIGRAFIA E LITOLOGIA

Per effetto della pregressa evoluzione paleogeografica, l'area del Tavoliere è caratterizzata dalla presenza di un basamento geologico regionale, costituito da formazioni carbonatiche di età mesozoica, dislocato tettonicamente a rilevante profondità nel sottosuolo e sormontato da una potente coltre di depositi marini di avanfossa di età plio-pleistocenica e da un complesso di depositi marini e continentali terrazzati di età tardo quaternaria.

I depositi di origine prettamente marina riferibili al sistema deposizionale dell'Avanfossa Bradanica ("Calcarene di Gravina", "Argille Subappennine") affiorano nelle zone più interne, situate alle pendici dei rilievi del Subappennino Dauno. Nella zone del Tavoliere comprese tra i rilievi pre-appenninici e il promontorio del Gargano, detti depositi non affiorano ma si rinvengono comunque nel sottosuolo a profondità variabili in funzione delle condizioni di dislocamento tettonico del basamento.

Infatti, nella fascia centro-orientale del Tavoliere, topograficamente più depressa, affiorano con continuità i depositi terrazzati tardo quaternari, costituiti da numerosi corpi stratigrafici (sintemi e sub-sintemi) di genesi sia marina che continentale, raggruppati nel "Super-sintema del Tavoliere di Puglia". I sintemi più antichi sono sovente suddivisi in sub-sintemi che distinguono i depositi marini dai sovrastanti depositi continentali. I sintemi più recenti sono invece costituiti essenzialmente da successioni continentali.

I depositi terrazzati di origine marina sono generalmente costituiti da facies di mare sottile e/o di ambiente transizionale con ben marcato trend regressivo. I depositi continentali sono invece costituiti prevalentemente da facies di piana alluvionale, rappresentati da un'alternanza di corpi lenticolari costituiti da sedimenti ghiaiosi, sabbiosi e limoso-argillosi, che si incrociano e anastomizzano di frequente.

I depositi continentali poggiano su superfici d'erosione intagliate sui depositi terrazzati più antichi (sia continentali che marini), che, a loro volta, poggiano in erosione sulle Argille Subappennine.

Nel presente studio è stata adottata la suddivisione stratigrafica riportata nella nuova carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 di recente pubblicazione (ISPRA, 2011). In base al nuovo strumento cartografico, le unità costituenti la colonna stratigrafica locale sono le seguenti:

- Argille Subappennine (Pleistocene inferiore);
- Sintema di Vigna Bocola (Pleistocene medio);
- Sintema di Masseria La Motticella (Pleistocene medio-superiore);
- Sintema di Foggia (Pleistocene superiore);
- Sintema di Motta del Lupo (Pleistocene superiore);
- Sintema di Masseria Finamondo (Pleistocene superiore);
- Depositi alluvionali recenti.

Di seguito verranno descritte le caratteristiche litologiche che contraddistinguono le formazioni sopra elencate. La distribuzione delle aree di affioramento delle singole unità è indicata nelle **Tavv. G1-G2-G3** (carte geologiche in scala 1:10.000), che contengono anche delle sezioni geologiche rappresentative che illustrano i rapporti stratigrafici esistenti tra le varie formazioni.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

Si precisa che, nella presente trattazione, le unità stratigrafiche del basamento geologico regionale e quelle costituenti la parte inferiore del sistema deposizionale di avanfossa non saranno descritte, in quanto localmente dislocate a rilevante profondità nel sottosuolo (tra 300 e 400 metri sotto il l.m.), ovvero in posizione ininfluyente in rapporto alla natura e sfera d'influenza delle opere di progetto.

3.1 Argille Subappennine (Pliocene medio - Pleistocene inferiore)

In tutta l'area del Tavoliere, il basamento geologico regionale è ricoperto da una potente coltre di depositi clastici di origine marina appartenente al sistema deposizionale dell'Avanfossa Bradanica.

La parte superiore della successione di avanfossa è costituita dalla formazione delle Argille Subappennine, un'unità litologicamente omogenea composta in assoluta prevalenza da depositi clastici a composizione limoso-argillosa.

Si tratta principalmente di argille siltose e marne argillose di colore grigio, a cui si intercalano livelli limoso-sabbiosi formanti corpi lenticolari di modesto spessore.

La formazione presenta un ricco contenuto in macrofossili, rappresentato soprattutto da gasteropodi, lamellibranchi, briozoi ed echinidi.

Questa formazione non affiora nell'area in esame, ma si rinviene con continuità nel sottosuolo dove costituisce il substrato su cui poggiano i depositi terrazzati del Super-sistema del Tavoliere di Puglia. In particolare, la formazione argillosa può essere localmente intercettata a profondità di circa 30÷40 metri rispetto al p.c..

La potenza complessiva di questa formazione può variare significativamente in funzione delle condizioni di assetto strutturale del sottostante substrato geologico: dati scaturiti da perforazioni profonde per ricerca di idrocarburi indicano una potenza media che può essere localmente stimata dell'ordine di alcune centinaia di metri. Tuttavia, lo spessore delle argille grigio-azzurre si incrementa progressivamente da est verso ovest, raggiungendo spessori dell'ordine di alcune migliaia di metri in corrispondenza dell'asse centrale dell'Avanfossa.

Il tetto di questa unità è ovunque caratterizzato da una netta superficie di discontinuità erosiva sulla quale poggiano i depositi terrazzati del Pleistocene medio-superiore.

3.2 Sintema di Vigna Bocola (Pleistocene medio)

Il sintema di Vigna Bocola, che affiora diffusamente in corrispondenza e a sud del centro abitato di San Severo, è suddiviso in due sub-sintemi (sub-sintema di San Severo e sub-sintema di Masseria Pallante) separati da limite inconforme.

Il sub-sintema di San Severo, che affiora più diffusamente rispetto al Sintema di Mass. Pallante, presenta le seguenti caratteristiche lito-stratigrafiche:

- orizzonte basale costituito da alternanze argilloso-sabbiose rispettivamente di colore verde e giallastro, fortemente bioturbate e con abbondante contenuto in materia organica;
- livello intermedio composto da sabbie giallastre ben selezionate con interstrati siltoso-argillosi e caratterizzato da una progressiva diminuzione della granulometria dei sedimenti procedendo dal basso verso l'alto, con conseguente aumento di spessore e di frequenza degli interstrati argillosi;
- livello medio-superiore costituito da argille brune e verdi bioturbate, con rare lamine siltoso-sabbiose ed elevato contenuto in materia organica;

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

- orizzonte sommitale costituito da argille verdastre con abbondante presenza di concrezioni calcaree di origine diagenetica, sabbie da medie a fini ben selezionate e a laminazione incrociata passanti in alto ad argille brunastre a laminazione piano-parallela.

L'ambiente di deposizione dei sedimenti è attribuibile a un contesto marino di baia più o meno protetta. Si tratta di una successione marina con un generale trend regressivo con evoluzione verso ambienti di transizione al continentale.

In affioramento quest'unità si presenta principalmente con alternanze siltoso-sabbiose, a luoghi arenacee, con intercalazione di livelli fossiliferi costituiti da concentrazioni di gusci di ostreidi e pectinidi e con argille siltose brunastre.

Lo spessore massimo del sub-sintema di San Severo è di circa 30÷40 m. La base di questa unità è posta a circa 55-60 metri s.l.m., ove si rinviene in erosione sulle Argille Subappennine e sul sintema di Cava Petrilli. Il limite superiore è inconforme con i depositi del sub-sintema di Masseria Pallante o con i sintemi più recenti (sintemi di Masseria la Motticella e di Motta del Lupo).

Il sub-sintema di Masseria Pallante, costituito da depositi ghiaiosi incoerenti e poligenici con abbondante matrice sabbiosa silico-clastica e giallastra, affiora invece ad ovest di San Severo, in aree poste a quote superiori a 100 metri s.l.m.. Tali depositi, dello spessore massimo di 15 metri, sono di origine continentale e si addossano in erosione sul sub-sintema di San Severo o direttamente sulle Argille Subappennine.

Nel dominio di affioramento del Sub-sintema di San Severo ricadono le torri eoliche n. 1, 3 e 4 (v. **Tav. G1 e G3**).

3.3 Sintema di Masseria la Motticella (Pleistocene medio-superiore)

Il sintema di Masseria la Motticella, che affiora ad est e SE del centro abitato di San Severo, è suddiviso in due sub-sintemi, quello di Amendola (che raggruppa le facies di ambiente marino) e quello di Masseria De Grossi (costituito da depositi di genesi continentale).

Nell'area di specifico interesse affiora solo il sub-sintema di Amendola, che presenta localmente le seguenti caratteristiche lito-stratigrafiche:

- livello di base costituito da sabbie fini giallastre con rare intercalazioni siltoso-argillose;
- livello intermedio costituito da silt grigiastri e sabbie giallastre bioturbati con abbondante presenza di materia organica;
- orizzonte sommitale composto da sabbie giallastre (v. **Fig. 3.1**) che mostrano un chiaro aumento di granulometria verso l'alto.

Si tratta di una successione marina con chiaro trend regressivo, riferibile ad ambienti batimetrici variabili dalla shoreface inferiore all'offshore.

Lo spessore massimo dell'unità è di circa 35 metri. Il limite inferiore è posto a circa 23÷25 metri s.l.m. ed è costituito da un contatto erosivo sulle Argille Subappennine o sui depositi marini del sub-sintema di San Severo. Il limite superiore è a sua volta rappresentato da una superficie di erosione al di sopra della quale si rinvengono i sintemi più recenti (sintema di Foggia e sintema di Motta del Lupo).

Nel dominio di affioramento del Sub-sintema di Amendola ricade la torre eolica n. 8 (v. **Tav. G1 e G3**).



Fig. 3.1 – Affioramento dei depositi sabbiosi sommitali del Sub-sistema di Amendola in loc. Podere Sant'Anna.

3.4 Sintema di Foggia (Pleistocene medio-superiore)

Questo sintema è scarsamente rappresentato nell'area di specifico interesse, in quanto è presente solo con alcuni lembi localizzati in prossimità dell'alveo del Torrente Triolo e costituito da sabbie medie e grossolane con rari ciottoli.

Riferibile ad un ambiente continentale di piana alluvionale, l'unità presenta uno spessore massimo di 10 metri. Il limite inferiore è costituito da una superficie erosiva impostata sui sintemi di età più antica. Il limite superiore è inconforme ed è rappresentato da una superficie di erosione su cui poggia il sintema di Motta del Lupo.

Nessuna torre eolica di progetto ricade nel dominio di affioramento di questa unità.

3.5 Sintema di Motta del Lupo (Pleistocene superiore)

Il sintema di Motta del Lupo affiora diffusamente a sud e SE del centro abitato di San Severo in un ampio settore pianeggiante compreso fra le quote di 75 e 30 metri s.l.m. (v. **Fig. 3.2**).

Quest'unità, costituita essenzialmente da depositi continentali, presenta le seguenti caratteristiche lito-stratigrafiche:

- livello inferiore costituito da argille e silt di colore verdastro a laminazione piano-parallela, con abbondanti croste calcaree di origine diagenetica e lamine siltose di

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

colore rossastro;

- orizzonte medio-inferiore composto da livelli sabbiosi a laminazione incrociata e da un livello di ghiaie poligeniche con abbondante matrice sabbiosa arrossata;
- parte medio-superiore costituita da argille brune e verdi con rare lamine siltose piano-parallele con abbondante presenza di materia organica e di bioturbazioni.



Fig. 3.2 – Foto scattata in loc. Motta del Lupo, raffigurante il dominio di affioramento dell’omonimo sintema. Sullo sfondo si nota il terrazzo con le aree topograficamente più elevate in cui affiora il Sub-sintema di San Severo.

Il sintema di Motta del Lupo è interpretabile come un deposito di piana alluvionale in evoluzione, con passaggio da condizioni idrodinamiche di moderata energia ad ambienti alluvionali di aree marginali di esondazione o paludose con acqua stagnante.

Il sintema di Motta del Lupo si rinviene in discordanza su tutte le unità più antiche, ovvero, nell’ambito dell’area presa in esame, principalmente sui sintemi di Vigna Bocola, di Masseria la Motticella e di Foggia. Il limite superiore, di tipo inconforme, è rappresentato da una superficie di erosione al di sopra della quale si rinviene il sintema di Masseria Finamondo.

Lo spessore di quest’unità aumenta da ovest verso est, passando da circa 20 metri ad un massimo di 30 metri.

Nel dominio di affioramento di questa unità ricadono le torri eoliche n. 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 (v. **Tav. G1-G2-G3**).

3.6 Sintema di Masseria Finamondo (Pleistocene superiore)

I depositi del sintema di Masseria Finamondo affiorano diffusamente ad est e SE del centro abitato di San Severo, in corrispondenza di estese superfici sub-pianeggianti (comprese fra quote di 45 e 35 metri s.l.m.) limitate da modesti orli di terrazzo all'interno dei quali si sviluppa la piana alluvionale attuale del Candelaro e dei suoi affluenti.

L'unità, che in affioramento è rappresentata principalmente da depositi argillosi brunastri, presenta complessivamente le seguenti caratteristiche lito-stratigrafiche:

- livello basale costituito da fitte alternanze argilloso-sabbiose di colore giallastro a laminazione piano parallela ed incrociata, passanti superiormente ad alternanze ghiaioso-sabbiose, con ghiaie poligeniche ad elementi di dimensione centimetrica e sabbie rossastre;
- orizzonte intermedio composto da argille brune laminate con abbondante contenuto in terra rossa;
- livello medio-superiore costituito da argille brune con intercalati frequenti livelli sabbiosi e siltosi, abbondante materia organica, e presenza, nella parte sommitale, di concrezioni calcaree di origine diagenetica.

Il sintema di Masseria Finamondo è costituito da facies di ambiente marino transizionale (nella parte basale) passanti rapidamente a depositi continentali di ambiente alluvionale e palustre.

Il sintema di Masseria Finamondo, che si rinviene in erosione principalmente sul sintema di Motta del Lupo, presenta una potenza complessiva di circa 25 ÷ 30 metri.

Nel dominio di affioramento di quest'unità ricadono le torri eoliche n. 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21 e 22 (v. **Tav. G1 e G2**).

3.7 Depositi alluvionali recenti (Olocene)

Sono riferibili a questa unità i depositi, attualmente in fase di evoluzione, presenti negli alvei attivi dei principali corsi d'acqua.

Essi sono composti da ciottoli carbonatici, sabbie, limi e argille nerastre e poggiano in erosione sulle unità più antiche.

Lo spessore complessivo di questi depositi è generalmente dell'ordine di 3 ÷ 5 metri.

Nel dominio di affioramento di questi depositi ricade la torre eolica n. 18 (v. **Tav. G2**).

4 GEOMORFOLOGIA E IDROGRAFIA

Dal punto di vista geografico, l'area in esame ricade nel Tavoliere centrale (anche detto medio Tavoliere), una sub-unità fisiografica che individua il territorio compreso tra il Subappennino Dauno e il promontorio del Gargano (v. **Fig. 4.1**) e che risulta caratterizzata da numerosi corsi d'acqua che nascono dall'Appennino e scorrono in direzione OSO-ENE, confluendo nel Torrente Candelaro.

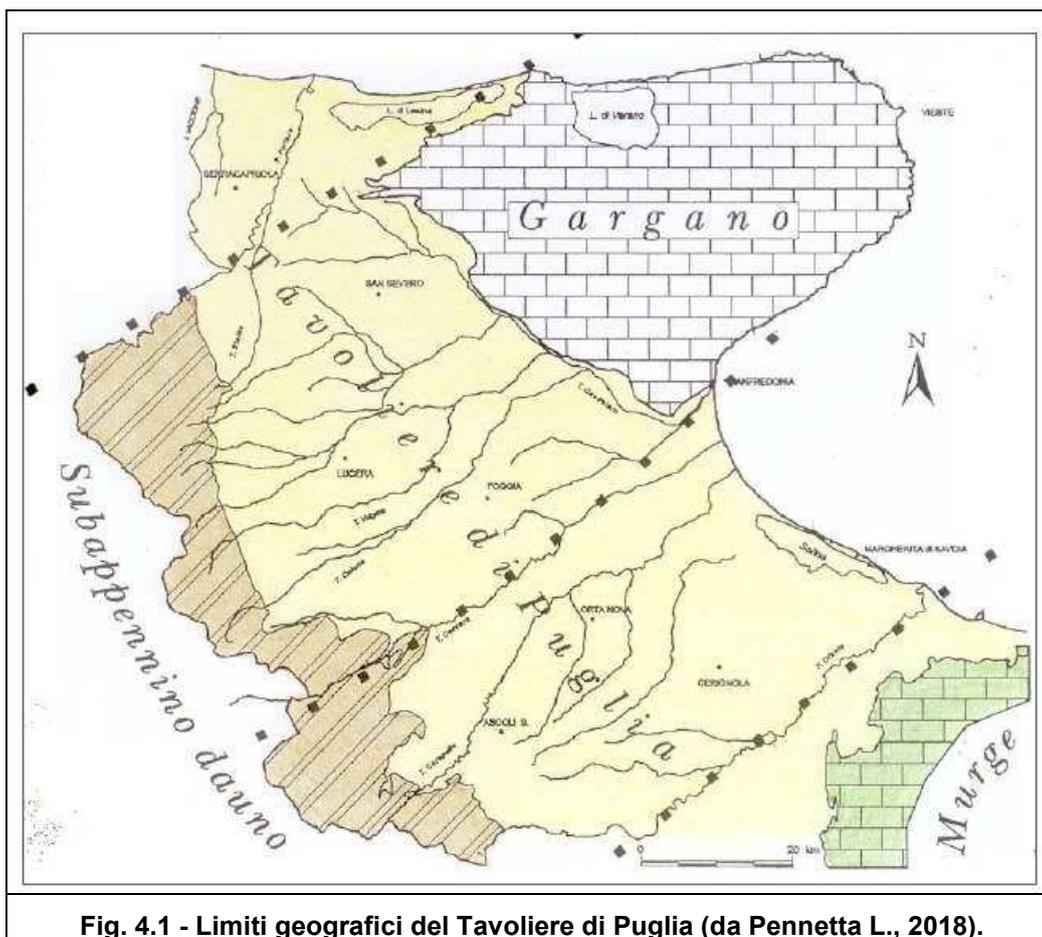


Fig. 4.1 - Limiti geografici del Tavoliere di Puglia (da Pennetta L., 2018).

L'assetto altimetrico del Tavoliere centrale è connotato da un lento, graduale e progressivo digradare delle quote topografiche da ovest verso est. Infatti, le quote altimetriche passano dai valori massimi di circa 300 metri s.l.m. delle zone dell'entroterra poste ai confini con il Subappennino Dauno ai valori minimi di 10-20 metri s.l.m. che si riscontrano lungo il tracciato del Torrente Candelaro.

Sui fianchi delle zone altimetricamente più elevate dell'entroterra si riconoscono dei ripiani che corrispondono a terrazzi marini, digradanti verso l'Adriatico e delimitati talvolta da scarpate poco elevate, corrispondenti ad antiche ripe di abrasione. D'altronde, nell'ambito del Tavoliere pugliese è riconosciuta la presenza di una serie di almeno otto ripiani disposti ad altezze diverse fra le quote 350 e 5 metri s.l.m. (v. **Fig. 4.2**). Ogni ripiano è bordato da una scarpata che corrisponde ad un'antica linea di costa.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

Tuttavia, nell'area presa in esame non è stata rilevata presenza di gradini morfologici di altezza significativa. Infatti, la morfologia del territorio situato a sud e SE di San Severo è decisamente pianeggiante, con quote topografiche variabili tra 90 e 40 metri s.l.m., progressivamente digradanti da ovest verso est. Le variazioni di quota sono però lente e graduali e si esplicano con pendenze molto modeste, principalmente dell'ordine dello $0,2 \div 0,5\%$.

La morfologia pressoché tabulare della superficie topografica è localmente interrotta solo dagli elementi morfologici correlati al reticolo idrografico.

D'altronde, un'altra caratteristica saliente del Tavoliere centrale è data proprio dalla presenza di un reticolo idrografico costituito da corsi d'acqua a regime torrentizio che scorrono parallelamente con direzione OSO-ENE. Detti corsi d'acqua incidono i depositi quaternari creando un reticolo a luoghi anche fitto e gerarchizzato che recapita interamente nell'alveo del Torrente Candelaro (v. **Fig. 4.3**).

Le portate medie dei torrenti che solcano il Tavoliere sono assai esigue. Il regime è fortemente irregolare, caratterizzato da magre estive e da piene autunnali-invernali, che in passato hanno dato luogo a rovinose inondazioni.

L'area interessata dagli interventi di progetto si estende quindi in un contesto di piana alluvionale, laddove tutti gli elementi morfologici dominanti sono riconducibili e correlabili con i principali elementi del reticolo idrografico.

Infatti, il paesaggio dell'area che si estende a sud e SE di San Severo presenta gli aspetti di un modellamento fluviale di tipo policiclico, caratterizzato da superfici pianeggianti variamente estese e intagliate da analoghe forme più recenti, che caratterizzano tutti gli interfluvi degli affluenti del torrente Candelaro.

I bacini idrografici degli affluenti del Candelaro sono molto estesi arealmente e caratterizzati, a causa della generale morfologia pianeggiante, da spartiacque indeterminato e da una fittezza di brevi linee di deflusso cataclinali, che si diramano dai versanti delle superfici terrazzate, confluendo nelle aste principali dei torrenti Triolo (v. **Fig. 4.4**) e Salsola. Questi corsi d'acqua, caratterizzati da bassi profili di equilibrio e da alvei localmente delimitati da argini sia naturali che di origine antropica, presentano, a seconda delle condizioni meteorologiche, una naturale tendenza a divagare e/o ad inondare le valli nelle quali scorrono.

I corsi d'acqua secondari sono rappresentati da canali (di origine sia naturale che antropica) che confluiscono all'interno dei torrenti sopra citati. Tra questi si possono citare i canali Ferrante (v. **Fig. 4.5**), Santa Maria (v. **Fig. 4.5**) e Venolo che si innestano come rami affluenti in sinistra orografica del Torrente Triolo.

La presenza del reticolo idrografico e, soprattutto, il regime spiccatamente torrentizio dei corsi d'acqua che attraversano il Tavoliere centrale determina significativi rischi di inondazione per ampie superfici morfologicamente più depresse e situate nelle adiacenze degli assi di drenaggio principali e secondari.

Tale circostanza è chiaramente evidenziata dai vincoli di pericolosità idraulica del P.A.I. attualmente gravanti su estese superfici comprese tra l'alveo del Torrente Triolo e quello dei Canali Ferrante e Santa Maria (v. **Fig. 4.6**).



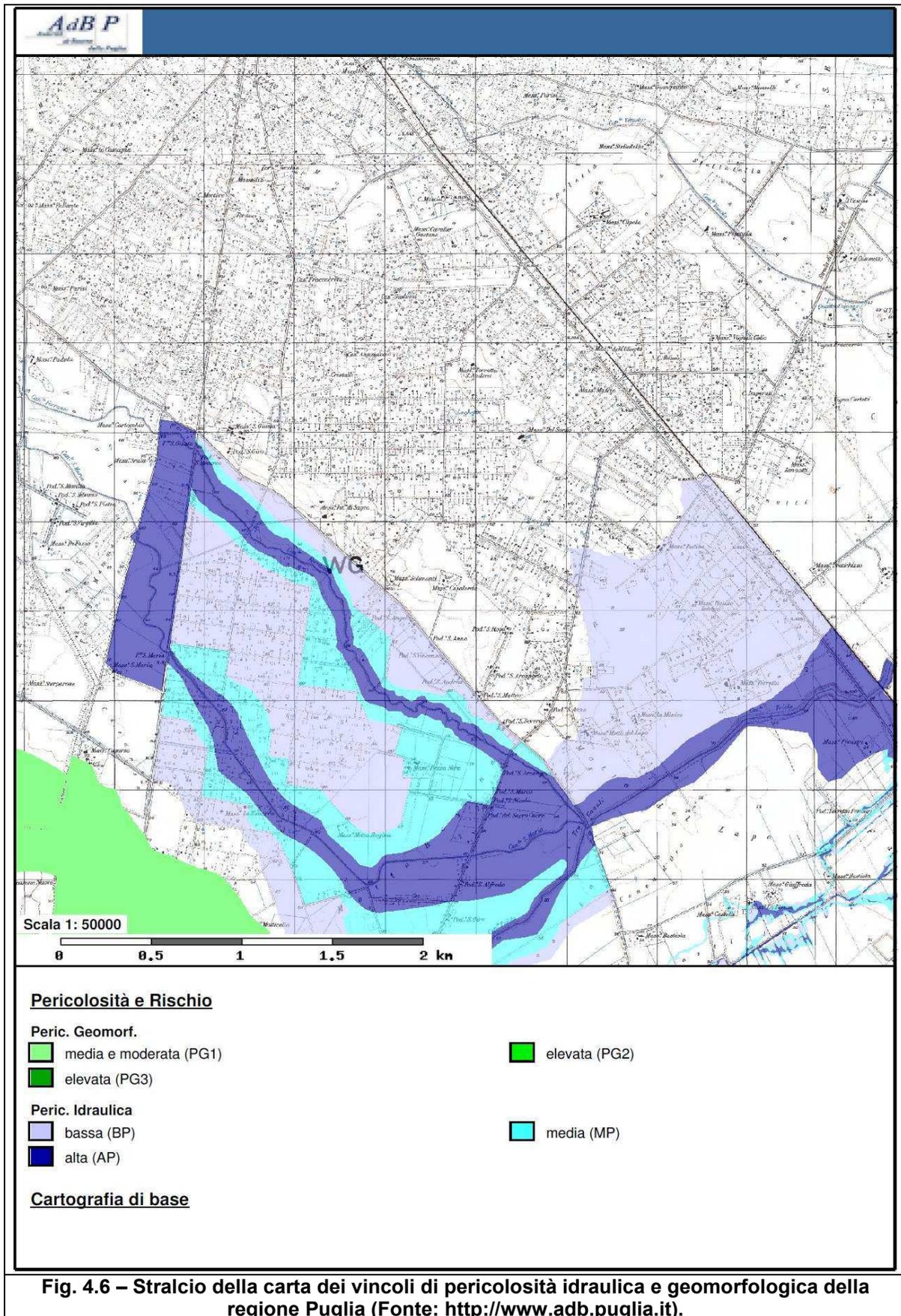
Fig. 4.4 – Alveo del Torrente Triolo.



Fig. 4.5 – Canale Ferrante (a sinistra) e Canale Santa Maria (a destra).

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO NEL TERRITORIO COMUNALE DI SAN SEVERO (FG)

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA



5 IDROGEOLOGIA

Le condizioni di assetto stratigrafico e strutturale del Tavoliere determinano l'esistenza di una circolazione idrica sotterranea che si esplica su più livelli, all'interno di almeno tre unità acquifere principali situate a differenti profondità.

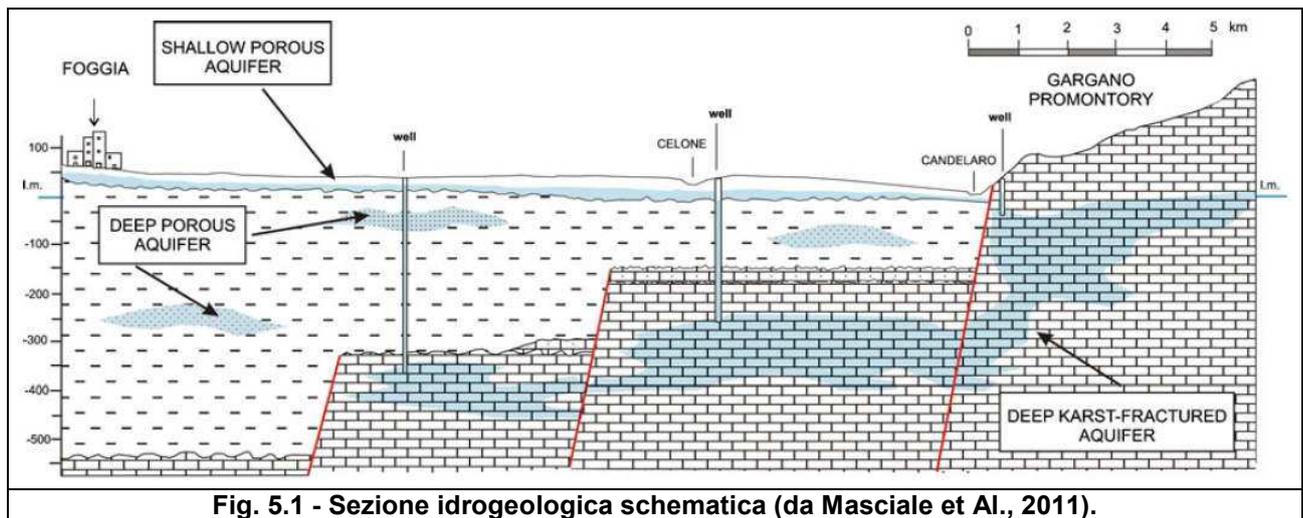


Fig. 5.1 - Sezione idrogeologica schematica (da Masciale et Al., 2011).

Come schematicamente illustrato in **Fig. 5.1**, procedendo dal basso verso l'alto, la successione degli acquiferi risulta essere la seguente:

1. acquifero fessurato-carsico profondo, situato in corrispondenza del substrato carbonatico pre-pliocenico;
2. acquifero poroso profondo, corrispondente ai diversi livelli sabbiosi intercalati nella formazione plio-pleistocenica delle "Argille Subappennine";
3. acquifero poroso superficiale, ospitato nei depositi sabbioso-ghiaiosi marini e continentali di età quaternaria.

Nel seguito, l'acquifero carsico non verrà descritto in quanto esso non riveste alcuna rilevanza ai fini della presente trattazione, per il semplice motivo che il basamento calcareo che lo ospita risulta localmente dislocato nel sottosuolo ad una profondità di alcune centinaia di metri e la falda, confinata al tetto dalle argille plio-pleistoceniche, è costituita da acque marine di invasione continentale.

5.1 L'acquifero poroso profondo

L'acquifero poroso profondo è costituito dagli interstrati sabbiosi presenti a diversa altezza nella successione argillosa plio-pleistocenica.

Le caratteristiche di questo acquifero sono poco conosciute soprattutto per quel che riguarda la geometria e la distribuzione spaziale dei corpi idrici, la connessione idraulica tra i diversi livelli e le altre falde del Tavoliere, le modalità di alimentazione e di deflusso.

In linea generale, i livelli acquiferi sono costituiti da corpi discontinui di forma lenticolare, localizzati a profondità variabili tra -150 e -500 metri rispetto al piano campagna. Lo spessore dei livelli acquiferi non supera di norma le poche decine di metri.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

La falda risulta ovunque in pressione e presenta quasi sempre caratteri di artesianità. La produttività dei livelli idrici, pur essendo variabile da luogo a luogo, risulta sempre molto bassa con portate di pochi litri al secondo.

Anche questo acquifero, come l'acquifero carsico di base, non presenta alcun interesse ai fini della presente trattazione, in quanto localizzato nel sottosuolo a profondità molto superiori alla possibile sfera di influenza delle opere di progetto.

5.2 L'acquifero poroso superficiale

L'acquifero poroso superficiale si rinviene nei depositi quaternari che ricoprono con notevole continuità laterale la sottostante formazione plio-pleistocenica delle Argille Subappennine, che funge da substrato impermeabile.

Le stratigrafie dei numerosi pozzi per acqua realizzati nel Tavoliere hanno evidenziato l'esistenza di una successione di terreni sabbioso-ghiaioso-ciottolosi, permeabili ed acquiferi, intercalati da livelli limoso-argillosi, a luoghi sabbiosi, a minore permeabilità. I diversi livelli in cui l'acqua fluisce non costituiscono orizzonti separati ma sono idraulicamente interconnessi, dando luogo ad un unico sistema acquifero.

In linea generale, si può affermare che i sedimenti a granulometria più grossolana, e quindi più permeabili prevalgono nelle zone dell'entroterra, mentre procedendo verso est si fanno più frequenti ed aumentano di spessore le intercalazioni limoso-sabbiose meno permeabili. Ne risulta, quindi, che l'acqua circola in condizioni freatiche nella fascia più interna ed in pressione nella zone medio-basse.

Lo spessore della falda può variare da 2 a 30 metri in funzione delle caratteristiche geometriche del materasso acquifero. Anche la produttività della falda è molto variabile arealmente in funzione delle caratteristiche di permeabilità degli orizzonti acquiferi.

Inoltre, a causa dell'estrema irregolarità del tetto del substrato impermeabile che sostiene l'acquifero, lo stesso tende ad approfondirsi procedendo da ovest verso est, tanto che, in prossimità della linea di costa, spesso si rinviene al di sotto dello zero altimetrico.

La potenzialità reale della falda, essendo strettamente legata a fattori di ordine morfologico e stratigrafico, variano significativamente da zona a zona. Le acque, infatti, tendono ad accumularsi preferenzialmente dove il tetto delle argille forma dei veri e propri impluvi o laddove lo spessore dei terreni permeabili è maggiore e/o dove la loro natura è prevalentemente ghiaiosa.

L'alimentazione della falda superficiale è legata principalmente al contributo delle precipitazioni meteoriche: le zone di alimentazione della falda sono quindi rappresentate dalle aree di affioramento dei terreni a composizione sabbioso-conglomeratica. Tuttavia, diversi Autori ritengono che un contributo supplementare all'alimentazione della falda superficiale sia fornito anche dai corsi d'acqua che solcano il Tavoliere e che, attraversando lungo il proprio tracciato dei terreni permeabili, cedono alla falda una parte più o meno rilevante delle loro portate di piena.

Nel suo complesso, la falda risulta soggetta a forti escursioni stagionali del livello piezometrico, essenzialmente correlate alla distribuzione temporale dei periodi piovosi. Inoltre, per effetto di tali escursioni, nonché per le variazioni areali della morfologia del substrato impermeabile e per i complessi rapporti di interazione con i corsi d'acqua superficiali, anche l'andamento generale della superficie piezometrica della falda e le direzioni di deflusso della stessa risultano estremamente variabili sia temporalmente che spazialmente.

Tuttavia, alcune direttrici generali di deflusso a grande scala rimangono costanti e ben

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

definite. In **Fig. 5.2** è riportata la rappresentazione delle curve isopiezometriche medie dell'acquifero superficiale del Tavoliere estratta dalla Tav. 6.3.1 del Piano di Tutela delle Acque della Regione Puglia (2005), da cui si evince come la falda superficiale del Tavoliere defluisca in maniera generalizzata da ovest verso est.

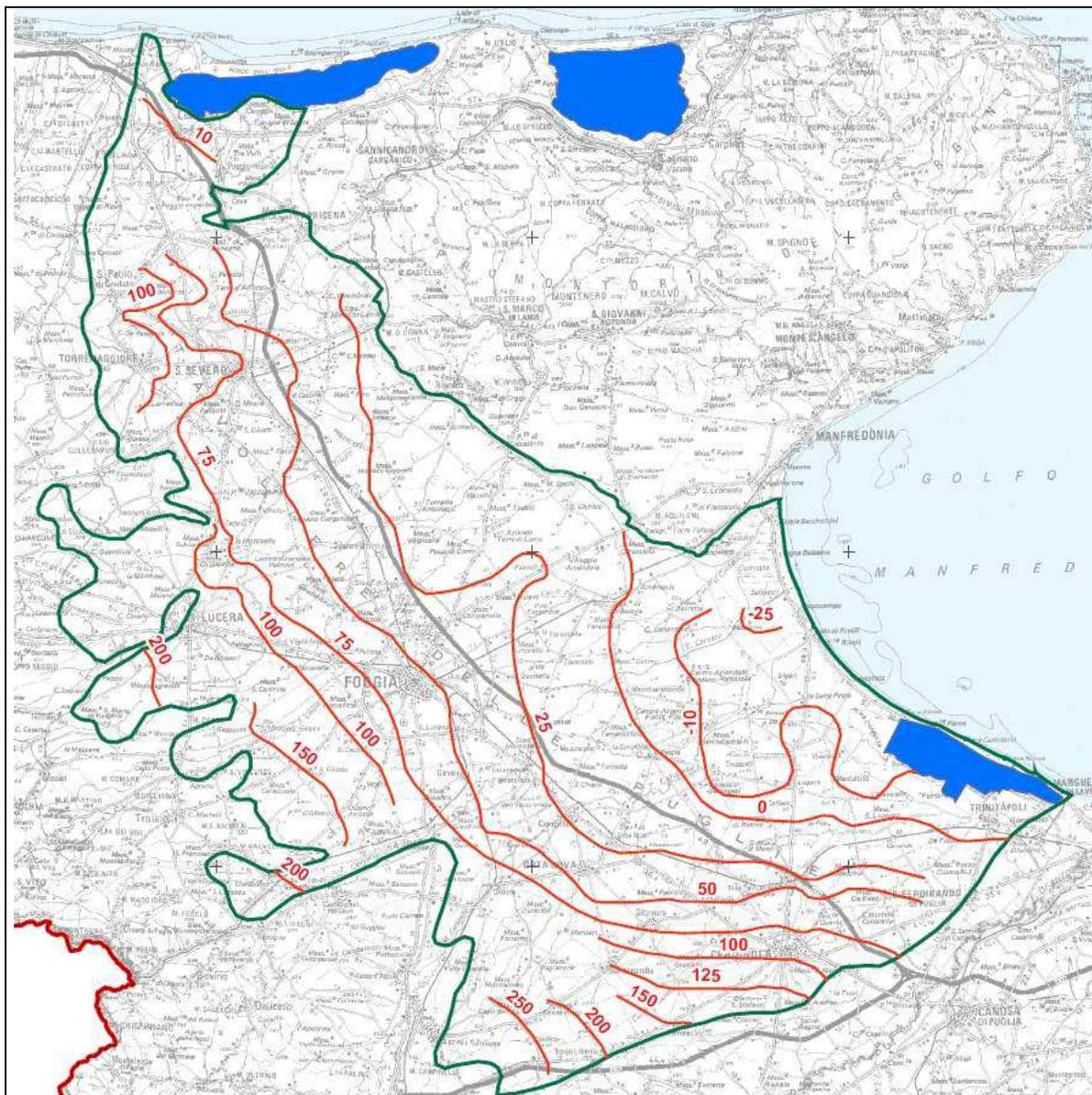


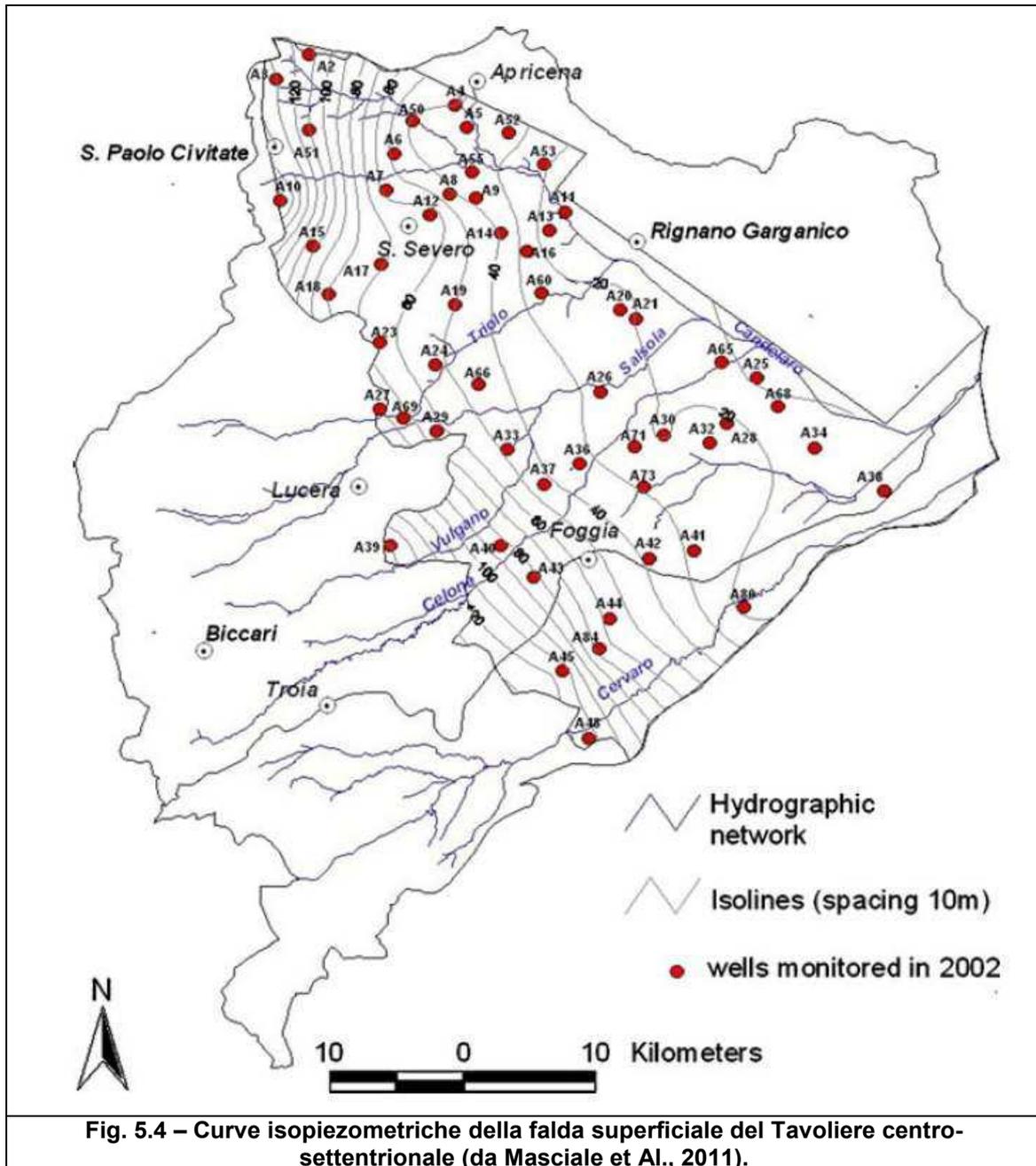
Fig. 5.2 - Curve isopiezometriche della falda superficiale del Tavoliere (dal Piano regionale di Tutela delle Acque, 2005).

Tuttavia, in corrispondenza del limite geografico tra il Tavoliere meridionale e quello centro-settentrionale esiste uno spartiacque idrogeologico che separa le direttrici di deflusso della falda superficiale. Nelle zone ricadenti a nord dello spartiacque, il deflusso della falda è diretto verso la faglia del Candelaro, mentre in quelle a sud è orientato verso la costa adriatica.

In **Fig. 5.3** è riportata la distribuzione dei carichi piezometrici della falda superficiale del Tavoliere centro-settentrionale. Nell'area in esame, compresa tra il centro abitato di San

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

Severo e il torrente Salsola, i carichi piezometrici della falda superficiale oscillano tra +70 metri e +20 metri s.l.m. e il deflusso sotterraneo è orientato da SO verso NE.



Pertanto, nell'area interessata dagli interventi di progetto, considerando le locali quote topografiche e le naturali oscillazioni stagionali del livello freatico, **si prevede il possibile rinvenimento della falda freatica a profondità comprese tra -2 e -5 metri rispetto al p.c.** Di tale circostanza si dovrà tener conto nella progettazione delle opere e nell'esecuzione degli scavi per la realizzazione delle opere di fondazione delle torri eoliche.

6 SISMICITÀ E PERICOLOSITÀ SISMICA

6.1 Sismicità storica

Il Tavoliere foggiano si configura come un'area che, oltre ad essere caratterizzata dalla presenza di alcune potenziali sorgenti sismogenetiche, risente anche dell'elevata sismicità di alcune zone contermini quali quelle del Matese, del Beneventano, dell'alta Irpinia e dell'area garganico-molisana, territori in cui si sono verificati alcuni dei maggiori terremoti della storia sismica italiana.

Pur essendo caratterizzata da un tasso di sismicità sensibilmente più basso della vicina zona situata a cavallo tra il Molise e il Gargano, l'area del Tavoliere di Puglia è stata colpita in tempi storici da tre importanti eventi distruttivi: il terremoto di Ascoli Satriano del 27/12/1361, quello della Capitanata settentrionale del 30/07/1627 e quello del Foggiano centro-meridionale del 20/03/1731. Si tratta di eventi catastrofici, cui il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani attribuisce valori di magnitudo pari rispettivamente a 6.1, 6.7 e 6.3 (v. **Fig. 6.1**), ovvero tali da produrre fenomeni di fagliazione superficiale.

Nel complesso, i dati di sismicità storica indicano che, dei cinque terremoti che hanno causato un elevato numero di vittime in Puglia (1361, 1627, 1646, 1731, 1743), quattro si sono verificati in un intervallo di soli 116 anni. Inoltre, ad eccezione dell'evento del 1743 (con epicentro nel canale d'Otranto), tutti gli altri hanno avuto luogo nel nord della Puglia.

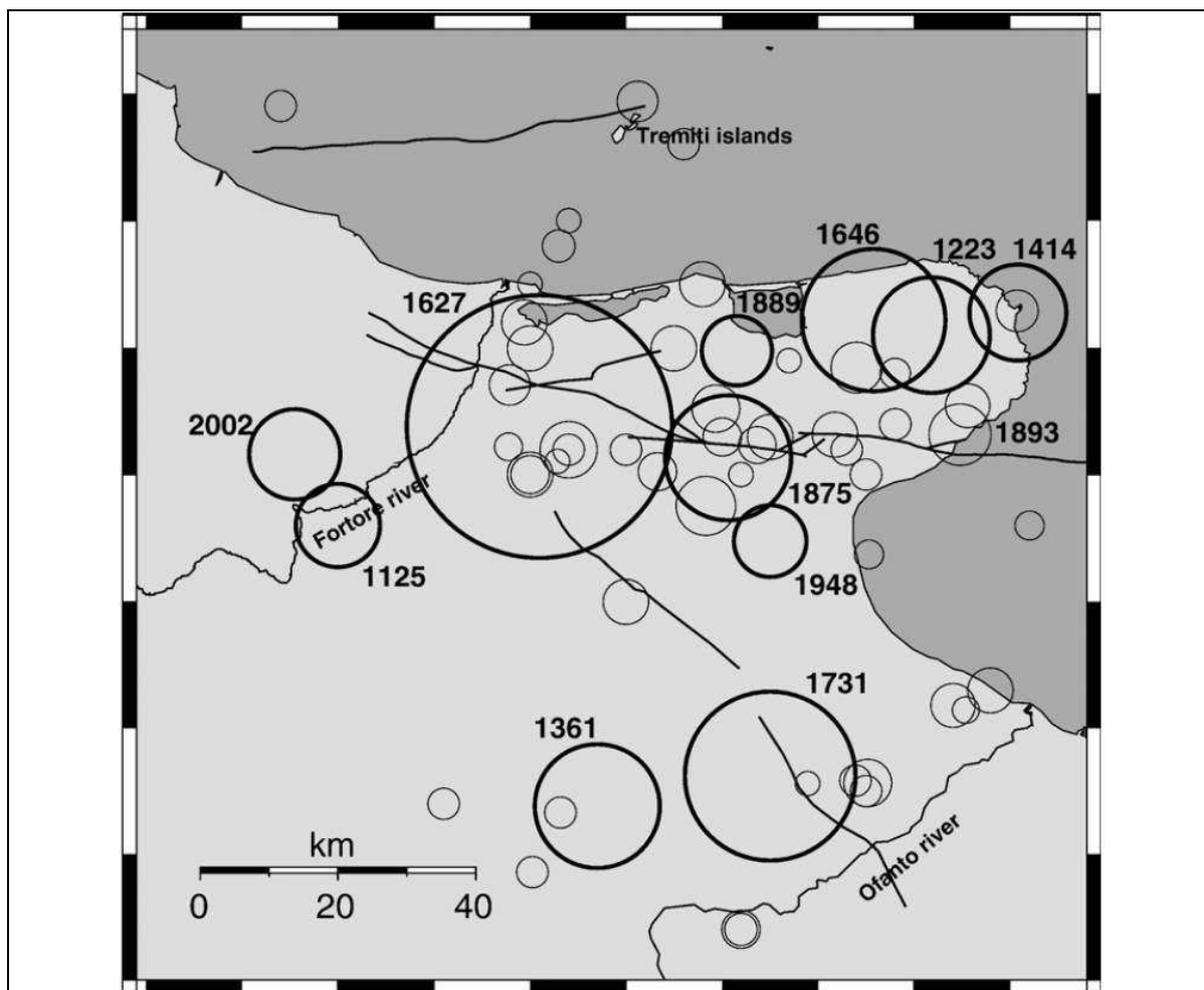
Per quanto riguarda l'area di specifico interesse, particolare rilevanza assume il terremoto del 30 luglio 1627, che colpì pesantemente proprio il Tavoliere centro-settentrionale e che è considerato a tutt'oggi il più disastroso terremoto documentato nella storia sismica della Puglia. Esso colpì pesantemente soprattutto i centri abitati di Serracapriola, Lesina, San Paolo di Civitate, Apricena, Torremaggiore e San Severo, arrecando gravi distruzioni con un bilancio di circa 5.000 vittime.

Il campo macrosismico di questo terremoto riportato in **Fig. 6.2**, evidenzia la distribuzione areale dei livelli massimi di danneggiamento del X grado della scala Mercalli. Il sisma fu inoltre accompagnato da fenomeni impressionanti quali lo svuotamento per alcune ore del lago di Lesina e un successivo maremoto che si abbatté nella medesima area producendo la sommersione del centro abitato di Lesina. Tali fenomeni inducono a ipotizzare la probabile attivazione di una grande faglia con associate forti deformazioni e significativi spostamenti verticali che hanno coinvolto anche l'antistante fondale marino (Del Gaudio, 2007).

Tuttavia, l'identificazione della struttura sismogenetica all'origine di questo terremoto è ancora controversa. Esistono molte ipotesi al riguardo, nessuna delle quali risulta a tutt'oggi ragionevolmente certa e provata. Ad esempio, Patacca & Scandone (2001) hanno associato tale sisma alla faglia di Apricena, mentre studi più recenti tendono ad identificarne la probabile sorgente in una faglia sepolta con direzione nord-sud passante tra il Fiume Fortore e il Lago di Lesina (Del Gaudio et Al., 2007).

Tali ipotesi smentiscono comunque la diffusa opinione secondo cui la sismicità del nord della Puglia sarebbe principalmente associata al promontorio garganico. Al contrario, studi condotti sulle strutture del sottosuolo hanno individuato l'esistenza di una faglia ad andamento NW-SE, denominata "faglia Foggia-Cerignola", che mostra evidenze di attività recenti e che è ritenuta potenzialmente sismogenetica (Patacca & Scandone, 2001). Peraltro, essa viene ritenuta responsabile dell'evento sismico del 20/03/1731, che risultò anch'esso piuttosto violento e distruttivo.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA



List of historical earthquakes of northern Apulia with epicentral intensity $I_0 \geq VII$ MCS (data from CPTI Working Group, 2004): I_{max} = maximum intensity; M_W = moment magnitude estimated (from macroseismic data)

Date	Latitude (N)	Longitude (E)	I_{max}	I_0	M_W	Zone
1125.10.11	41.60	15.00	IX	VIII	5.7	Molise
1223	41.85	16.03	IX	IX	6.0	Gargano
1361.07.17	41.23	15.45	X	IX	6.1	Ascoli Satriano
1414	41.88	16.18	VIII-IX	VIII-IX	5.8	Vieste
1627.07.30	41.73	15.35	X	X	6.7	Gargano
1646.05.31	41.87	15.93	IX-X	IX-X	6.2	Gargano
1657.01	41.83	15.33	-	VII	5.2	Apricena
1731.03.20	41.27	15.75	IX	IX	6.3	Foggiano
1739.02.13	41.50	15.50	-	VII	5.2	Foggia
1783.11.15	41.67	15.33	-	VII	5.2	San Severo
1841.02.21	41.63	15.64	VII-VIII	VII-VIII	5.4	S. Marco in Lamis
1864.12.28	41.83	15.58	-	VII	5.2	Sannicandro Garganico
1869.03.31	41.72	15.75	-	VII	5.2	San Giovanni Rotondo
1871.08.01	41.92	15.63	-	VII	5.2	Torre Miletto
1875.12.06	41.69	15.68	VIII	VII-VIII	6.1	S. Marco in Lamis
1889.12.08	41.83	15.69	VII	VII	5.6	Apricena
1893.08.10	41.72	16.08	VIII-IX	VIII	5.4	Mattinata
1894.03.25	41.87	15.32	VII	VII	5.2	Lesina
1912.07.02	41.38	16.13	-	VII	5.2	Trinitapoli
1948.08.18	41.58	15.75	VII-VIII	VII-VIII	5.6	Northern Apulia
1951.01.16	41.81	15.90	VII	VII	5.3	Gargano
1955.02.09	41.72	15.88	VII-VIII	VII	5.2	Monte Sant'Angelo

Fig. 6.1 – Principali eventi macrosismici con epicentro localizzato nella Puglia settentrionale e indicazione delle potenziali strutture sismogenetiche (da Del Gaudio et Al., 2007).

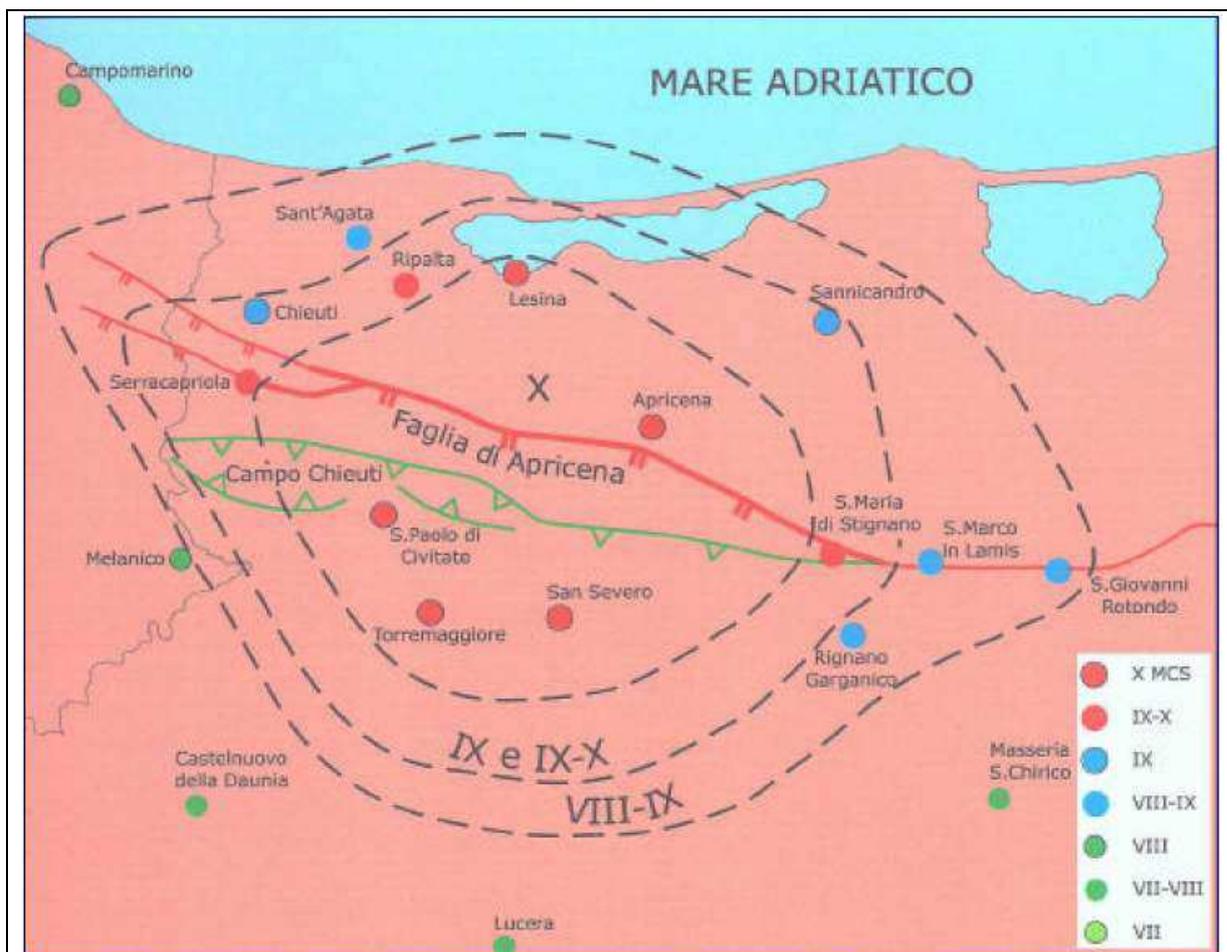


Fig. 6.2 – Campo macrosismico del terremoto della Capitanata centro-settentrionale 30/07/1627 (da Patacca & Scandone, 2001).

Nel caso degli eventi distruttivi che hanno colpito la Capitanata, un ruolo importante nel determinarne le pesanti conseguenze l'hanno avuto sia l'effetto moltiplicativo del danno prodotto dalla risposta di sito che l'attivazione di strutture sismogenetiche locali. I dati e le osservazioni sismologiche di epoca storica relativi al Tavoliere centro-settentrionale segnalano dunque eventi di intensità macrosismica di VIII-X grado M.C.S..

6.2 Sismicità di epoca recente

Per ottenere informazioni relative all'attività sismica di epoca più recente, si è invece proceduto alla consultazione dei database dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. In particolare, sono stati consultati i seguenti database:

- DBMI15 Database Macrosismico Italiano 2015, che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti d'interesse per l'Italia con intensità massima ≥ 5 nella finestra temporale 1000-2014;
- CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015, che fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti d'interesse per l'Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 nella finestra temporale 1000-2014.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

Il database DBMI15 ha consentito di verificare che, all'interno dell'area perimetrata in **Fig. 6.3**, vi sono complessivamente n. 13 località che hanno subito effetti di terremoti di intensità macrosismica compresa tra 7 e 10, così come elencati nella tabella annessa.

Dal catalogo CPTI15 si è invece potuto appurare che, nella medesima area presa in esame, negli ultimi 120 anni si sono verificati almeno n. 6 eventi sismici di magnitudo superiore a 4. Le date, l'ubicazione delle aree epicentrali e le magnitudo dei suddetti eventi sismici sono riportati nella tabella incorporata in **Fig. 6.4**.

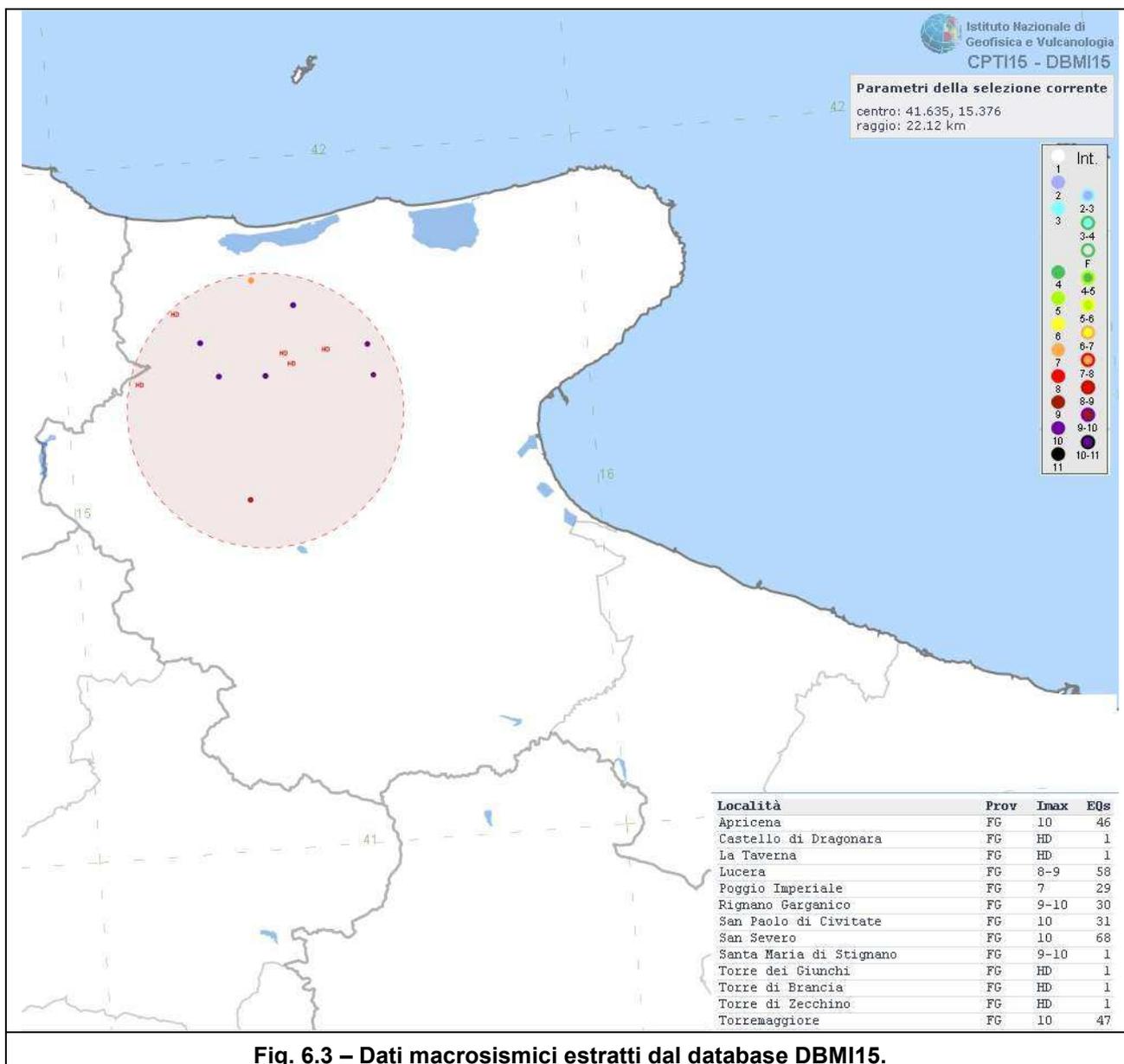


Fig. 6.3 – Dati macrosismici estratti dal database DBMI15.

Come si può osservare in **Fig. 6.4**, il tavoliere centro-settentrionale manifesta una significativa densità di eventi epicentrali, parte dei quali è verosimilmente collegata a diramazioni della faglia di Apricena, mentre altri mostrano un evidente allineamento con la direzione della faglia Foggia-Cerignola, la quale è ormai quasi unanimemente considerata come una struttura potenzialmente sismogenetica.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

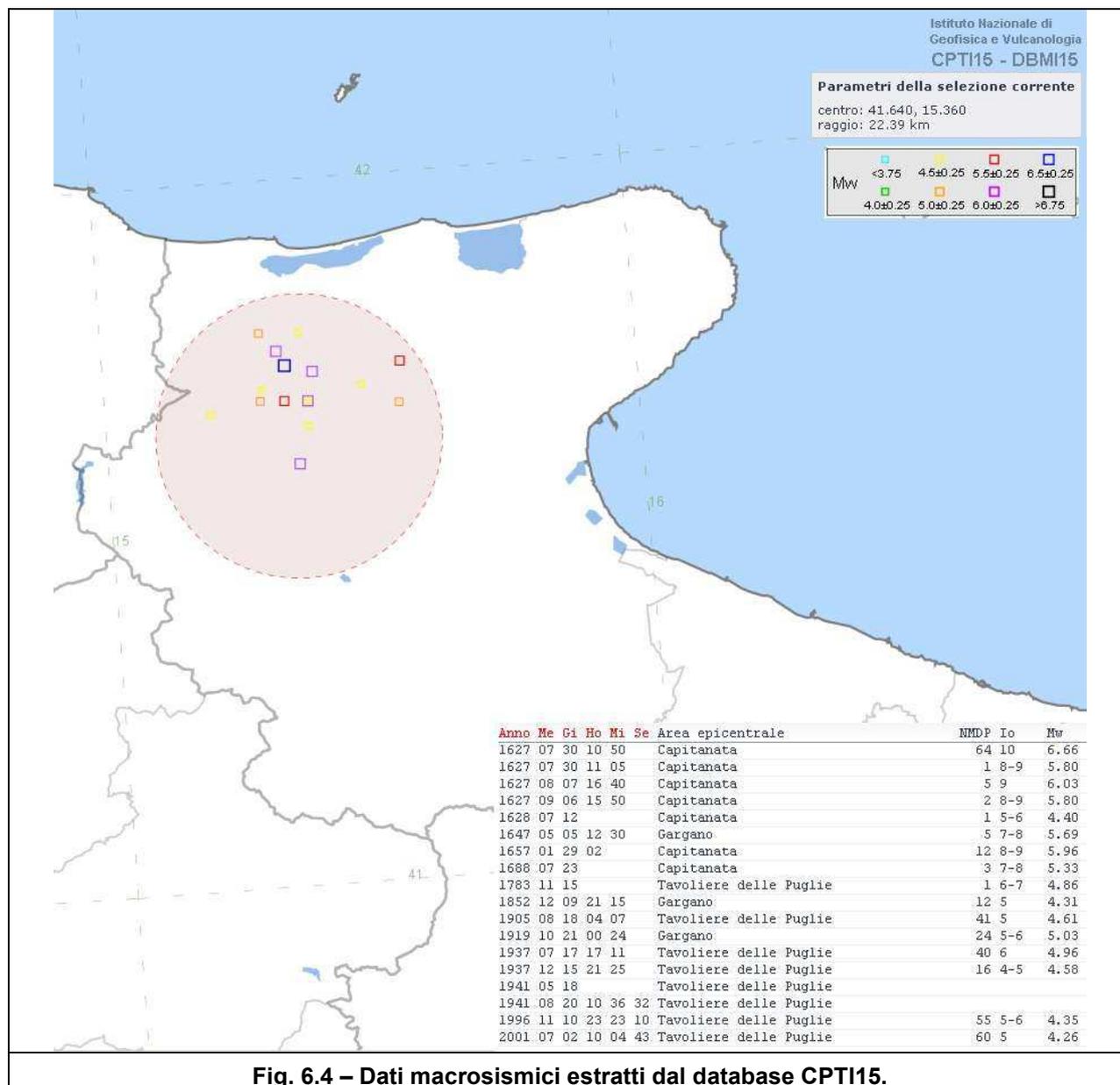


Fig. 6.4 – Dati macrosismici estratti dal database CPT115.

6.3 Pericolosità sismica

Facendo espresso riferimento al vigente strumento di classificazione sismica del territorio italiano (v. Fig. 6.5), redatto nel 2004 in recepimento delle disposizioni contenute nell'O.P.C.M. n. 3274/2003 (recepte dalla Regione Puglia con D.G.R. n. 153/2004), il territorio amministrativo del Comune di San Severo ricade interamente in "Zona 2", ovvero in area a sismicità medio-alta.

Volendo invece esprimere la pericolosità sismica in termini di massima accelerazione sismica del suolo di probabilità statisticamente significativa, si può fare riferimento alle indicazioni contenute nella "Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale" redatta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e pubblicata in allegato all'O.P.C.M. n. 3519/2006 sulla G.U. n. 108 dell'11 maggio 2006. In base alla suddetta mappa, di cui è riportato uno stralcio in Fig. 6.6, l'area interessata dagli interventi di

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

progetto ricade in zona di media pericolosità sismica, espressa in termini di accelerazione massima del suolo (riferita a suoli rigidi di Categoria A così come definiti al punto 3.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni) di $0,200 \pm 0,225$ g per la zona nord e di $0,175 \pm 0,200$ g per la zona sud, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

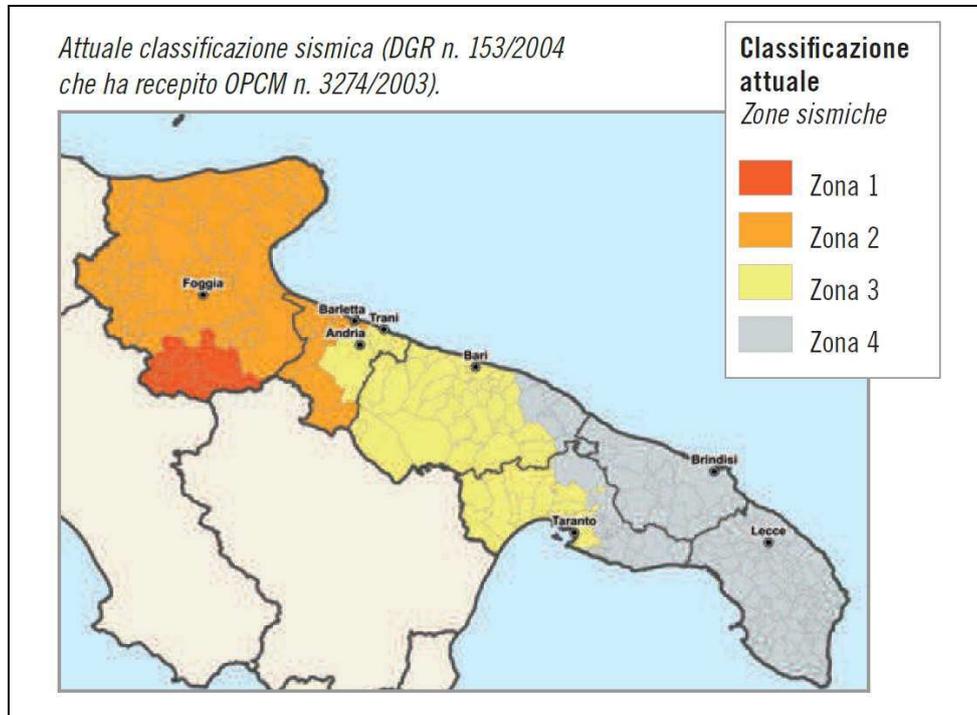
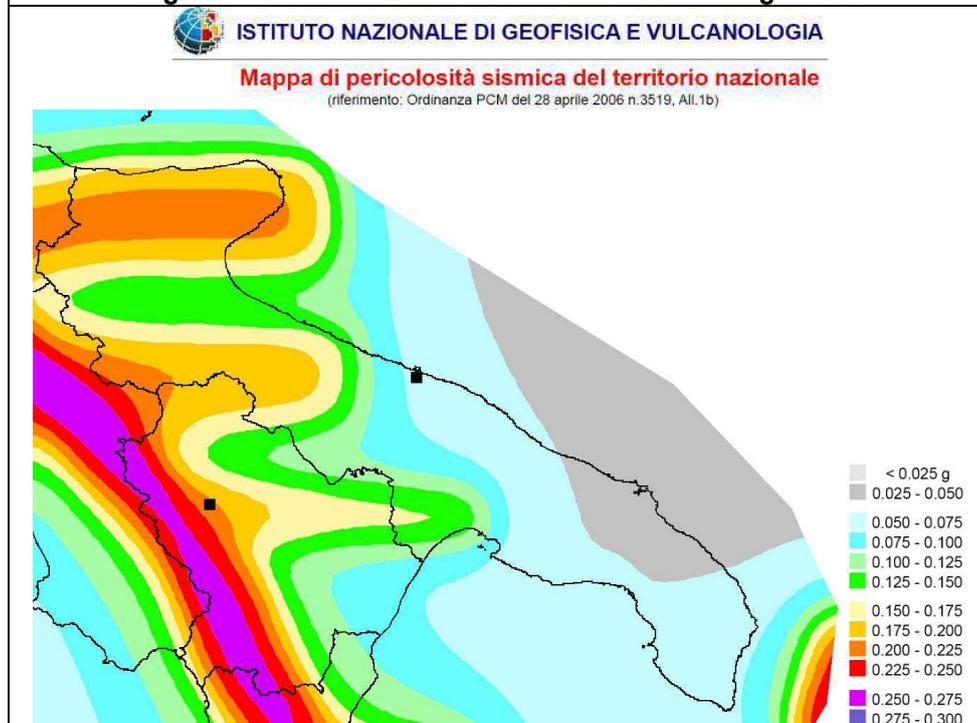


Fig. 6.5 – Classificazione sismica del territorio regionale.



7 INDAGINI SISMICHE CON METODOLOGIA HVSR

Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni approvate con D.M. 17/01/2018 prevedono la classificazione del sito di progetto in funzione sia della velocità di propagazione nel sottosuolo delle onde di taglio (V_s) che della profondità del substrato rigido. A tale scopo sono state definite n. 5 differenti categorie di sottosuolo (A, B, C, D, E) ad ognuna delle quali è associato uno specifico spettro di risposta elastico.

Siffatto sistema di caratterizzazione geofisica e geotecnica del profilo stratigrafico del sottosuolo è basato sul parametro V_s -eq, ovvero sul valore della velocità di propagazione delle onde di taglio dei terreni di copertura del substrato rigido, mediato in funzione dello spessore degli stessi.

Per ottenere i dati funzionali a classificare i siti di progetto ai fini della risposta sismica ed assegnare le rispettive categorie di suolo, così come definite al par. 3.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, sono state eseguite n. 8 indagini con metodologia HVSR, posizionando le stazioni di acquisizione come indicato in **Fig. 7.1**.



Fig. 7.1 – Ubicazione delle indagini HVSR.

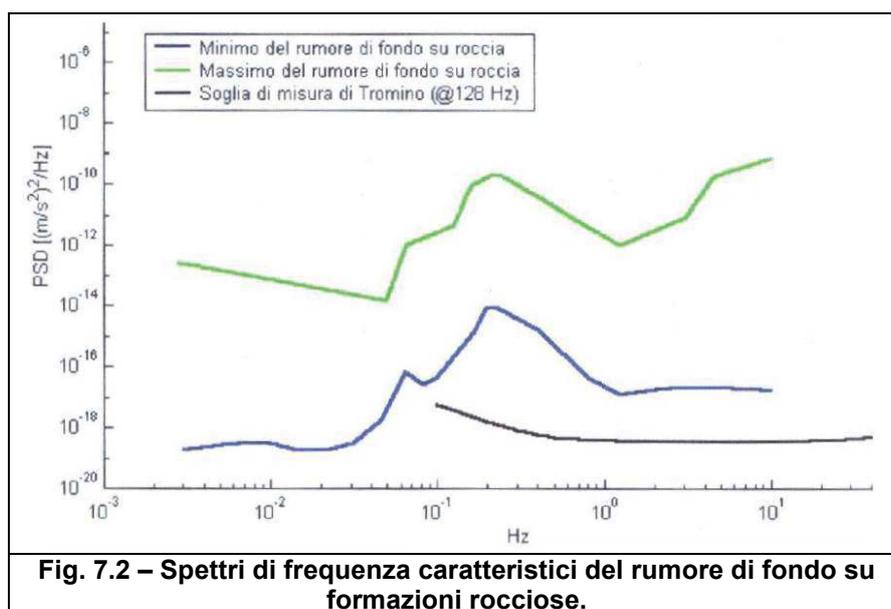
Nei capitoli seguenti verranno descritti i principi di funzionamento del metodo HVSR ed illustrati sinteticamente i risultati delle indagini svolte. Per maggiori dettagli ed approfondimenti si rimanda alla relazione tecnica sulle indagini prodotta in allegato alla presente.

7.1 Descrizione del metodo di indagine

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque e costantemente sulla superficie terrestre, è generato oltre che dall'attività dinamica terrestre anche da fenomeni atmosferici ed attività antropiche.

Tale rumore di fondo viene definito "micro-tremore" poiché si basa su oscillazioni più piccole rispetto a quelle che possono essere indotte da un terremoto. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono "passivi", in quanto il rumore non viene generato con l'ausilio di dispositivi di sollecitazione dinamica del suolo, come avviene nel caso dei metodi di indagine sismica attiva (rifrazione, riflessione, MASW, ReMi, ecc.).

Anche nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale o di vento, è possibile rilevare uno spettro di frequenza che, nel caso di terreno roccioso e pianeggiante, presenta il tracciato del grafico riportato in **Fig. 7.2**.



A tale andamento generale, sempre presente, si somma il rumore proveniente da sorgenti locali di natura antropica (traffico veicolare, industrie, attività di mezzi agricoli, cantieri edili, ecc..) e naturali che però si attenuano a frequenze superiori a 20 Hz a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno dei terreni e delle rocce.

Nei metodi d'indagine passivi, basati sulla rilevazione dei micro-tremori, l'individuazione delle variazioni lito-stratigrafiche nel sottosuolo si fonda sul concetto di contrasto di impedenza. Il singolo strato viene inteso come una unità distinta dalla soprastante e sottostante per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche e la densità nel mezzo.

D'altronde, i micro-tremori sono in parte costituiti da onde di volume P o S e in essi

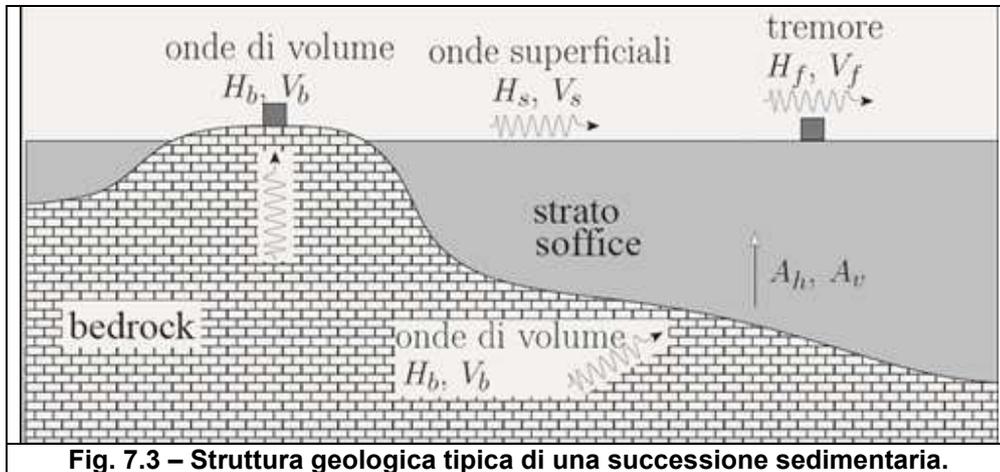
RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S, il che spiega la dipendenza di tutta la formulazione dalla velocità di queste ultime.

Tra i metodi maggiormente consolidati per estrarre informazioni del sottosuolo risulta essere quello dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e verticale (HVSr, ovvero Horizontal to Vertical Spectral Ratio) sviluppato ed applicato in prima istanza da Nogoshi e Igarashi (1970).

In seguito, Nakamura (1989) utilizzò tale tecnica per determinare l'amplificazione sismica locale. La tecnica HVSr (o di Nakamura) è una tecnica sperimentale che consente di valutare alcune caratteristiche di depositi sedimentari (suoli). Il metodo ha dimostrato di essere idoneo per valutare il periodo fondamentale di depositi sedimentari (in modo particolare quando l'impedenza di questi è in grande contrasto con l'impedenza del bedrock). La principale applicazione della tecnica del rapporto spettrale H/V è quindi quella di consentire in modo semplice e veloce l'identificazione della frequenza fondamentale f_0 di diverse zone.

La tecnica HVSr consente quindi di valutare la frequenza fondamentale di risonanza di uno strato soffice a partire dalle sole registrazioni del rumore in superficie. Se si considera la struttura geologica tipica di un deposito sedimentario (v. Fig. 7.3), il tremore registrato in superficie si può considerare come composto da onde superficiali e da onde di volume. Tali onde verranno modificate dall'azione filtrante dello strato soffice. Si possono quindi definire due spettri relativi alle misure del moto superficiale orizzontale (H_f) e verticale (V_f). H_b e V_b sono gli spettri orizzontale e verticale del moto nel "bedrock" e H_s e V_s sono gli spettri del moto orizzontale e verticale delle onde di superficie.



Nakamura ha definito il rapporto QTS come:

$$QTS = \frac{H_f}{V_f} = \frac{A_h * H_b + H_s}{A_v * V_b + V_s} = \frac{H_b}{V_b} \cdot \frac{\left[A_h + \frac{H_s}{H_b} \right]}{\left[A_v + \frac{V_s}{V_b} \right]}$$

Per basse frequenze ($f < (2-3) f_0$) non c'è amplificazione significativa del moto verticale; inoltre, gli spettri H_b e V_b nel bedrock non hanno ancora ricevuto alcuna rilevante

amplificazione. Con l'ulteriore ipotesi di predominanza delle onde provenienti dal bedrock su quelle superficiali si può dimostrare che il QTS è una approssimazione per difetto del fattore di amplificazione orizzontale A_h cercato (v. Fig. 7.4).

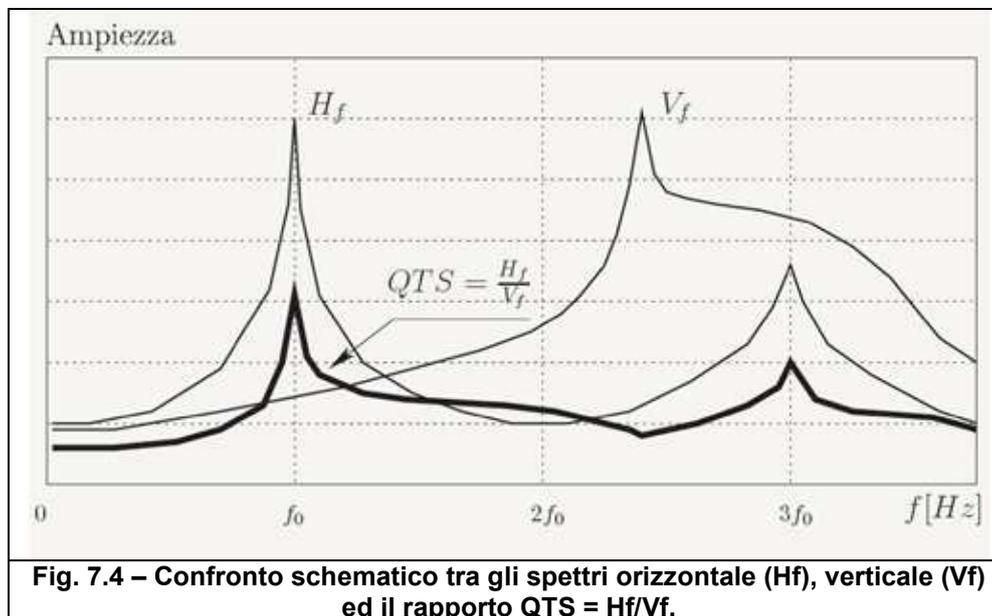


Fig. 7.4 – Confronto schematico tra gli spettri orizzontale (H_f), verticale (V_f) ed il rapporto $QTS = H_f/V_f$.

La tecnica HVSR è rapida e non invasiva e ha il vantaggio di poter essere applicata ovunque, in quanto non necessita di nessuna perforazione, né di stendimenti di cavi.

Per la caratterizzazione sismica di un sito, la tecnica HVSR è verosimilmente quella che ha più aspetti positivi perché misura (non calcola) quello che interessa maggiormente (ovvero le frequenze di risonanza), senza limiti di profondità nell'intervallo di interesse ingegneristico. Nel caso specifico, il parametro viene misurato e non derivato da altre relazioni più o meno complicate con errori che si propagano ad ogni passaggio.

I risultati che si possono ottenere sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per la corretta definizione della risposta sismica locale e per la progettazione strutturale antisismica;
- la velocità media delle onde di taglio nel sottosuolo funzionale a calcolare la $V_{s,eq}$ e a definire la corrispondente categoria di suolo ai sensi del par. 3.2.2 delle vigenti NTC 2018.

7.2 Risultati d'indagine

Le indagini svolte hanno consentito di misurare le frequenze fondamentali di risonanza sito-specifiche e di calcolare il parametro $V_{s,eq}$ (nel caso specifico sempre coincidente con il V_{s30} in quanto il substrato con $V_s > 800$ m/s si trova ribassato a notevolissime profondità nel sottosuolo) con relativa definizione delle Categorie di sottosuolo ai sensi del par. 3.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni.

Rimandando alla relazione tecnica prodotta in **Allegato 1** per qualsiasi approfondimento relativo alla strumentazione utilizzata, alle modalità di esecuzione delle indagini e al metodo di acquisizione e di elaborazione dei dati, si descrivono di seguito i risultati

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

ottenuti nei differenti siti di progetto.

In **tabella 7.1** sono sintetizzati i risultati delle indagini, con indicazione delle torri eoliche di progetto alle quali gli stessi sono riferibili e/o applicabili.

TABELLA 7.1						
Stazione HVSR	Lat. WGS8433T (m)	Long. WGS8433T (m)	Torri eoliche riferibili	Freq. Fondam. Rison. (Hz)	Velocità Equiv. (m/s)	Categoria sottosuolo ex D.M. 17/01/2018
HV1	4607185.55	540853.80	19-20-21-22-23-24-25-26	0,363	374	B
HV2	4605699.07	542187.11	27-28-29	0,349	348	C
HV3	4607200.84	532985.21	2-6-7	0,297	203	C
HV4	4604503.72	532074.16	5-9-10	0,253	266	C
HV5	4611639.50	538625.44	13-14-15-16-17-18	0,427	243	C
HV6	4611827.48	536616.94	12	0,403	331	C
HV7	4610277.61	532168.54	1-3-4-8	0,378	323	C
HV8	4607320.49	535652.46	11	0,322	332	C

I valori di V_{s-eq} ottenuti consentono di classificare tutti i siti indagati, ad eccezione di quello della stazione HV1, in categoria C definita come *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s”*.

Solo in corrispondenza del sito della stazione HV1 è stato invece riscontrato un valore di V_{s-eq} che rientra in categoria B, ovvero *“Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s”*.

I risultati d'analisi hanno fornito valori di V_{s-eq} che presentano variazioni significative correlabili alla diversa composizione litologica dei differenti sistemi e sub-sistemi affioranti.

Le indagini HVSR hanno permesso di definire i picchi H/V riferibili ad effetti stratigrafici relativi alla frequenza fondamentale. In particolare, le misure hanno rilevato frequenze comprese tra 0,25 e 0,43 Hz. La distribuzione dei valori misurati individua un trend abbastanza ben definito, in cui il valore della frequenza relativa al modo fondamentale diminuisce in direzione SE.

8 MODELLAZIONE GEOTECNICA

Il modello geologico locale è stato ricostruito attraverso le attività di rilevamento geologico, l'analisi dei dati pregressi disponibili e i risultati delle indagini geofisiche effettuate in situ.

Le caratteristiche salienti del modello, illustrato graficamente nelle carte e nelle sezioni geologiche allegate alla presente (v. **Tav. G1-G2-G3**), sono date dalla presenza di un complesso di depositi marini e alluvionali terrazzati a prevalente composizione sabbioso-siltoso-argillosa giacenti su di un substrato comune rappresentato dalla potente formazione pleistocenica delle Argille Subappennine, localmente dislocata nel sottosuolo a profondità maggiori di 30 metri rispetto al p.c..

In base al modello geologico locale, i terreni interagenti con le opere di fondazione delle torri eoliche sono ascrivibili alle seguenti unità lito-stratigrafiche:

- Sub-sintema di San Severo → Torri n. 1-3-4
- Sub-sintema di Amendola → Torre n. 8
- Sintema di Motta del Lupo → Torri n. 2-5-6-7-9-10-11-12-23-24-25-26-27-28-29
- Sintema di Masseria Finamondo → Torri n. 13-14-15-16-17-19-20-21-22
- Depositi alluvionali recenti → Torre n. 18

Dal punto di geotecnico, la differenza tra i vari sintemi risiede principalmente nella granulometria dei terreni costituenti i livelli affioranti. Infatti, nel caso dei Sub-sintemi di San Severo e Amendola, costituiti da sedimenti di origine marina, i terreni affioranti sono di natura prevalentemente sabbiosa e sabbioso-limoso, mentre nei Sintemi di Motta del Lupo e di Masseria Finamondo, di ambiente continentale, la parte sommitale è costituita da depositi essenzialmente argillosi.

Sulla base di tali considerazioni, è stata eseguita una modellazione geotecnica basata sull'analisi di un data-set territoriale costituito da risultati di prove di laboratorio eseguite su campioni indisturbati di terreno prelevati in sondaggi geognostici effettuati a supporto della progettazione definitiva ed esecutiva di alcuni parchi eolici già realizzati del Tavoliere foggiano (Ferrante F.S., 2012; Pepe et Al., 2013) e dello studio geologico allegato al PUG del Comune di San Severo (Barbato F., 2018).

Si precisa che la seguente modellazione geotecnica è da intendersi come preliminare, nelle more della caratterizzazione stratigrafica e geotecnica puntuale di tutti i siti di installazione delle torri eoliche, demandata alla fase di progettazione esecutiva.

Il data-set geotecnico utilizzato, composto da un totale di 35 campioni di terreni a varia composizione granulometrica, prelevati a profondità variabili da -2 a -28 metri dal p.c., è stato elaborato adottando i seguenti criteri:

1. individuazione ed esclusione di tutti i campioni di terreno prelevati a profondità ≥ 10 metri rispetto al p.c., ovvero non rappresentativi delle formazioni superficiali direttamente interagenti con le fondazioni delle opere in progetto;
2. suddivisione dei campioni rimasti in base alla composizione granulometrica prevalente in tre differenti categorie, costituite rispettivamente da terreni sabbioso-limosi con o senza ghiaia (assimilabili a quelli dei sub-sintemi di San Severo e Amendola), da terreni principalmente limosi con ridotte percentuali di argilla e sabbia (scartati ai fini delle elaborazioni successive) e da terreni francamente argillosi (assimilabili alla parte affiorante dei sintemi di Motta del Lupo e Masseria Finamondo);

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

3. analisi statistica - secondo le metodologie previste dall'Eurocodice 7 - delle due sub-categorie di specifico interesse, finalizzata alla definizione dei rispettivi parametri geotecnici caratteristici.

Applicando i criteri di selezione descritti ai punti 1. e 2., il data-set da analizzare si riduce da 35 a 14 campioni, di cui 6 ricadenti nel sottogruppo A (terreni sabbioso-limosi) e 8 nel sottogruppo B (terreni argilloso-limosi).

Le principali caratteristiche geotecniche dei campioni selezionati ai fini dell'analisi statistica sono riportate in tabella 8.1 (sub-categoria A) e 8.2 (sub-categoria B).

TABELLA 8.1 (SOTTOGRUPPO A)

Prof.	m	9,5	6	3,5	3,5	4	6,5
Ghiaia	%	1,9	0,4	0	5,9	13,8	1,3
Sabbia	%	26,5	27,7	22	27,1	37,1	25,5
Limo	%	35,7	32,9	44,4	42,9	29,7	57,9
Argilla	%	35,9	39,1	33,6	24	19,4	15,3
γ	kN/mc	20,7	20,7	19,8	19,77	18,89	19,3
ϕ'	(°)	15,7	21,1	22,6	27	27,4	28
c'	kPa	37	51	0	15	19	13

TABELLA 8.2 (SOTTOGRUPPO B)

Prof.	m	4	7	3	5,5	5,5	4	2,5	3,5
Ghiaia	%	0	0,1	0,1	0,3	0	0	0	0,6
Sabbia	%	6,6	5,7	5,9	7,3	4,1	5,7	13,6	5,7
Limo	%	28,8	36,8	30,3	32,6	19,1	30,4	42	46,1
Argilla	%	64,6	57,5	63,7	59,9	76,8	63,9	44,4	47,6
LL	%	77,2	65,9	80,2	76,3	90,8	75,8	60,1	59,1
IP	%	50,9	42,0	53,3	49,5	60,6	47,4	37,9	38,7
γ	kN/mc	19,5	19,6	18,9	18,9	17,1	19,3	19,9	20,2
ϕ'	(°)	14,8	19,0	12,5	19	12,9	21	14,9	12,4
c'	kPa	46	33	13	16	14	36	41	52

Per definire i valori geotecnici caratteristici, si è fatto riferimento alle indicazioni fornite dall'Eurocodice 7, secondo cui tali valori devono essere definiti in modo che la probabilità calcolata di un valore peggiore (più sfavorevole), che governa l'insorgere dello stato limite considerato, non sia maggiore del 5%. Si tratta pertanto di un margine conservativo del 5% (che coincide con il 5° percentile della distribuzione statistica adottata), il quale garantisce probabilisticamente di avere un 95% dei casi per i quali il valore caratteristico è cautelativo. Tuttavia, l'Eurocodice 7 specifica anche che l'ampiezza della zona del terreno che governa il comportamento del sistema geotecnico nello stato limite considerato è uno dei fattori che incidono sulla scelta del valore caratteristico.

In particolare, come illustrato e analizzato nella trattazione di Nori L. (2009), all'interno di uno strato omogeneo e dello spessore di influenza dello stato limite considerato, valgono le seguenti regole:

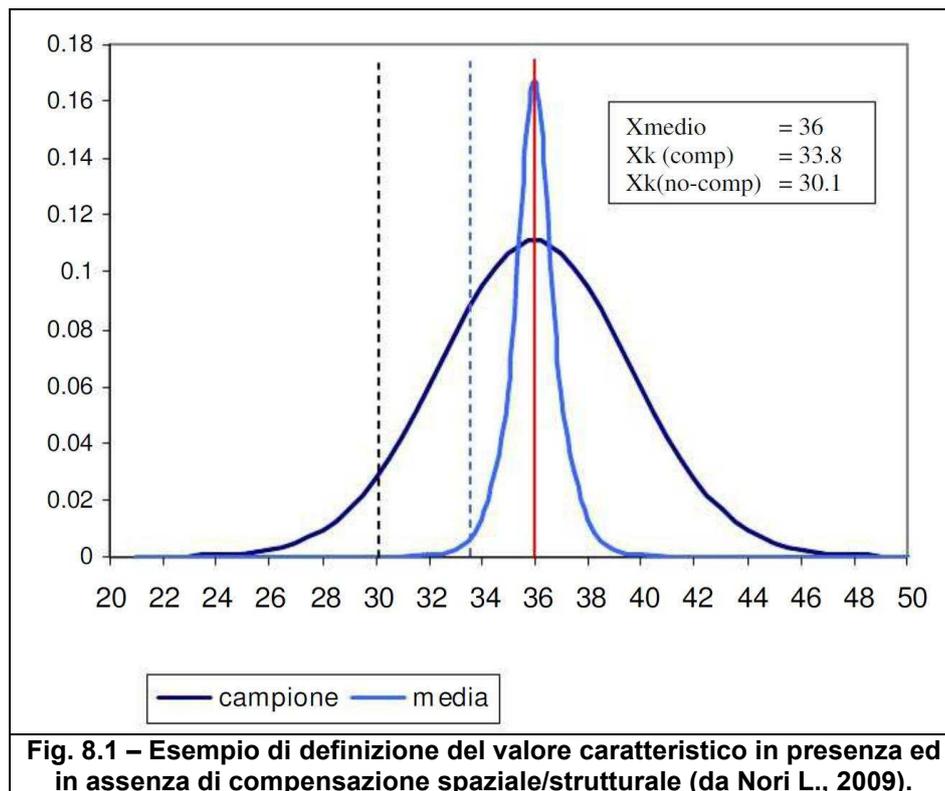
- A. se esiste compensazione spaziale (volume interessato dallo stato limite significativamente maggiore della lunghezza delle fluttuazioni nei parametri di resistenza del terreno), allora il valore caratteristico corrisponde al 5° percentile della

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

media ed è generalmente non molto distante dalla media stessa;

- B. se esiste compensazione strutturale (fondazioni sufficientemente rigide tali da distribuire le sollecitazioni omogeneamente sul terreno), allora il valore caratteristico è lo stesso del precedente caso A;
- C. se non esiste compensazione, né spaziale né strutturale, allora il valore caratteristico è il 5° percentile della distribuzione statistica del campione, ed è generalmente piuttosto distante dalla media.

Le differenze tra i vari casi sono illustrate in **Fig. 8.1** (da Nori L., 2009).



Nel caso specifico, le fondazioni delle torri eoliche hanno struttura e dimensioni planimetriche tali da poter rientrare nel caso di cui al punto B. Siamo quindi in presenza di condizioni di compensazione strutturale che consentirebbero di selezionare un 5° percentile della distribuzione della media. Tuttavia, data la ridotta numerosità dei dati ricompresi nei due sottogruppi analizzati, si ritiene opportuno e cautelativo applicare la seguente equazione, che utilizza la distribuzione normale standardizzata al posto di quella del valor medio:

$$x_k = \bar{x} \pm z_{0.05} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \approx \bar{x} \pm 1.645 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

dove:

- x_k è il valore caratteristico desiderato
- \bar{x} il valore medio (ignoto) della popolazione, ipotizzato essere uguale al valore medio

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

del campione

- $Z_{0.05}$ è il quinto percentile della distribuzione normale standardizzata
- s è la deviazione standard del campione
- n il numero di dati.

Adottando la metodologia d'analisi precedentemente descritta, si è proceduto quindi all'elaborazione statistica dei due data-set campionari di **tabella 8.1 e 8.2**, con l'obiettivo di definire i valori caratteristici dei parametri peso di volume (γ), angolo d'attrito (φ') e coesione (c'), da utilizzare per le verifiche agli stati limite di progetto.

I risultati dell'elaborazione statistica condotta sono sintetizzati in **tabella 8.3** (sottogruppo A) e in **tabella 8.4** (sottogruppo B).

TABELLA 8.3 (SOTTOGRUPPO A)							
	N. Val.	Val. Min.	Val. Max	Media	Dev. St.	CV	Val. Car.
γ (kN/mc)	6	18,89	20,7	19,86	0,73	0,04	19,37
φ' (°)	6	15,7	28	23,63	4,80	0,20	20,41
c' (kPa)	6	0	51	22,50	18,37	0,82	10,16

TABELLA 8.4 (SOTTOGRUPPO B)							
	N. Val.	Val. Min.	Val. Max	Media	Dev. St.	CV	Val. Car.
γ (kN/mc)	8	17,1	20,2	19,18	0,95	0,05	18,62
φ' (°)	8	12,4	21	15,81	3,38	0,21	13,84
c' (kPa)	8	13	52	31,38	15,27	0,49	22,49

Sulla scorta dell'analisi condotta sul data-set disponibile sono stati quindi determinati i valori caratteristici che possono essere assegnati alle due differenti tipologie di terreni di fondazione nell'ambito delle verifiche di sicurezza agli stati limite.

In particolare, **per le torri eoliche n. 1-3-4-8** si possono utilizzare i seguenti valori:

$$\gamma_k = 19,4 \text{ kN/mc} \quad \varphi'_k = 20^\circ \quad c'_k = 10 \text{ kPa}$$

Per tutte le rimanenti torri eoliche dovranno invece essere adottati i seguenti valori:

$$\gamma_k = 18,6 \text{ kN/mc} \quad \varphi'_k = 14^\circ \quad c'_k = 22 \text{ kPa}$$

Tuttavia, si ribadisce che i valori di cui sopra, pur definiti con approccio adeguatamente cautelativo, dovranno essere necessariamente validati e/o ridefiniti in sede di progettazione esecutiva, mediante esecuzione di specifiche indagini geognostiche funzionali a una più dettagliata caratterizzazione stratigrafica e geotecnica di ogni singolo sito di installazione degli aerogeneratori.

Cavallino, novembre 2019

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Giuseppe CALO'

(Albo Geologi Regione Puglia n. 148)

9 FONTI DOCUMENTALI E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale – *Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (D.C.I. n. 39 del 30/11/2005)*. <http://www.adb.puglia.it>.
- Barbato F. – *Relazione geologica, indagini e cartografie a supporto del P.U.G. del Comune di San Severo*. Comm. A.C. di San Severo, 2018.
- Castellaro S. & Mulargia F. - *Stime di Vs30 a stazione singola tramite misure H/V vincolate*. Atti del 26° Convegno Nazionale GNGTS, Roma, 13-15 novembre 2007.
- Castellaro S., Mulargia F., Bianconi L. - *Passive seismic stratigraphy: a new efficient, fast and economic technique*. Journal of Geotechnical and Environmental Geology, n. 3, 2005.
- Cotecchia V. - *Le acque sotterranee e l'intrusione marina in Puglia: dalla ricerca all'emergenza nella salvaguardia della risorsa*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, Vol. 92, ISPRA, Roma, 2014.
- Del Gaudio V. – *Elementi per la stima della pericolosità sismica in Puglia*. Geologi e Territorio n. 2/2007.
- Del Gaudio V., Pierri P., Frepoli A., Calcagnile G., Venisti N., Cimini G.B. - *A critical revision of the seismicity of Northern Apulia (Adriatic microplate - Southern Italy) and implications for the identification of seismogenic structures*. Tectonophysics, n. 436, Elsevier, 2007.
- Ferrante F.S. – *Relazione Geologica e Modellazione Geomeccanica a supporto del progetto definitivo di un impianto eolico in loc. Macchia Rotonda, nel territorio amministrativo del Comune di Manfredonia*. Proponente: EOLSIPONTO S.r.l., 2012.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – *Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale*. All. 1b O.P.C.M. n. 3519 del 28/04/2006.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015*. <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – *Database Macrosismico Italiano 2015*. <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>.
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – *Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio n. 396 (San Severo)*. ISPRA, Roma, 2011.
- Maggiore M., Masciale R., Massari R., Pappagallo G., Passarella G., Vurro M. - *Caratteri idro-strutturali del Tavoliere di Puglia ed elaborazione di una carta geolitologica a finalità idrogeologiche*. Geologi e Territorio n. 2/2004.
- Masciale R., Barca E., Passarella G. - *A methodology for rapid assessment of the environmental status of the shallow aquifer of "Tavoliere di Puglia"(Southern Italy)*. Environmental Monitoring and Assessment n. 177, 2011.
- Masciale R. - *Caratteri idrogeologici del Tavoliere di Puglia e stato ambientale della falda superficiale nell'area compresa tra il F. Fortore e il T. Cervaro*. Geologi e Territorio n. 4/2005.
- Ministero delle Infrastrutture – *Norme tecniche per le costruzioni*. Allegato al D.M. 17 gennaio 2018, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20/02/2018, Supplemento Ordinario n. 8.

RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA E IDROGEOLOGICA

- Moretti M., Gallicchio S., Spalluto L., Ciaranfi N., Pieri P. - *Evoluzione geologica del settore settentrionale del Tavoliere di Puglia (Italia meridionale) nel Pleistocene medio e superiore*. Italian Journal of Quaternary Sciences, n. 23, 2010.
- Nakamura Y. - *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Sub-surface Using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, vol. 30, 1989.
- Nogoshi M. & Igarashi T. - *On the propagation characteristics of micro-tremor*. Journal of the Seismological Society of Japan, n. 23, 1970.
- Nori L. - *Introduzione operativa al concetto dei valori caratteristici secondo l'Eurocodice7 (norma europea prEN1997-1)*. <http://nuke.mccooy.it/> (2009).
- Patacca E. & Scandone P. - *Rapporto sugli studi per l'identificazione e valutazione di strutture sismogenetiche*. Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, 2001.
- Pennetta L. - *Analisi fisica integrata del territorio della provincia di Foggia*. Provincia di Foggia, Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, 2018.
- Pepe P., Paccapelo F., Giotta S. - *Relazione geologica e sulle indagini per il progetto esecutivo di un impianto eolico della potenza di 17,5 MW nel territorio di Manfredonia, in loc. Macchia Rotonda*. Comm. EOLSIPONTO S.r.l., 2013.
- Regione Puglia - *Piano di Tutela delle Acque della Regione Puglia (Deliberazione G.R. n. 883 del 19/06/2007)*. SOGESID S.p.a., 2005.
- Ricchetti G., Ciaranfi N., Luperto Sinni E., Mongelli F., Pieri P. - *Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'Avampaese Apulo*. Memorie Società Geologica Italiana n. 41, 1988.

10 ALLEGATO 1

RELAZIONE TECNICA SULLE INDAGINI SISMICHE CON METODOLOGIA HVSR



PROVINCIA DI FOGGIA COMUNE DI SAN SEVERO

COMMITTENTE:

Spett.le
Geoambiente s.r.l.
via B. D'Aragona, 5
73020 - Cavallino (LE)
P.I. 03170290757

INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE MISURE HVSR
A SUD-EST DEL CENTRO ABITATO DI SAN SEVERO
(FG)



Relazione Tecnica indagini geofisiche

**Acquisizione, Processing,
Interpretazione eseguite
da:**

Dott. Geol. Pierpaolo Moretti
Phd in Geofisica Applicata

Dott. Davide de Palma
Dottore in Scienze Geofisiche

1. INTRODUZIONE E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati della campagna di indagine geofisica eseguita in data 11/11/2019 mediante l'esecuzione n°8 misure HVSR per il progetto di **“realizzazione di un parco eolico nel territorio di San Severo”**.

La metodologia HVSR è stata utilizzata, sotto specifica richiesta della committenza.

Lo studio, come da piano di indagine, ha seguito il seguente sviluppo:

- n°8 prospezioni *Horizontal Vertical Spectral Ratio (HVSR)*
- elaborazione dei dati raccolti.

Risultati attesi dalla prospezione HVSR

Lo scopo dell'indagine, oltre alla stima del parametro V_{seq} (*VS equivalente*) caratteristico dell'area, ovvero la velocità equivalente delle onde sismiche di taglio rispetto alla quota di imposta della fondazione, così come previsto da:

- **D. Min. Infrastrutture 17/01/2018**
- **Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 02/02/2009, n. 617 C.S.LL.PP.**
(Suppl.Ord. alla G.U. 26.2.2009, n. 47 – *Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008*)

è quello di stimare la frequenza fondamentale (o di risonanza) del sito dovuta ad effetti stratigrafici.

2. UBICAZIONE INDAGINI

In accordo con la committenza le indagini sono state ubicate in maniera tale da ricoprire un'area piuttosto ampia a SE dell'abitato di San Severo e come riportato in fig.1

Le coordinate fanno capo al sistema geografico *UTM* e sono riportati nella seguente tabella.

	E (m)	N (m)
HV1	540853.80	4607185.55
HV2	542187.11	4605699.07
HV3	532985.21	4607200.84
HV4	532074.16	4604503.72
HV5	538625.44	4611639.50
HV6	536616.94	4611827.48
HV7	532168.54	4610277.61
HV8	535652.46	4607320.49

Tab. I – Coordinate degli estremi delle misure HVSR. Sistema di riferimento UTM - datum WGS84 - fuso 33T



Fig. 1 - ubicazione indagini HVSR (©Google Earth)

DESCRIZIONE DEL METODO HVSR

Dai primi studi di *Kanai (1957)* in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito.

Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V*), proposta da *Nogoshi e Igarashi (1970)*.

La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

Inoltre, attraverso alcune metodologie (*FK, SPAC*) con l'impiego di opportuni algoritmi (es. *Neighbourhood algorithm - Sambridge 1999*), è possibile ottenere l'inversione delle curve dei rapporti H/V finalizzata alla determinazione dei profili di velocità delle onde S nel sottosuolo e quindi delle V_{Seq} richiesta dalle NTC.

Le basi teoriche dell'H/V sono relativamente semplici in un mezzo del tipo strato + *bedrock* (o strato assimilabile al *bedrock*) in cui i parametri sono costanti in ciascuno strato (1-D). Consideriamo un sistema semplice in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ($r1$ e $r2$) e le diverse velocità delle onde sismiche ($V1$ e $V2$). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'interfaccia che separa i due strati. Così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (l) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato. La frequenza fondamentale di risonanza (fr) dello strato 1 relativa alle onde S (o P) è pari a:

$$fr = Vs1/4H \quad [1]$$

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume P o S , e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di *Rayleigh*. Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume, poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di *Rayleigh* è molto prossima a quella delle onde S .

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva *H/V* relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1].

L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto *H/V*, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- a) il contenuto in frequenza,
- b) la risposta strumentale
- c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La situazione, nel caso di un suolo reale, è spesso più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al di sopra del *bedrock* si applica molto raramente. Poi, la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana.

L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti *H/V* misurati con quelli 'sintetici', L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini. Ciò avviene attraverso la stima di un parametro scostamento (*Misfit - M*), che, varia solitamente tra 0 e 1 ove 0 rappresenta la perfetta corrispondenza del valore sperimentale con quello sintetico e 1 rappresenta uno scostamento notevole. Nei casi più complessi per calcolare la *dispersion - curve* si creano una serie di modelli teorici (costituiti combinazioni di una successione di strati con spessore H , Vs , Vp e densità γ variabili) da confrontare con quello sperimentale, fino a considerare per buono il modello teorico più vicino alle curve sperimentali.

4. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Tutte le misure di microtremore ambientale sono state effettuate con n°1 tromografo digitale **SR04 - Digitizer 3 canali 24 bit** (© Sa.Ra) (Geobox1425) da 4.5 Hz dotato di 3 sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S , E-W e verticalmente, con banda utile 0.2-100 Hz, progettato specificatamente per l'acquisizione di rumore sismico. Lo strumento (Geobox1425) è alimentato da una batteria interna e possiede GPS integrato. In fase di acquisizione viene collegato a Notebook dotato di opportuno software di acquisizione.

L'SR04 (Fig. 2) è uno strumento ad alte prestazioni in grado di digitalizzare il segnale vibrazionale e fornire un flusso continuo di dati campionati a velocità selezionabili.



Questo strumento è caratterizzato da un'elevata risoluzione ed elevato rapporto *Signal/Noise* per frequenze inferiori a 10Hz; esso è basato sul convertitore sismico *SADC20* progettato specificamente per raggiungere le elevate prestazioni in abbinamento a sensori elettrodinamici (geofoni).

Fig. 2– Geobox SR04 (© Sa.Ra)

Alimentazione:	10-16Vdc
Consumo di energia	< 1 W
Numero canali:	3, 24 bit (SD) (A richiesta 3+3 canali HR e altri 8 LR)
Range dinamico	124dB @ 100SPS
Campionamento	simultaneo sui tre canali
Sampling rates	10,20,25,50,100,200, 300,400,480,600
Impedenza d'ingresso	> 100Kohm per sensori passivi, 8.2Kohm per sensori attivi
Fondo scala	2Vpp per sensori passivi, 4 Vpp per sensori attivi
Real Time Clock	+/-10ppm (-20/+50°C)
Sincron. Real Time Clock	da GPS via PPS modulato
Precisione rispetto a UTC:	<50ms
Antenna GPS	amplificata con 10mt di cavo e connettore BNC
Interfaccia dati sismici	RS232 (Ethernet opzionale), cavo USB in dotazione
Formato dati	protocollo binario SADC20HS
Velocità di comunicazione	115200 baud
Interfaccia dati GPS	RS232; NMEA; 4800 baud, n,8,1
Connett. sensor	MIL-C 10 o MIL-C 18 (per sensori broad-band)
Contenitore	Alluminio pressofuso IP66 (su richiesta fino a IP68)
Temperatura	-20/+50°C (funzionale)
Dimensioni	nale) Dimensioni: 205x170x45 mm
Conformità	CE

Tab. II - specifiche tecniche Geobox SR04.

5. ACQUISIZIONE HVSR

Le acquisizioni relative al rumore ambientale sono state condotte utilizzando una frequenza di campionamento pari a 300 Hz per una durata di registrazione pari a 1200 s.

	durata (s)	f campionamento (Hz)
HV1	1200	300
HV2	1200	300
HV3	1200	300
HV4	1200	300
HV5	1200	300
HV6	1200	300
HV7	1200	300
HV8	1200	300

Tab. III - parametri di acquisizione

Per ogni sito sono state eseguite n°2 misurazioni per verificare la stabilità dei picchi rilevati. Tra le due misurazioni, è stata utilizzata per il processo di elaborazione, quella che ha presentato una maggiore qualità del dato.

6. ELABORAZIONE

In linea generale il processing effettuato sulle singole misure è composto da un *tapering*, che consiste nell'applicazione di un filtro che "addolcisce" gli estremi del sismogramma misurato per evitare la creazione di artefatti nello spettro di Fourier; successivamente si divide il sismogramma in finestre di lunghezza uniforme; per ogni finestra si determina il rapporto degli spettri di Fourier della risultante delle componenti orizzontali (H) e verticali (V); prima della determinazione del rapporto H/V si applica, in ogni finestra, lo *smoothing di Konno-Ohmachi* ed in certi casi un filtro passa-alto. Si può anche procedere con una rimozione manuale delle finestre contaminate da transienti. Infine si fa un'operazione di media sulle curve H/V di ogni finestra, per determinare la curva di H/V finale. La parte di *processing* sulle curve è stata svolta con il software *Geoexplorer* (©Sa.Ra) che estrae il profilo V_s mediante una modellazione diretta. Per l'elaborazione delle degli spettri H/V non è stato utilizzato alcun dato di taratura in quanto non disponibile

L'elaborazione dei dati è stata condotta mediante i seguenti parametri.

durata totale analizzata	1200 s
durata finestre	20-30 s
n° finestre	20-32
overlap	5%
smoothing type	Konno % Omhachi
smoothing costant	40
Intervallo di frequenza	0.15 Hz – 60 Hz

Tab. IV - parametri elaborazione HVSR

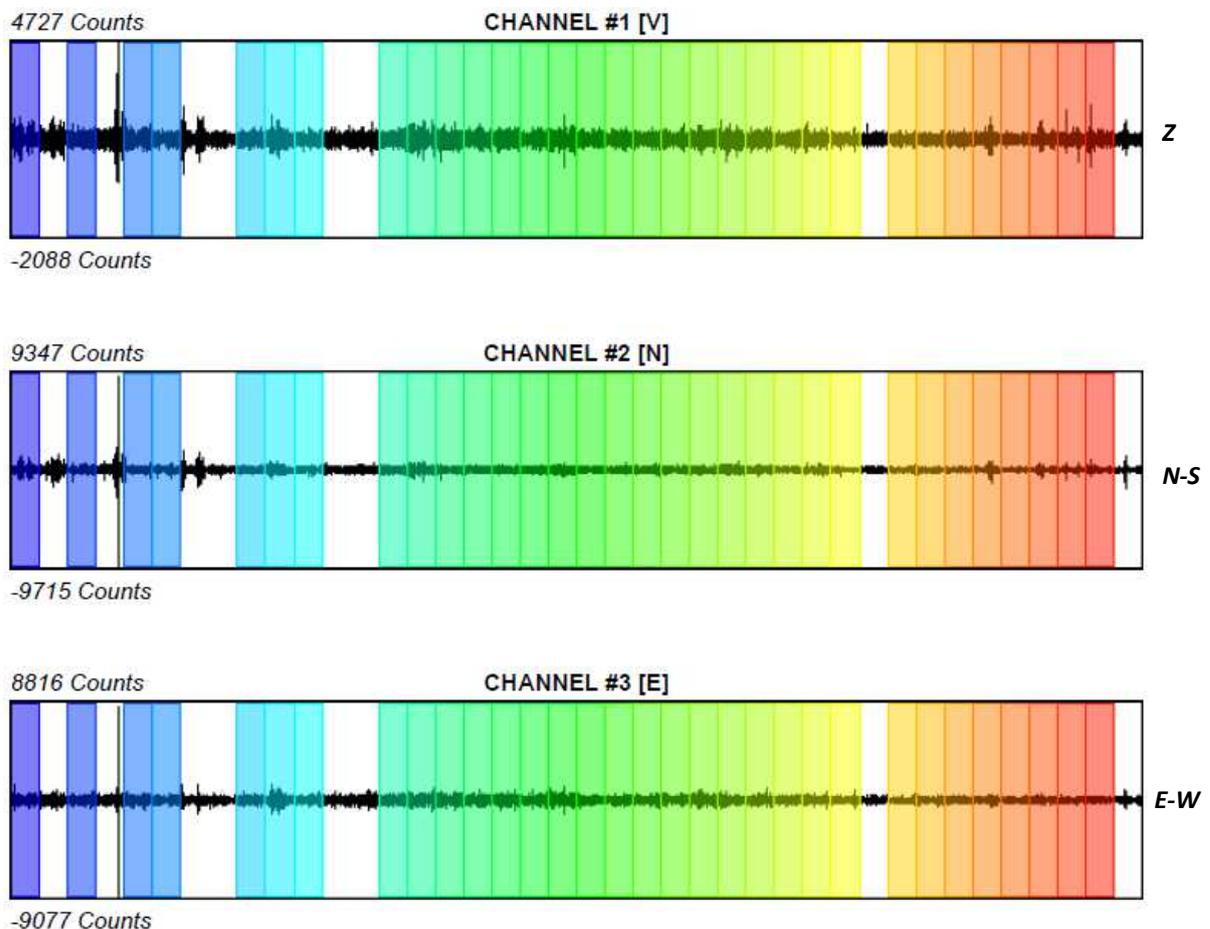
7. RISULTATI HVSR

7.1 HV1

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig.4) a 0.363 Hz con H/V pari a 5.8 ed ulteriori 3 picchi con H/V compreso tra 1÷2, rispettivamente a 2.503 Hz, 5.825 Hz ed a 35.573 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 5).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 16:55:00
Recording end time: 2019/11/11 17:05:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 32
Average windows length: 30 s

Fig. 3 - HVSR01: Segnali e windowing

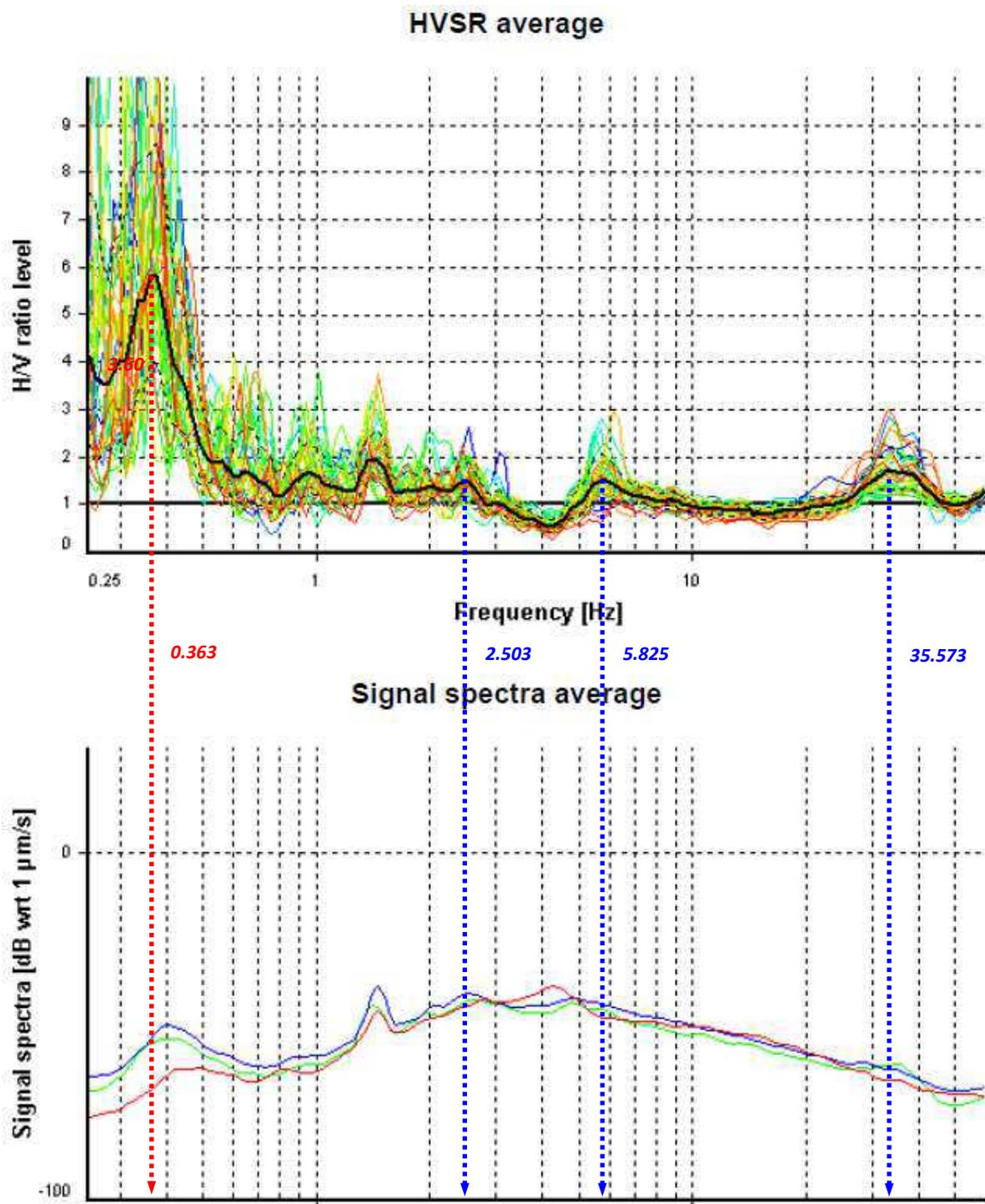


Fig. 4 - HVSR01: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

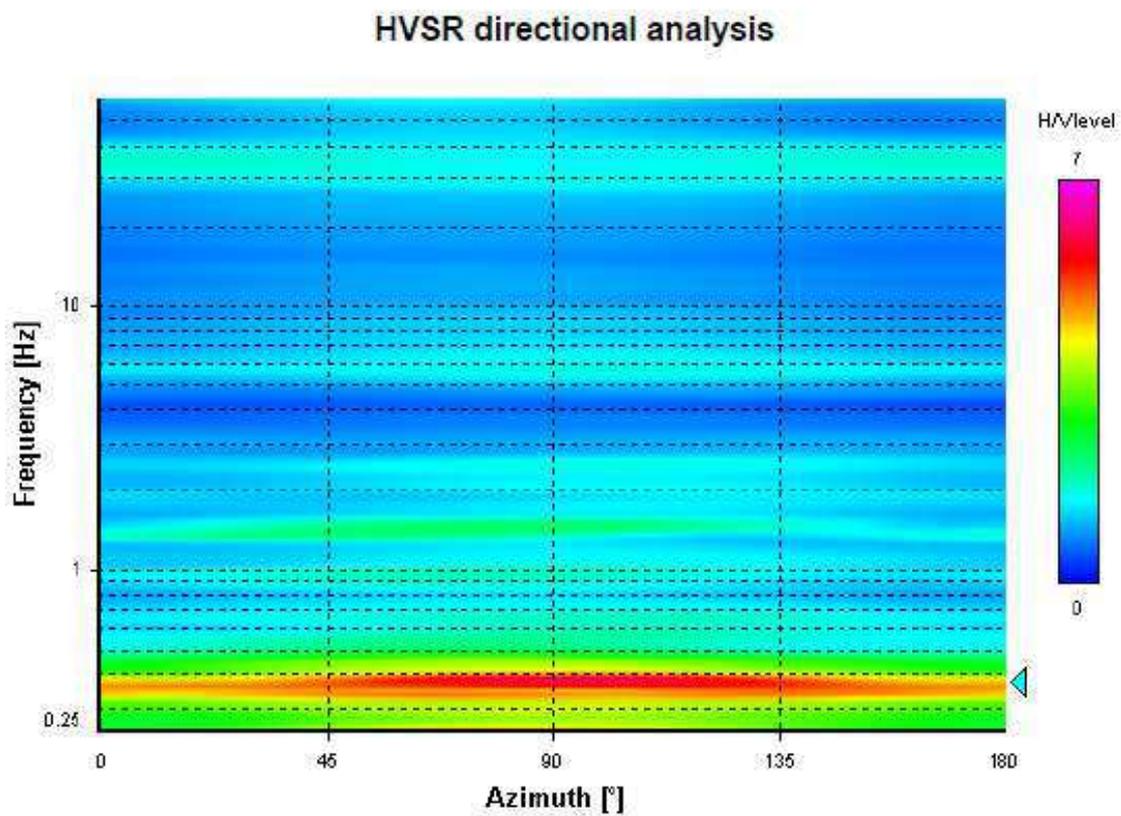
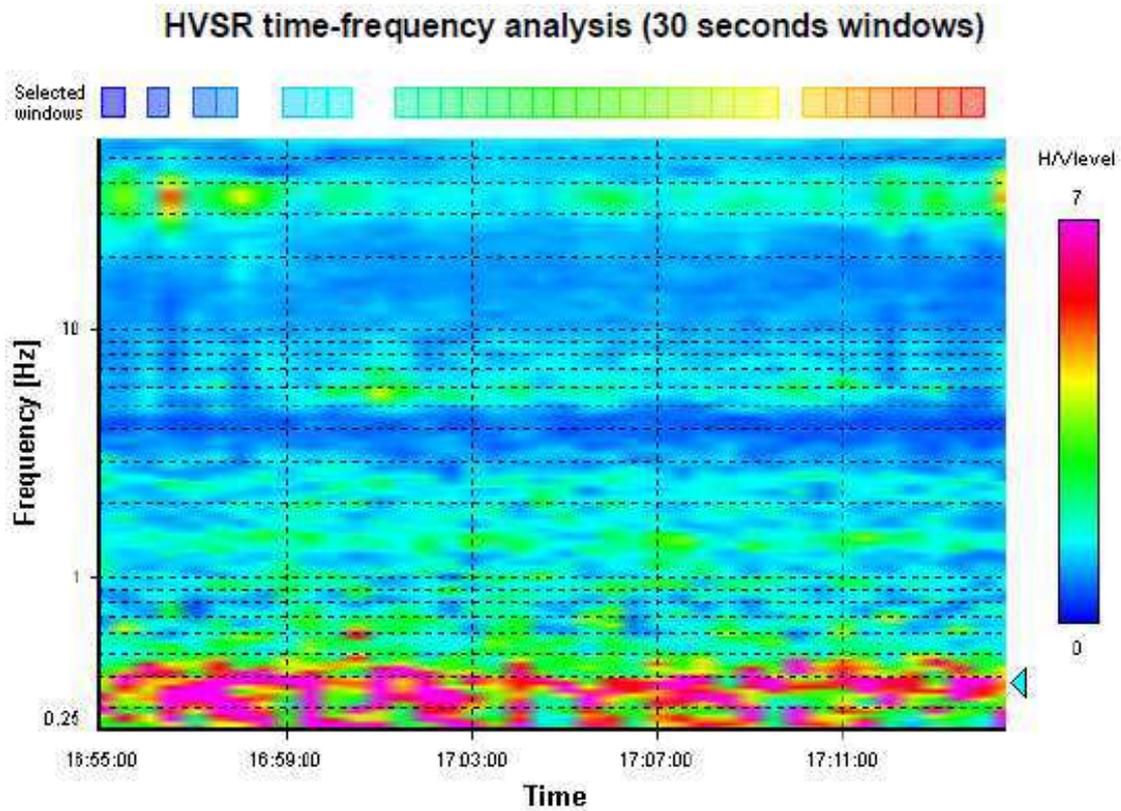


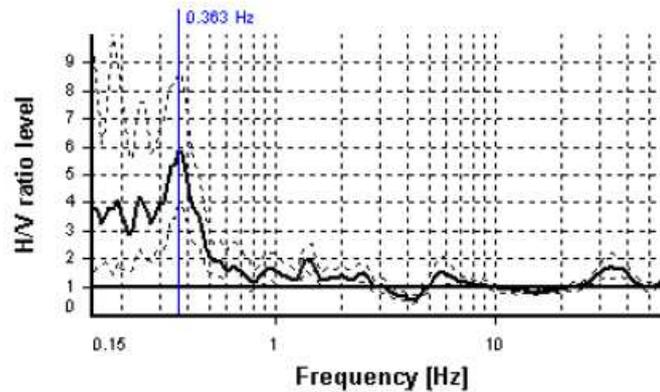
Fig. 5 - HVSR01: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.363 Hz

A_0 amplitude = 5.843

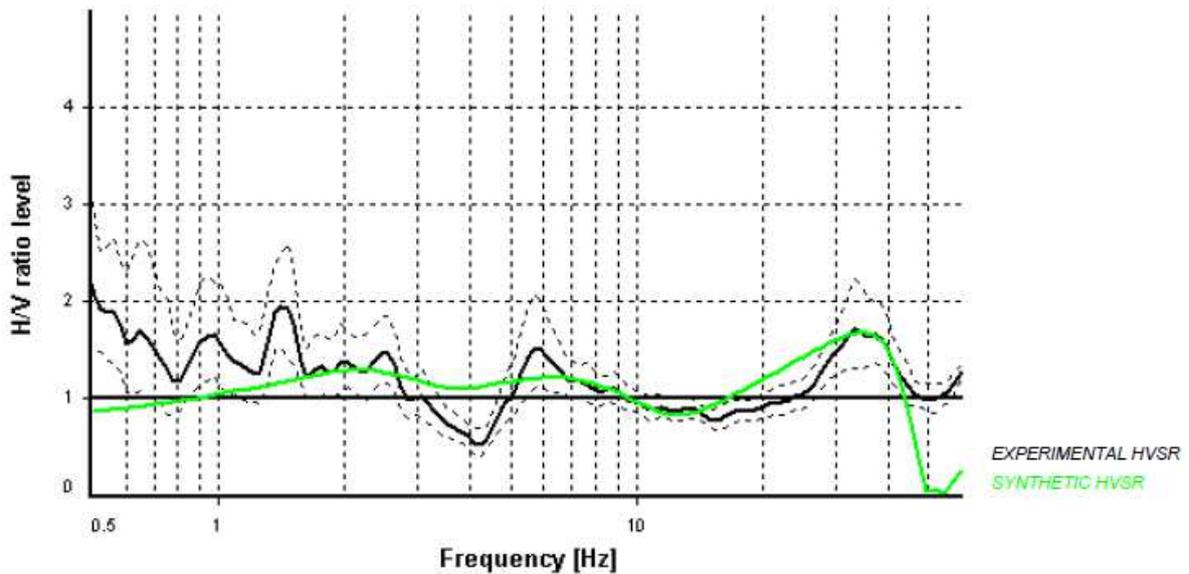
Average $f_0 = 0.328 \pm 0.057$



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	32 valid windows (length > 27.52 s) out of 32	OK
$n_c(f_0) > 200$	348.79 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f \text{ in } [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.21541 Hz	OK
$\exists f^+ \text{ in } [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	0.48143 Hz	OK
$A_0 > 2$	5.84 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.05655 < 0.07266	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.47417 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Fig. 6 – Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.9	0.9	115
8	8.9	285
5	13.9	470
4.5	18.4	475
-	>18.4	480

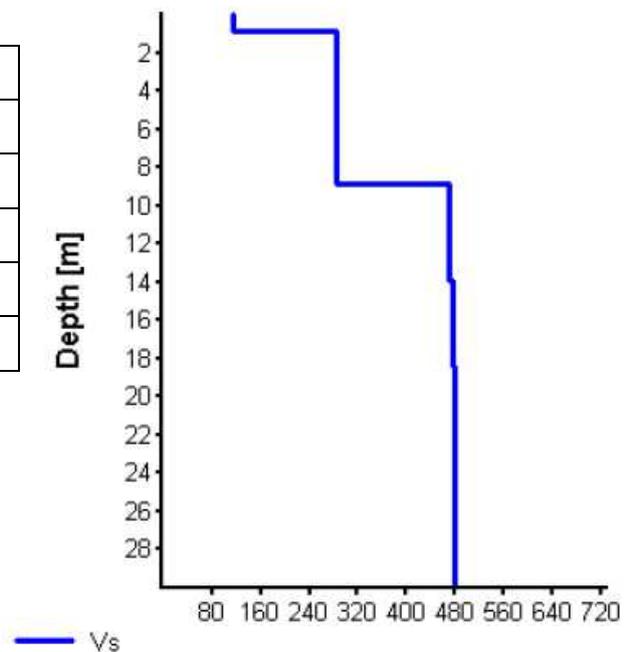


Fig. 7 - HVSR01: modellazione sintetica HVSR

La problematica inerente la classificazione del terreno da un punto di vista sismico è stata oggetto di numerose ordinanze e normative (OPCM 3274; DM 14/09/2005); in ultimo, il Decreto del Ministero per le Infrastrutture del 17 gennaio 2018.

Nel suddetto Decreto al par. 3.2.2. “*Categorie di Sottosuolo e Condizioni Topografiche*”, facente parte del più ampio capitolo riguardante l’Azione Sismica, si riporta che “... per la definizione dell’azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull’individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento”.

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel “volume significativo”, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente V_{Seq} di propagazione delle onde di taglio. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse. Tali categorie sono riepilogate nella tabella di seguito riportata.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l’utilizzo dell’approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. V - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, V_{Seq} (m/s), definita dall’espressione:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i - spessore dell’i-esimo strato;

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

N - numero di strati;

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

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV1.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 374 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

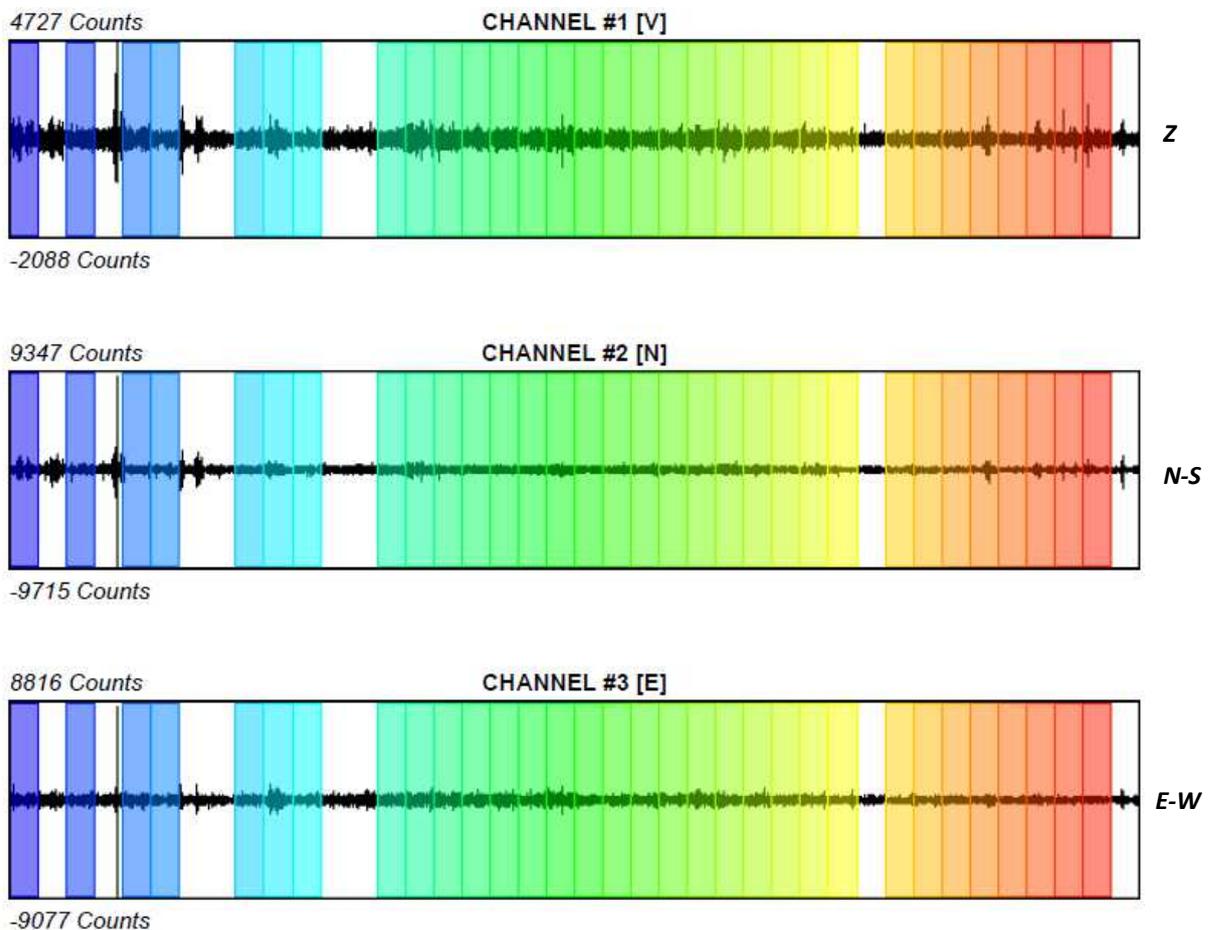
*il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla **CATEGORIA "B"**.*

7.2 HV2

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig.9) a 0.349 Hz con H/V pari a 5.4 ed ulteriori 3 picchi con H/V compreso tra 1÷2, rispettivamente a 2.297 Hz, 7.122 Hz ed a 37.033 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti, blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig.10).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 16:09:00
Recording end time: 2019/11/11 16:29:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 30
Average windows length: 30 s

Fig. 8 - HVSR02: Segnali e windowing

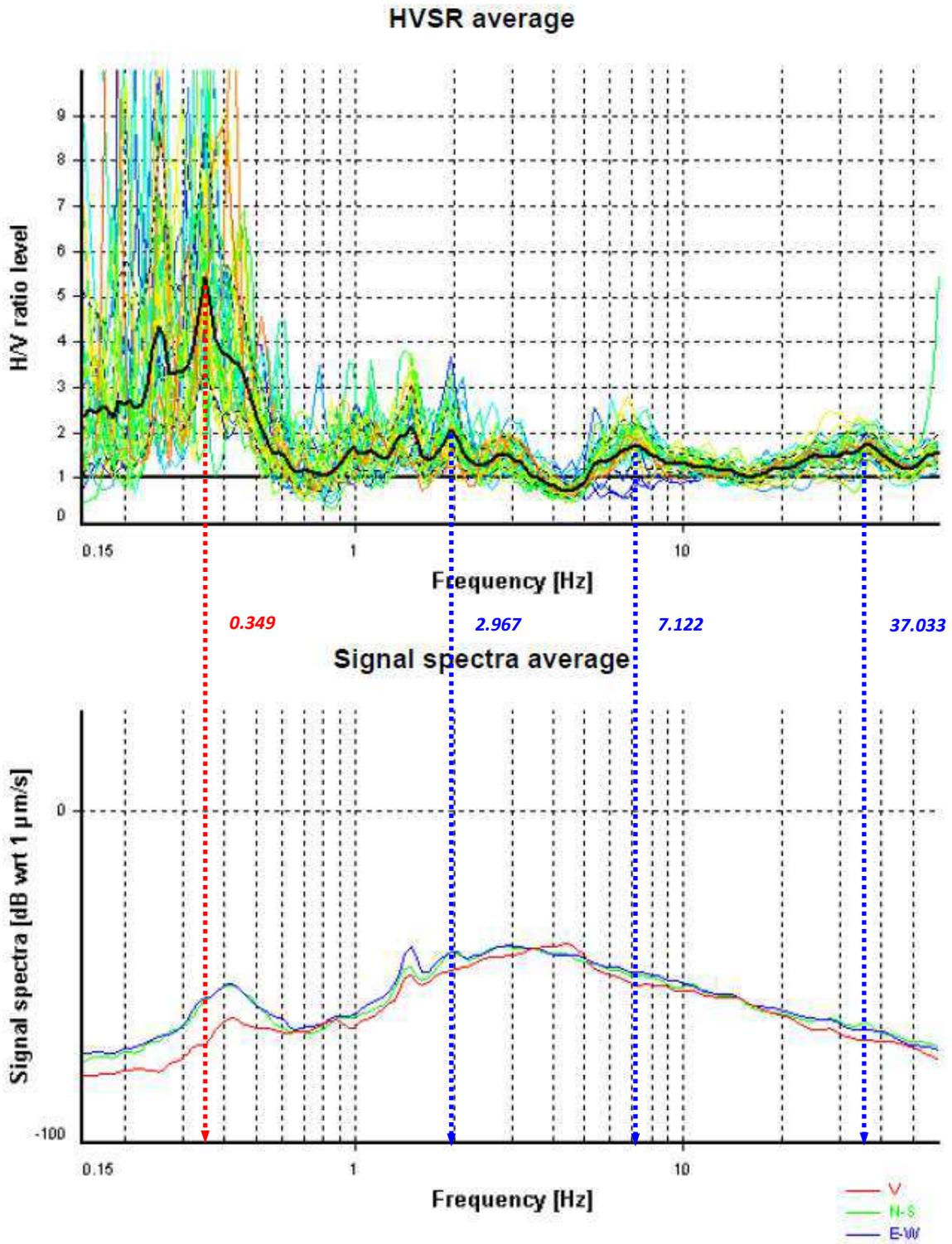
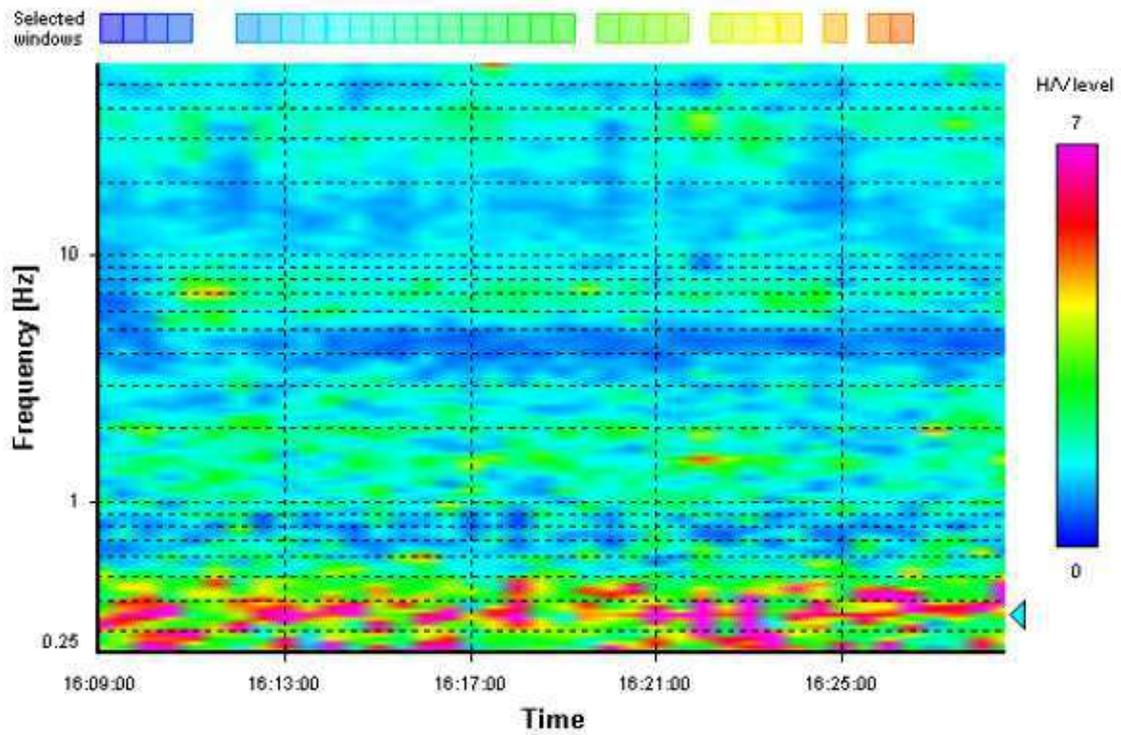


Fig. 9 - HVSR02: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



HVSR directional analysis

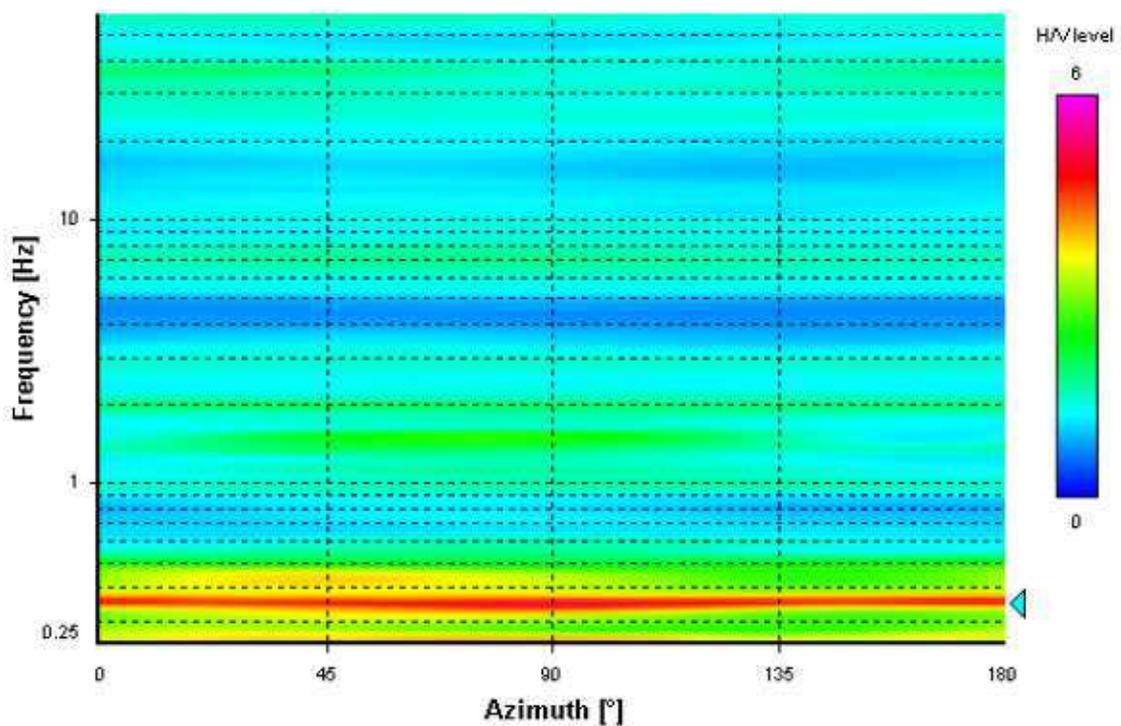


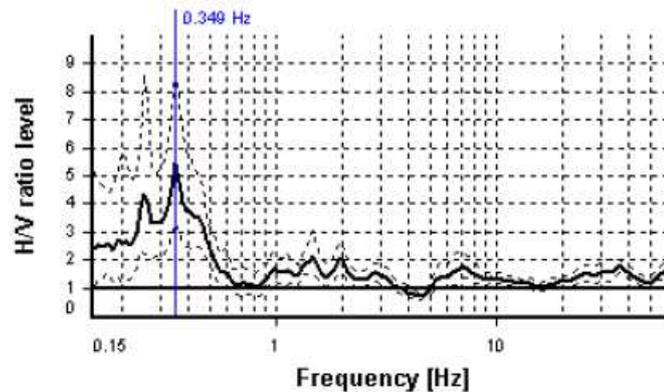
Fig. 10 - HVSR02: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.349 Hz

A_0 amplitude = 5.427

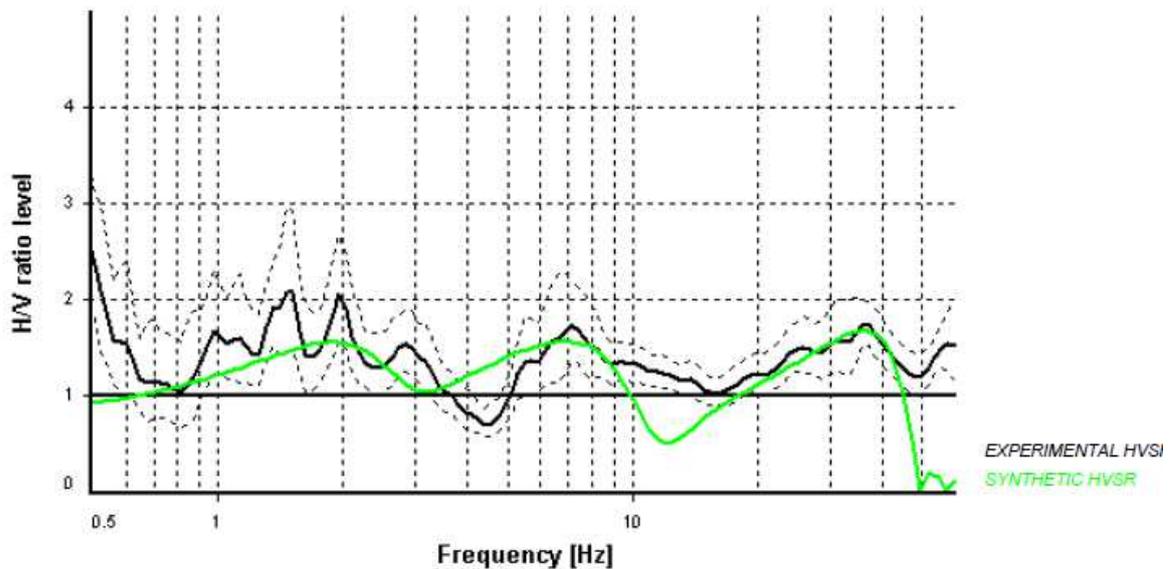
Average $f_0 = 0.328 \pm 0.062$



HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	30 valid windows (length > 28.65 s) out of 30	OK
$n_c(f_0) > 200$	314.1 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.22425 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	0.50118 Hz	OK
$A_0 > 2$	5.43 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.06244 < 0.0698	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.62407 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Fig. 11 – Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.7	0.7	92
6.8	7.5	230
2	9.5	380
17	26.5	475
-	>26.5	435

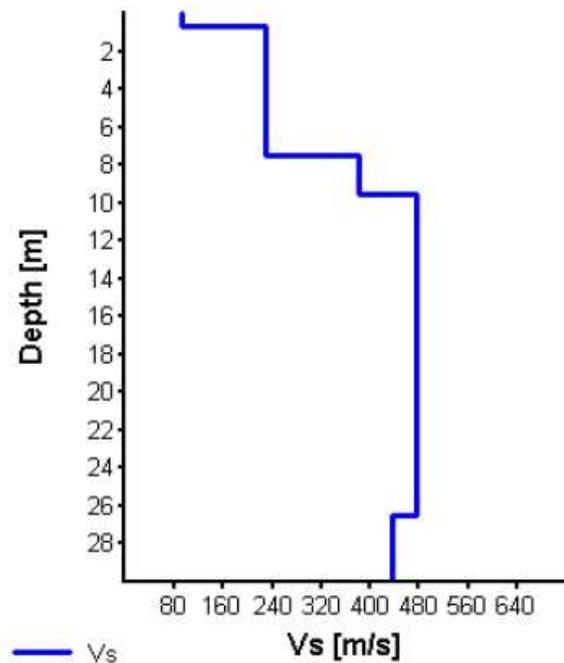


Fig. 12- HVSR02: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. VI- *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV2.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 348 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

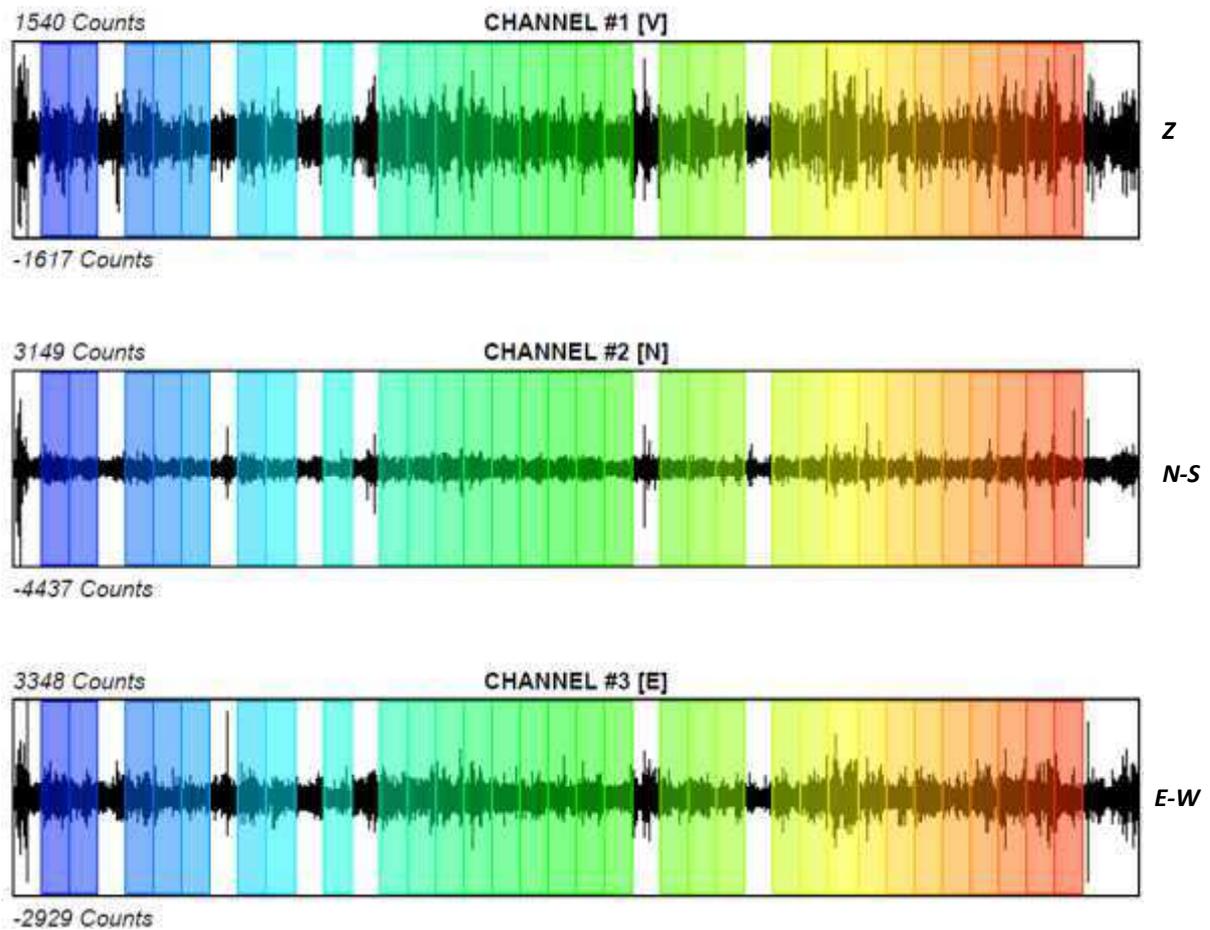
*il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla **CATEGORIA "C"**.*

7.3 HV3

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 14) a 0.297 Hz con H/V pari a 5.2 ed ulteriori 2 picchi con H/V compreso tra 2+3, rispettivamente a 0.880 Hz ed a 43.495 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig.15).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 12:50:00
Recording end time: 2019/11/11 13:10:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 31
Average windows length: 30 s

Fig. 13 - HVSR03: Segnali e windowing

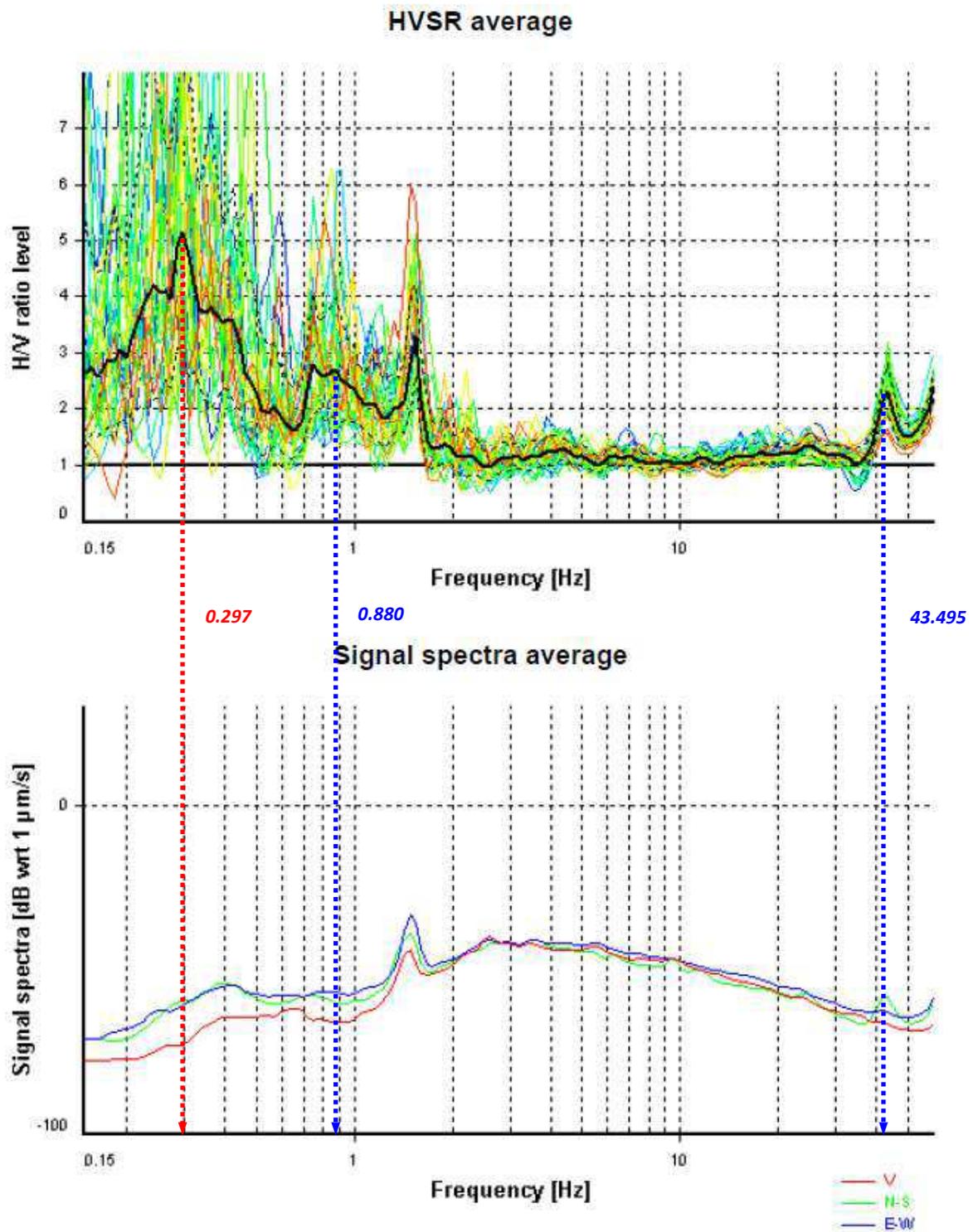


Fig. 14 - HVSR03: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

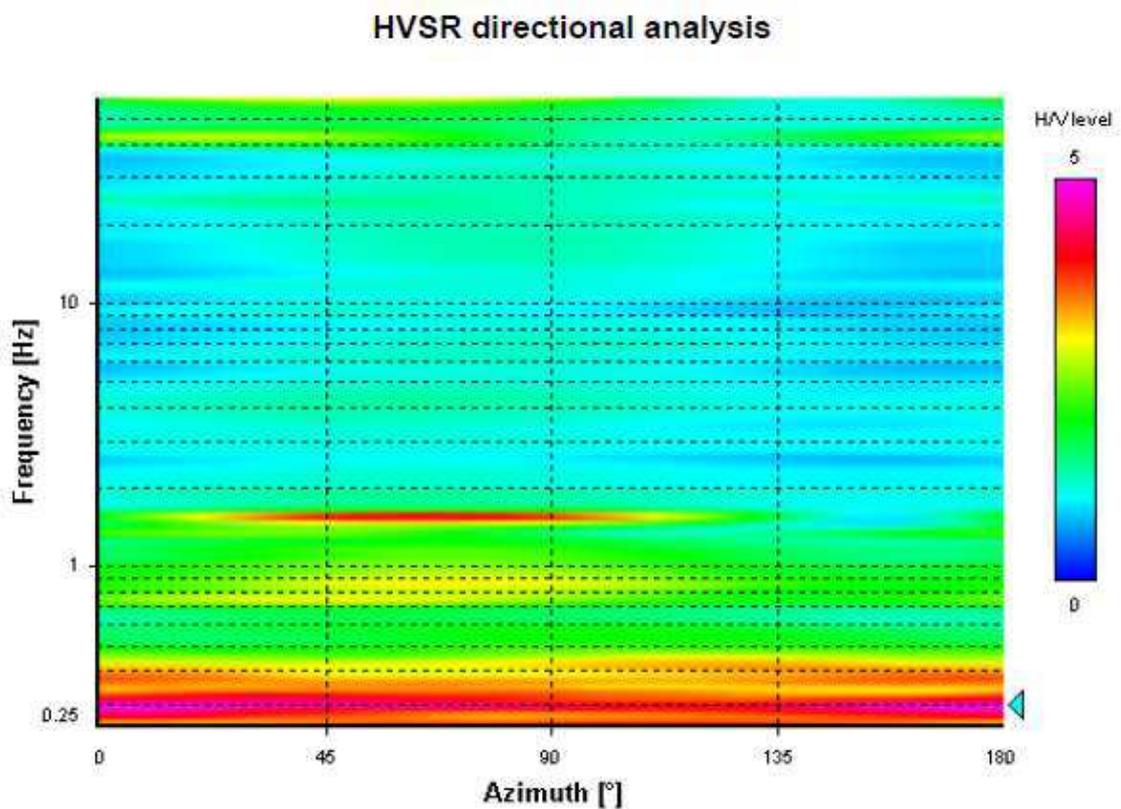
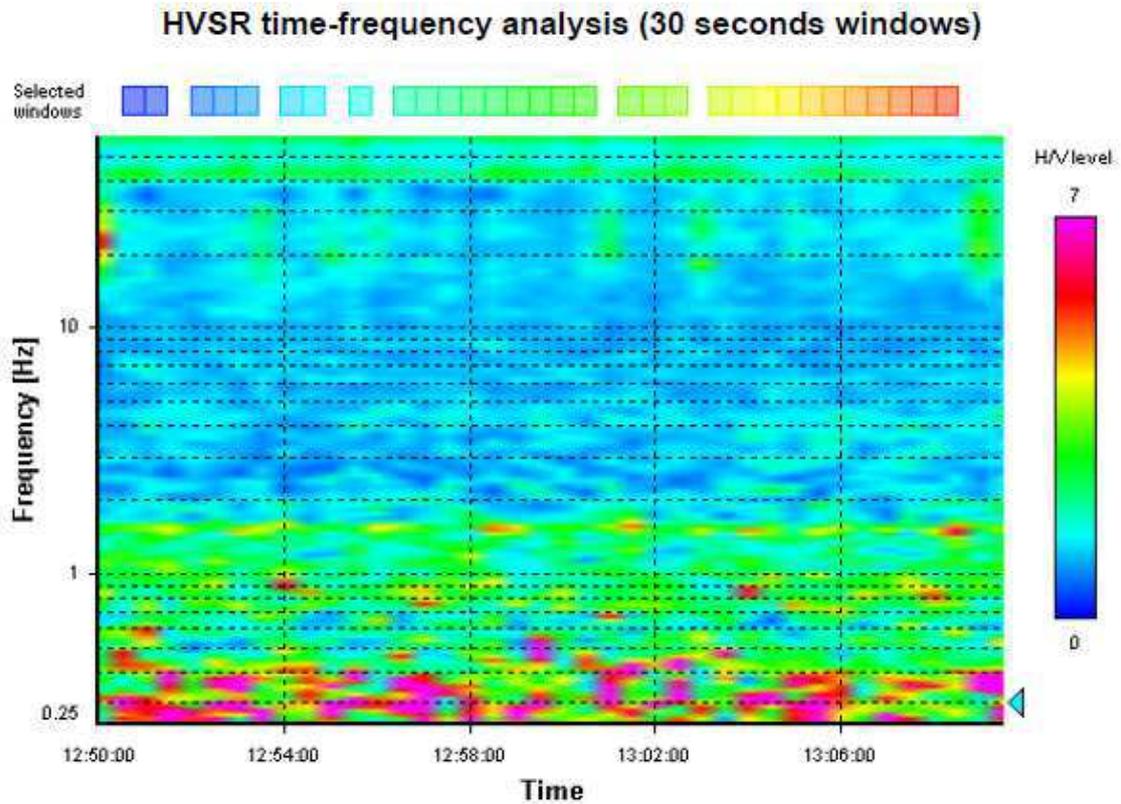


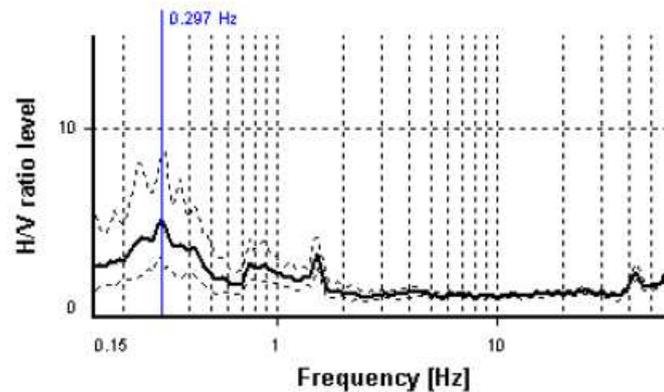
Fig. 15 - HVSR03: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.297 Hz

A_0 amplitude = 5.166

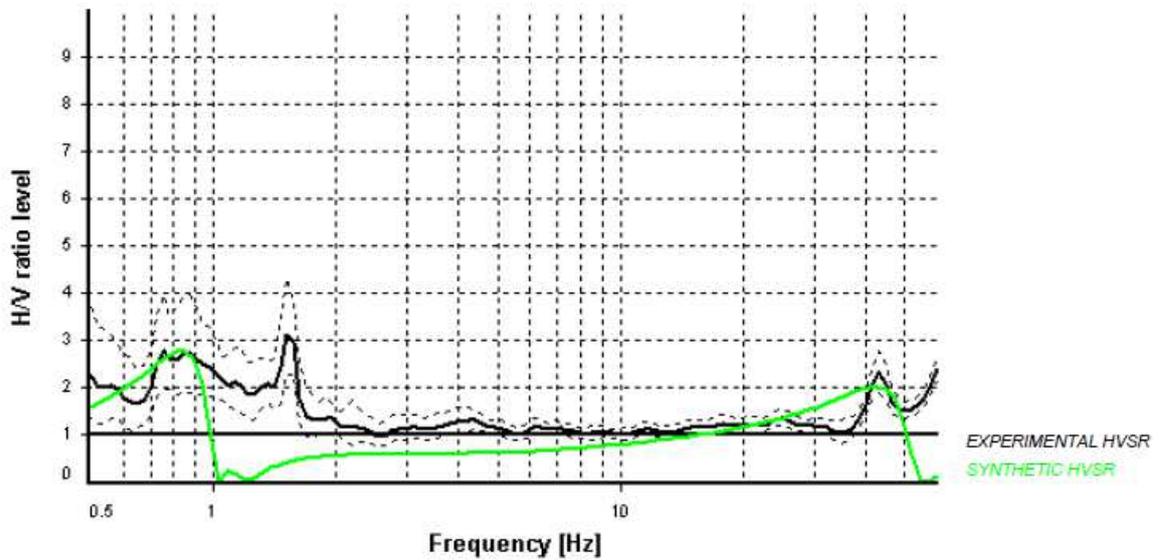
Average $f_0 = 0.301 \pm 0.069$



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	0 valid windows (length > 33.65 s) out of 28	NO
$n_c(f_0) > 200$	0 <= 200	NO
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f \text{ in } [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f' \text{ in } [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$	0.48143 Hz	OK
$A_0 > 2$	5.17 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	4.1% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.06886 >= 0.05943	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.68238 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Fig. 16– Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.6	0.6	83
1.8	2.4	220
3.4	5.8	200
7	12.8	190
-	>12.8	220

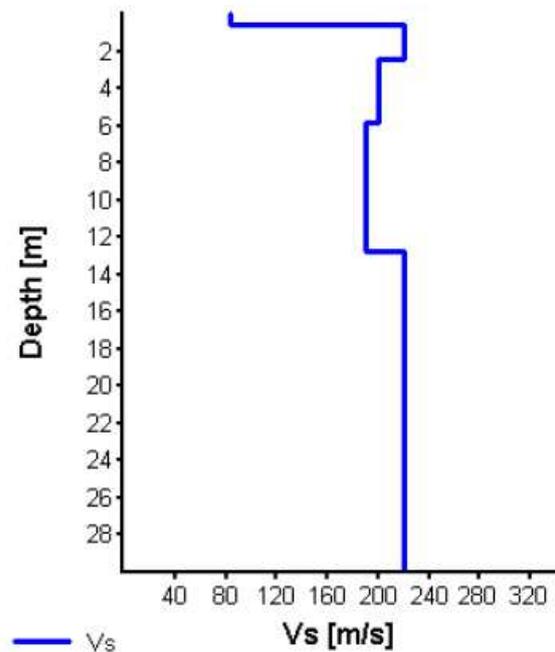


Fig. 17 - HVSR03: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. VII - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV3.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 203 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

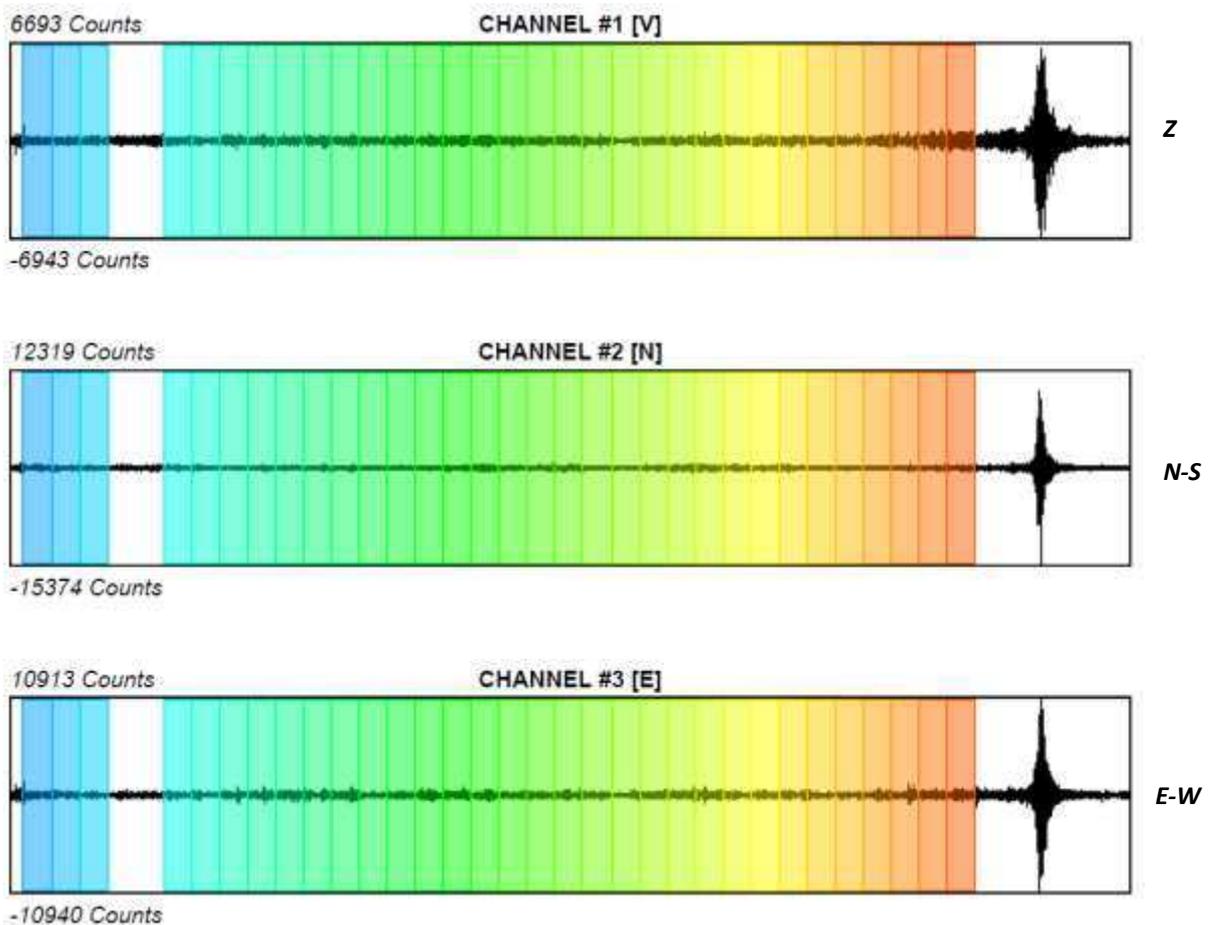
*il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla **CATEGORIA "C"**.*

7.4 HV4

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 19) a 0.253 Hz con H/V pari a 6.0 ed ulteriori 2 picchi con valori di H/V di poco superiori a 2, rispettivamente a 0.954 Hz ed a 24.772 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 20).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 12:05:00
Recording end time: 2019/11/11 12:25:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 30
Average windows length: 30 s

Fig. 18 - HVSR04: Segnali e windowing

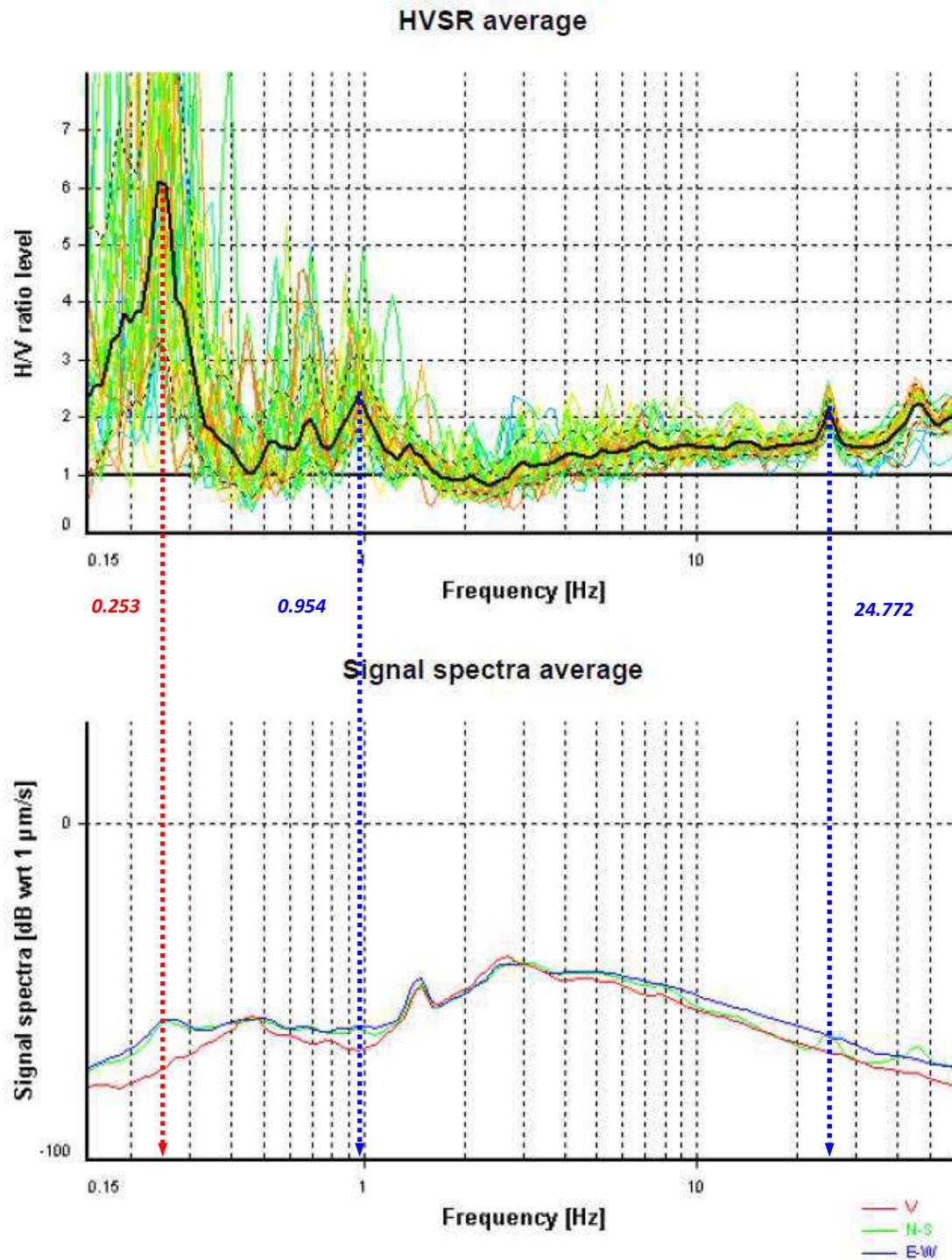


Fig. 19 - HVSR04: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

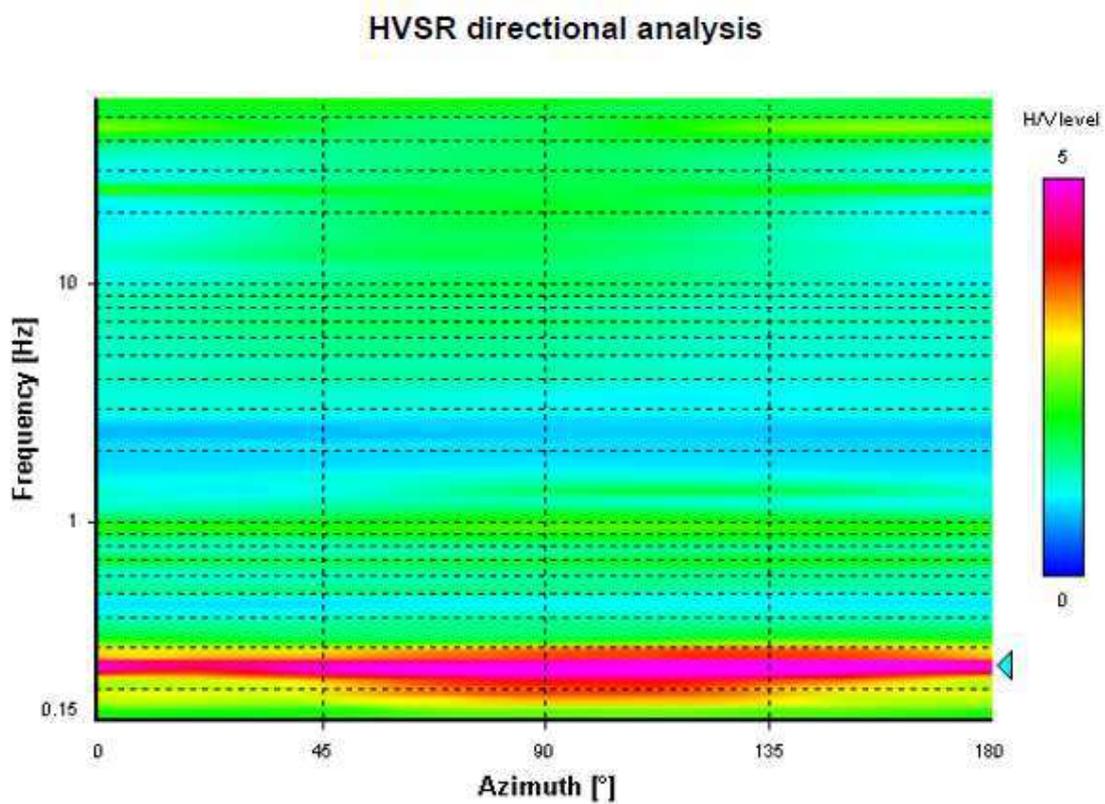
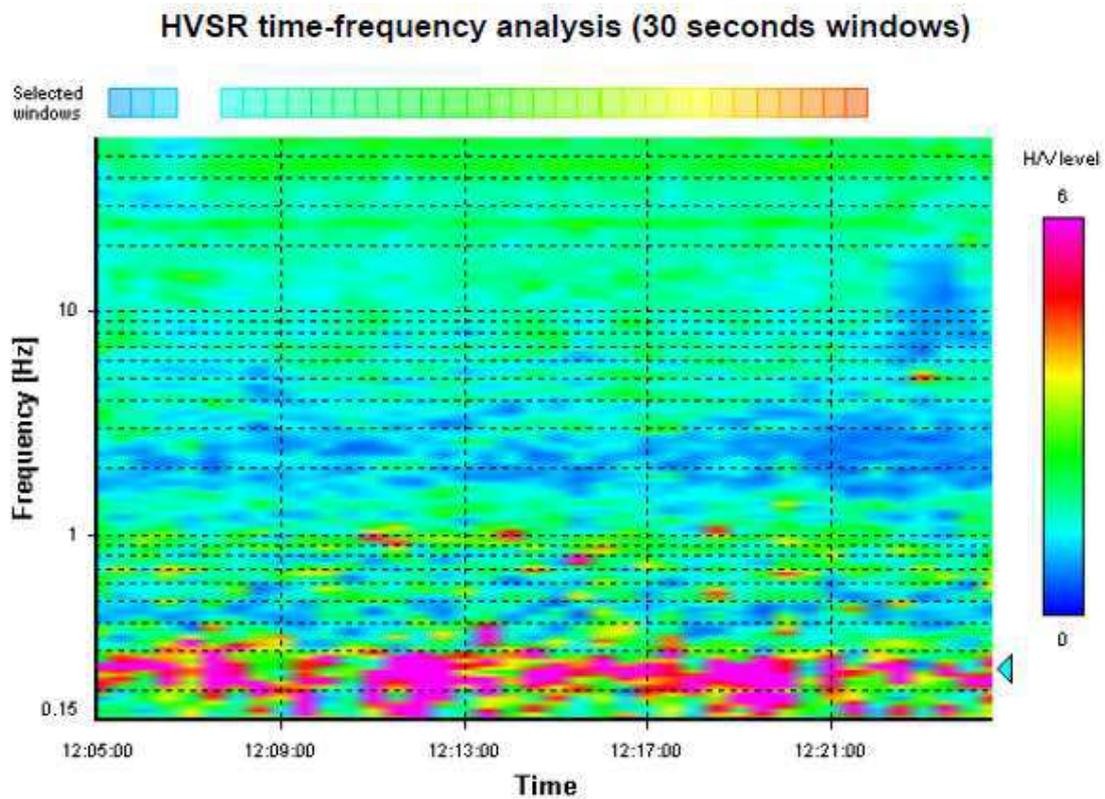


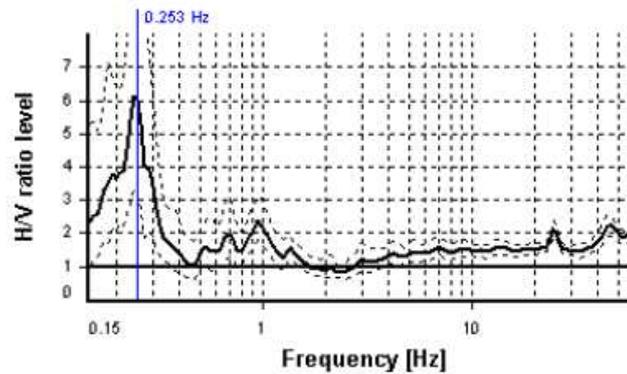
Fig. 20 - HVSR04: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.253 Hz

A_0 amplitude = 6.047

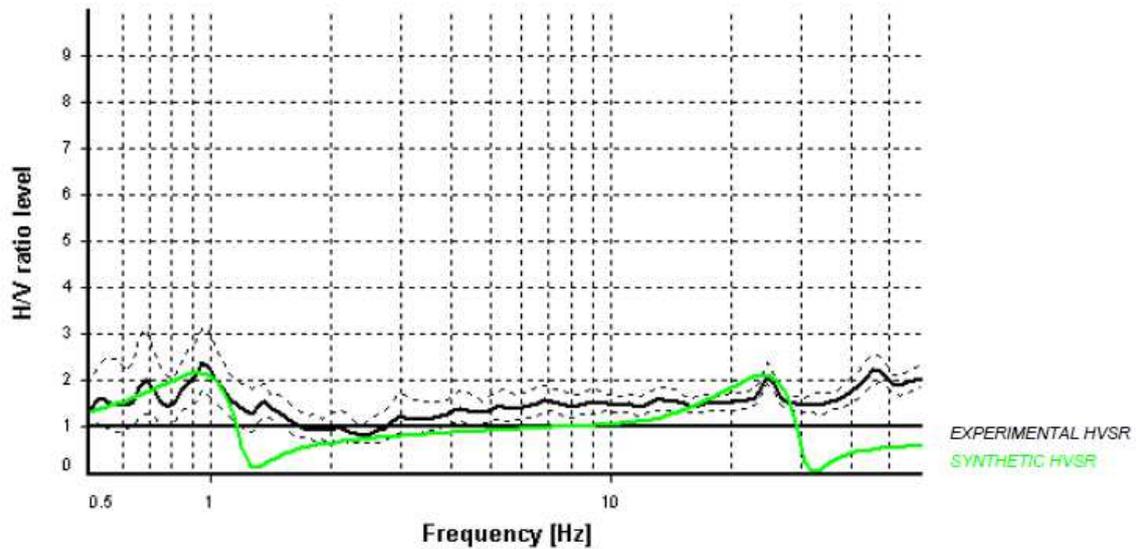
Average $f_0 = 0.237 \pm 0.040$



HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	0 valid windows (length > 39.53 s) out of 32	NO
$n_c(f_0) > 200$	0 \leq 200	NO
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 31	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f) < A_0/2$	0.16923 Hz	OK
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f') < A_0/2$	0.30934 Hz	OK
$A_0 > 2$	6.05 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.94% \leq 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.04013 < 0.0506	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.896 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Fig. 21 – Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
1.2	1.2	94
2.5	3.7	260
1.6	5.3	200
13	18.3	310
-	>18.3	290

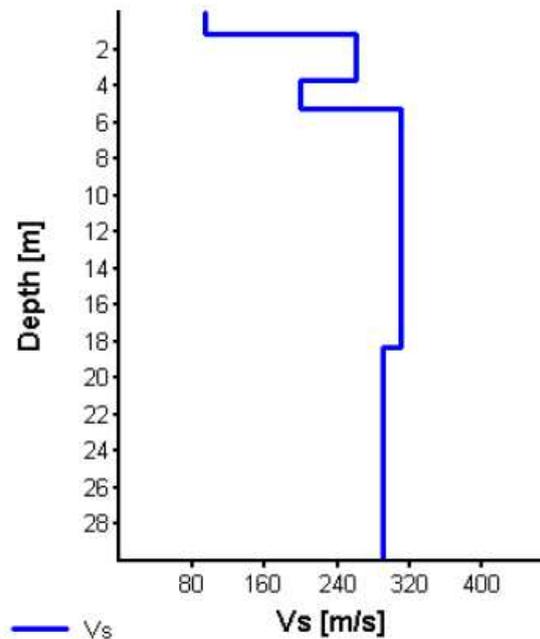


Fig. 22 - HVSR04: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. VIII - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV4.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 266 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

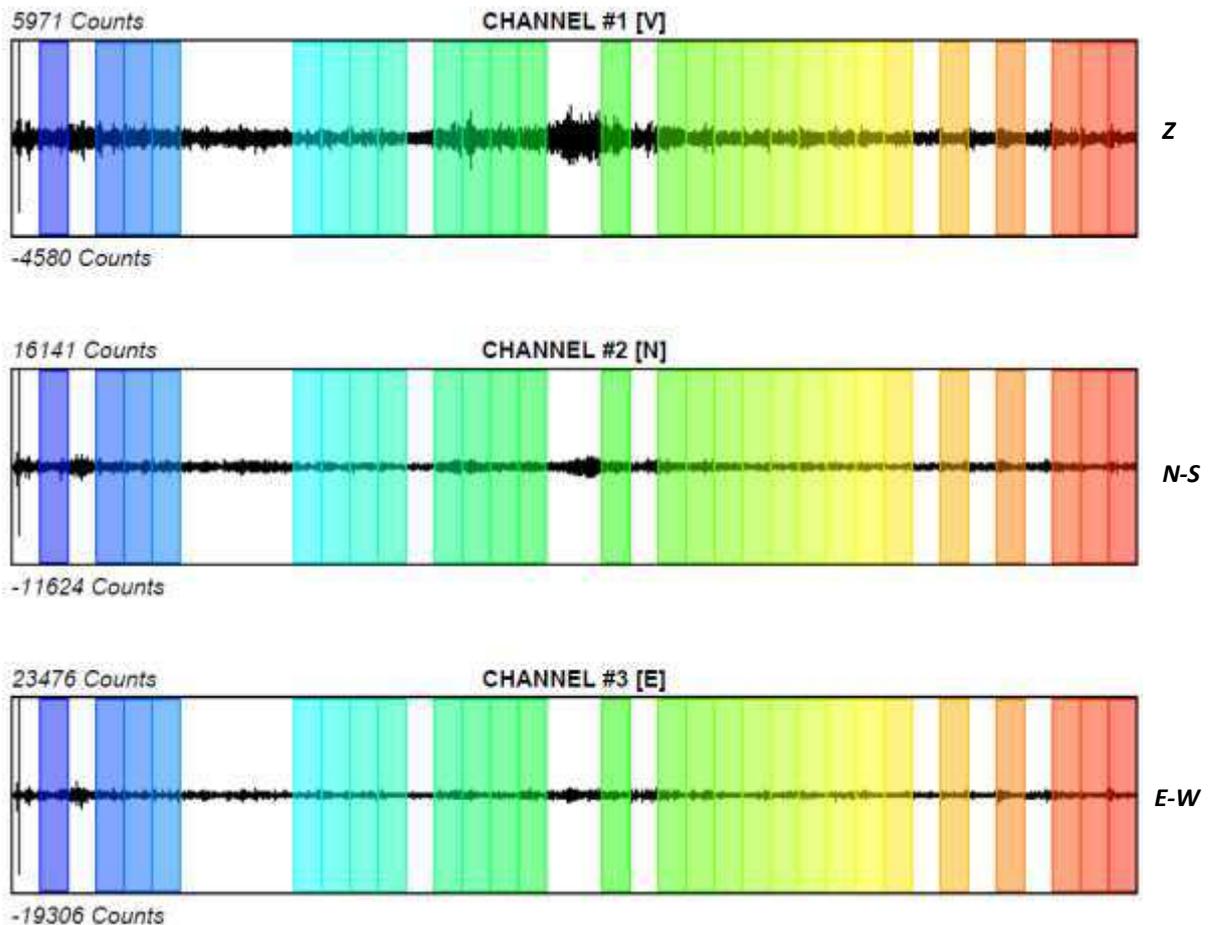
*il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla **CATEGORIA "C"**.*

7.5 HV5

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 24) a 0.0427 Hz con H/V pari a 6.9 ed ulteriori 2 picchi con valori di H/V di poco superiori a 2, rispettivamente a 1.034 Hz ed a 31.531 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 25).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 15:53:00
Recording end time: 2019/11/11 16:13:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 27
Average windows length: 30 s

Fig. 23 - HVSR05: Segnali e windowing

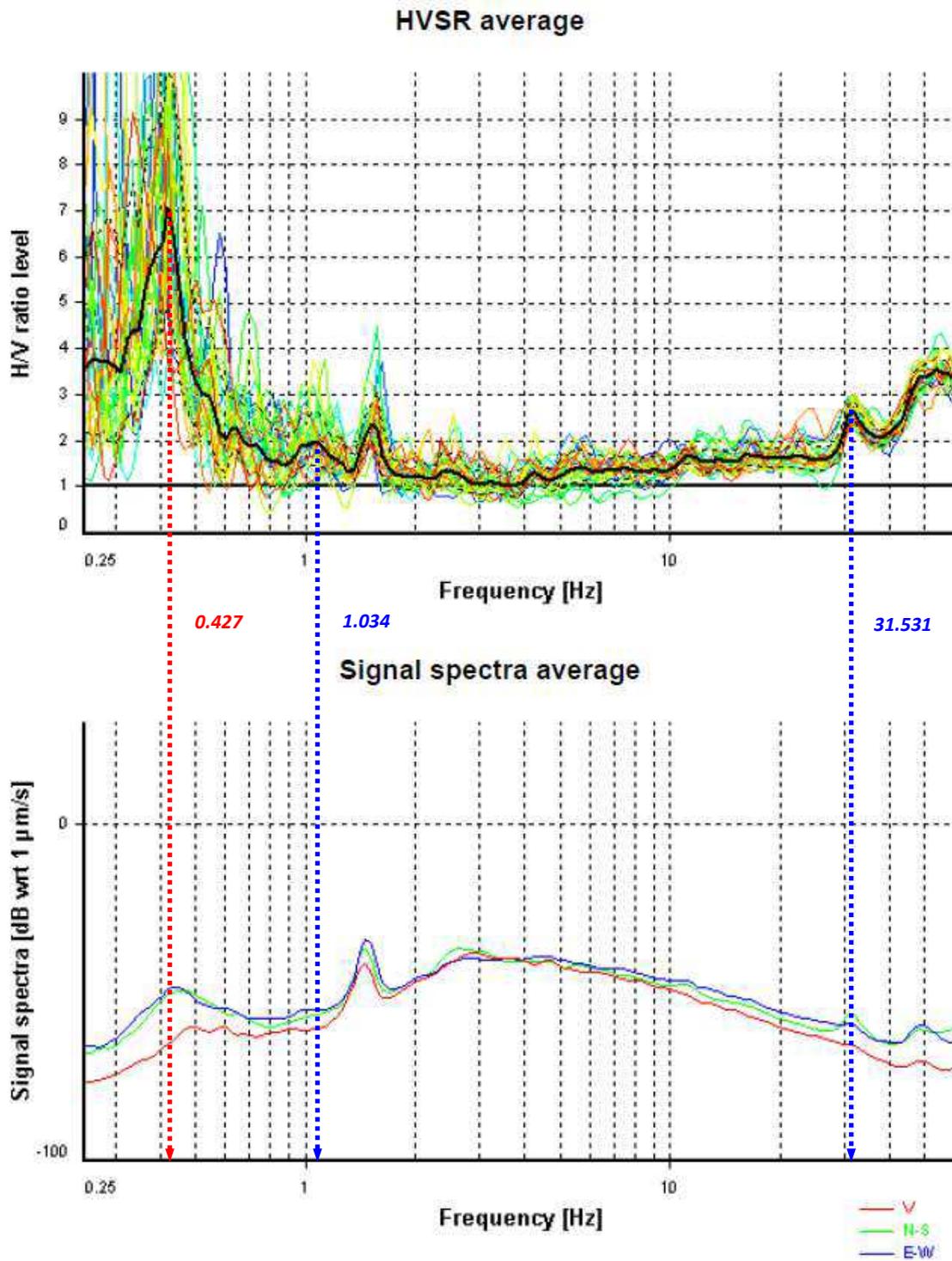
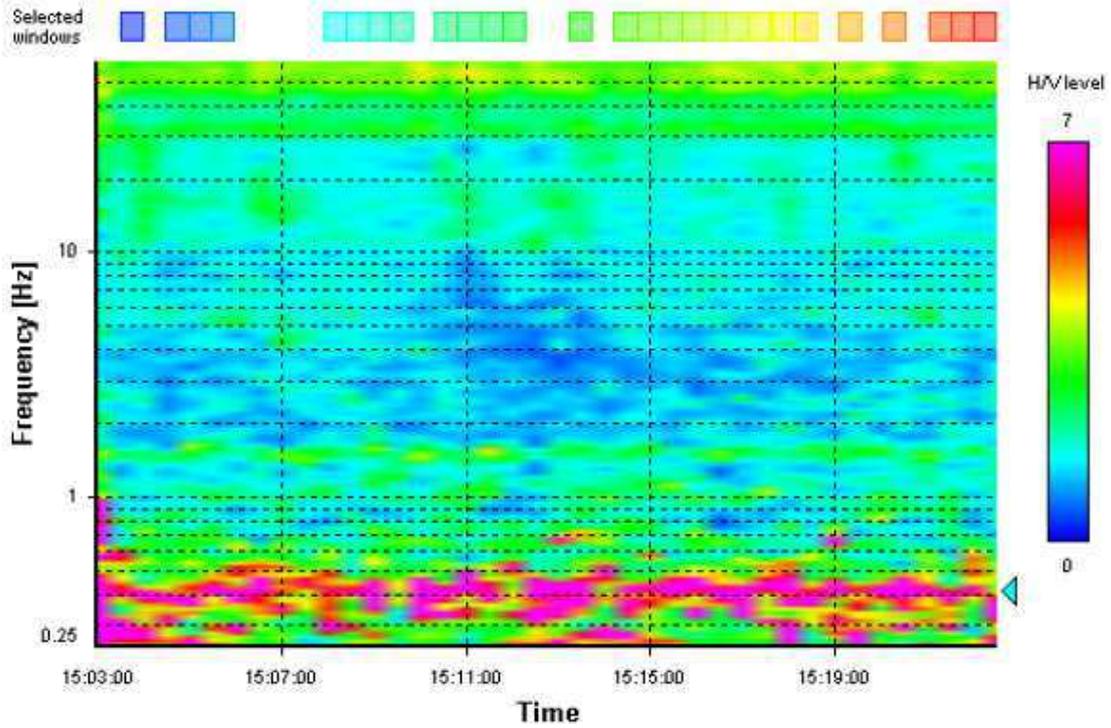


Fig. 24 - HVSR05: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



HVSR directional analysis

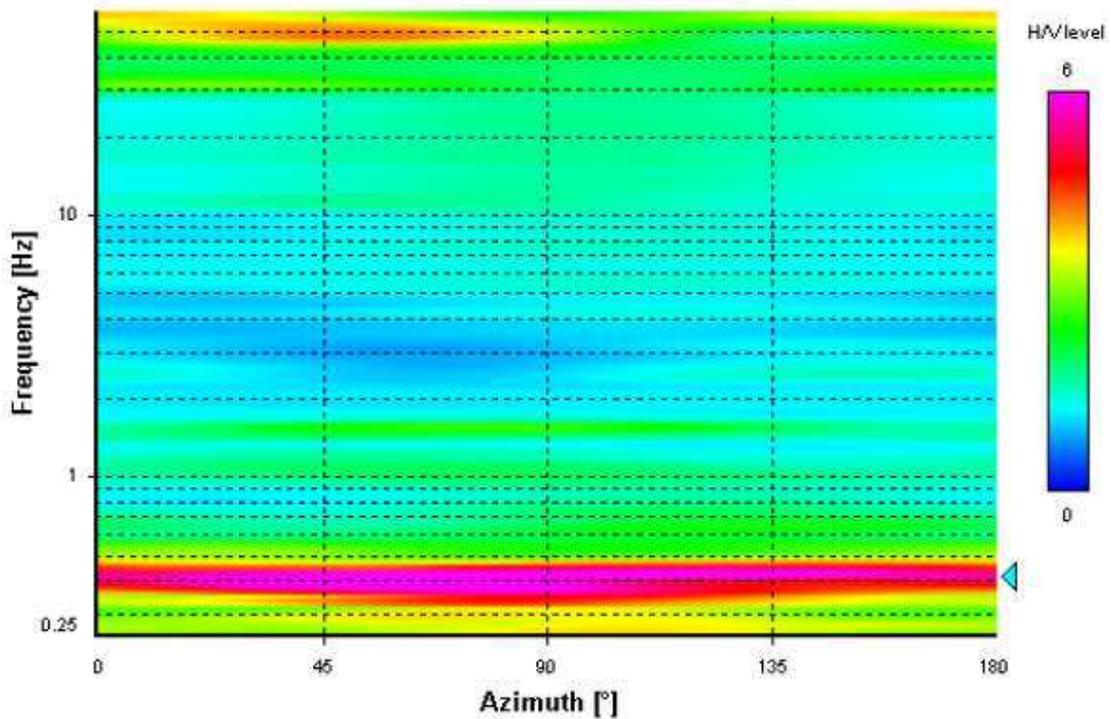


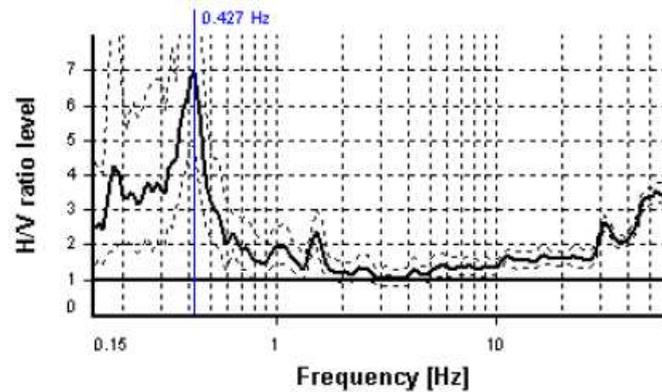
Fig. 25 - HVSR05: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.427 Hz

A_0 amplitude = 6.939

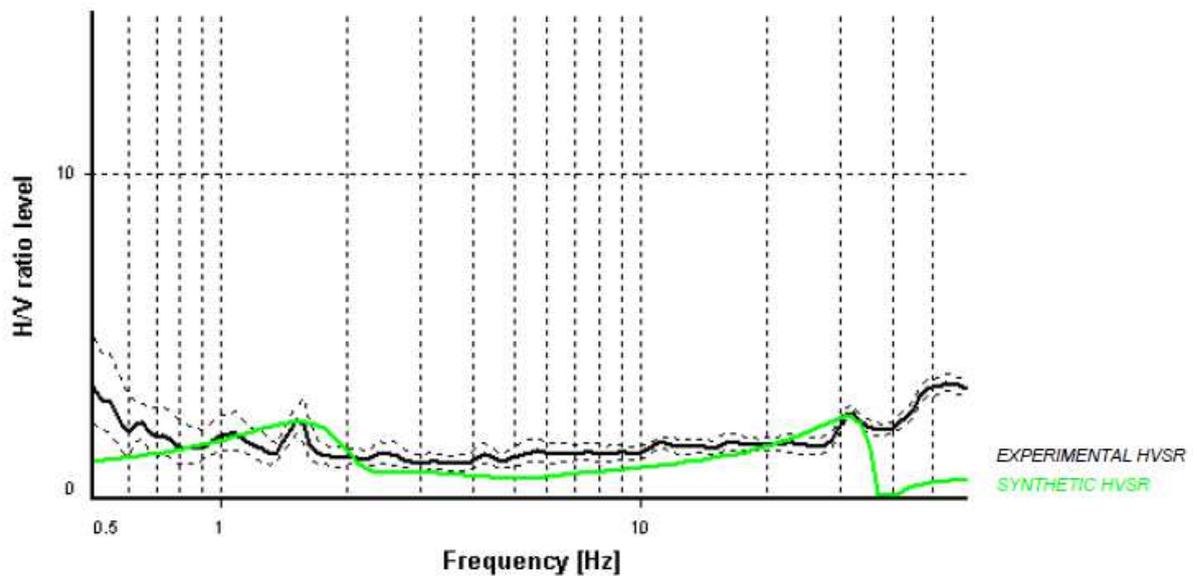
Average $f_0 = 0.396 \pm 0.054$



HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	27 valid windows (length > 23.43 s) out of 27	OK
$n_c(f_0) > 200$	345.64 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f \text{ in } [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.30934 Hz	OK
$\exists f^+ \text{ in } [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	0.50118 Hz	OK
$A_0 > 2$	6.94 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.94% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.05362 < 0.08534	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.45581 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Fig. 26 – Criteri SESAME per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.9	0.9	85
1.9	2.8	237
13	15.8	210
-	>15.8	330

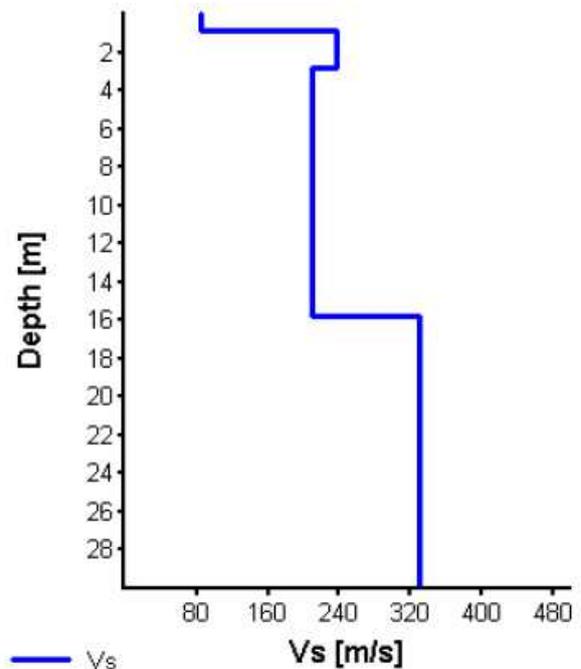


Fig. 27 - HVSR05: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. IX - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV5.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 243 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

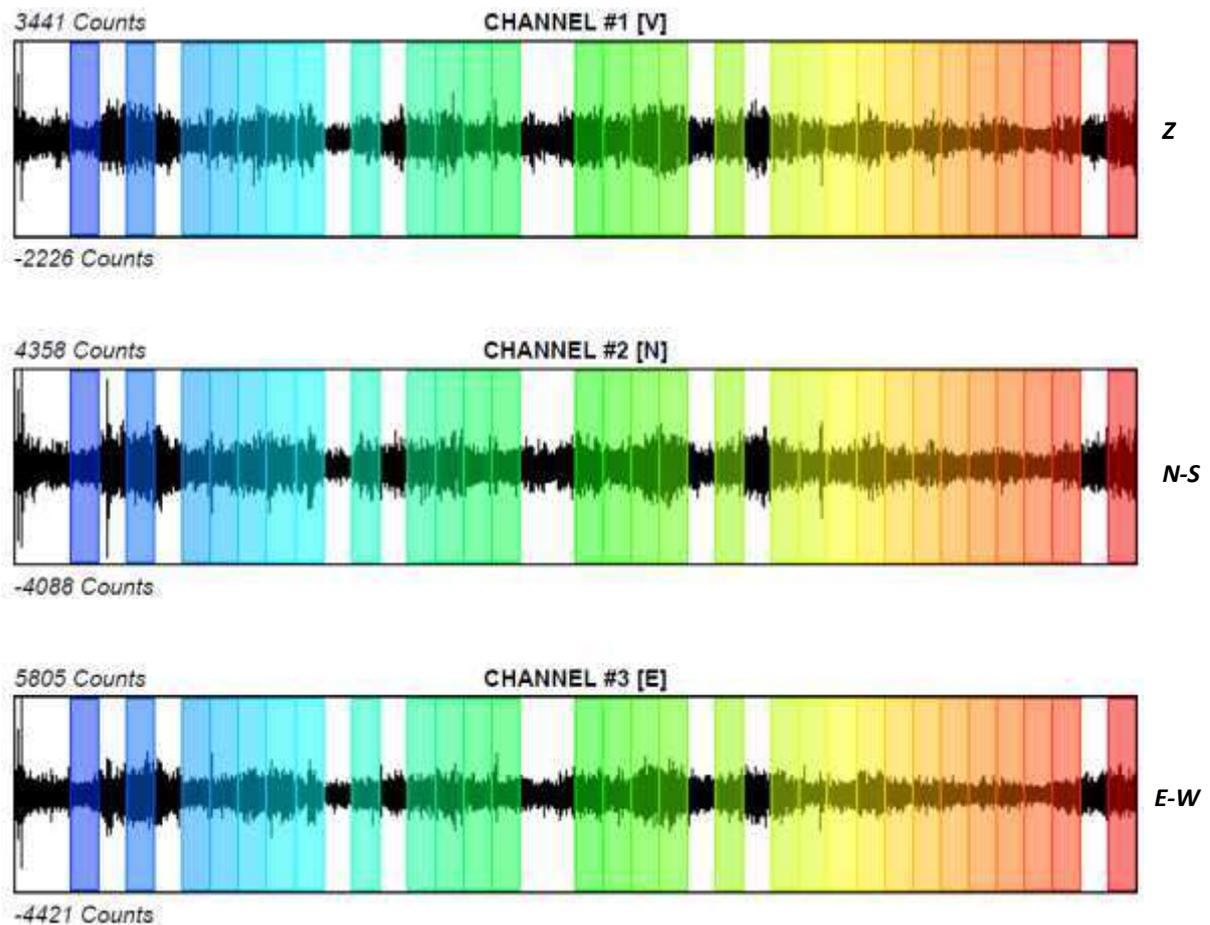
*il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla **CATEGORIA "C"**.*

7.6 HV6

La misura *HVSR* ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 29) a 0.403 Hz con H/V pari a 5.7 ed ulteriori 3 picchi con valori di H/V compresi tra 1 poco più di 2, rispettivamente a 0.916 Hz, 14.108 Hz ed a 30.228 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 30).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 14:23:00
Recording end time: 2019/11/11 14:43:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 29
Average windows length: 30 s

Fig. 28 - HVSR06: Segnali e *windowing*

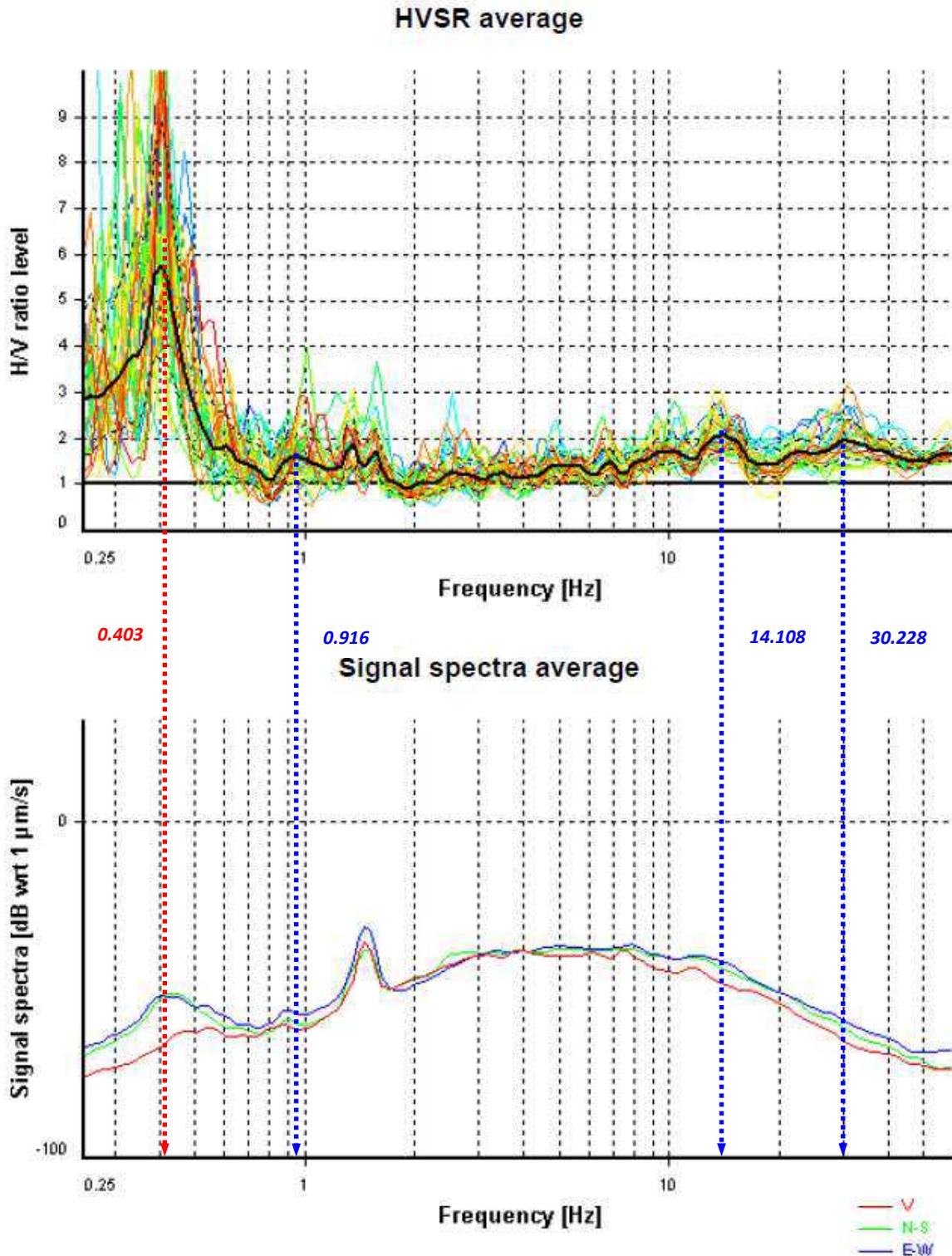


Fig. 29 - HVSR06: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

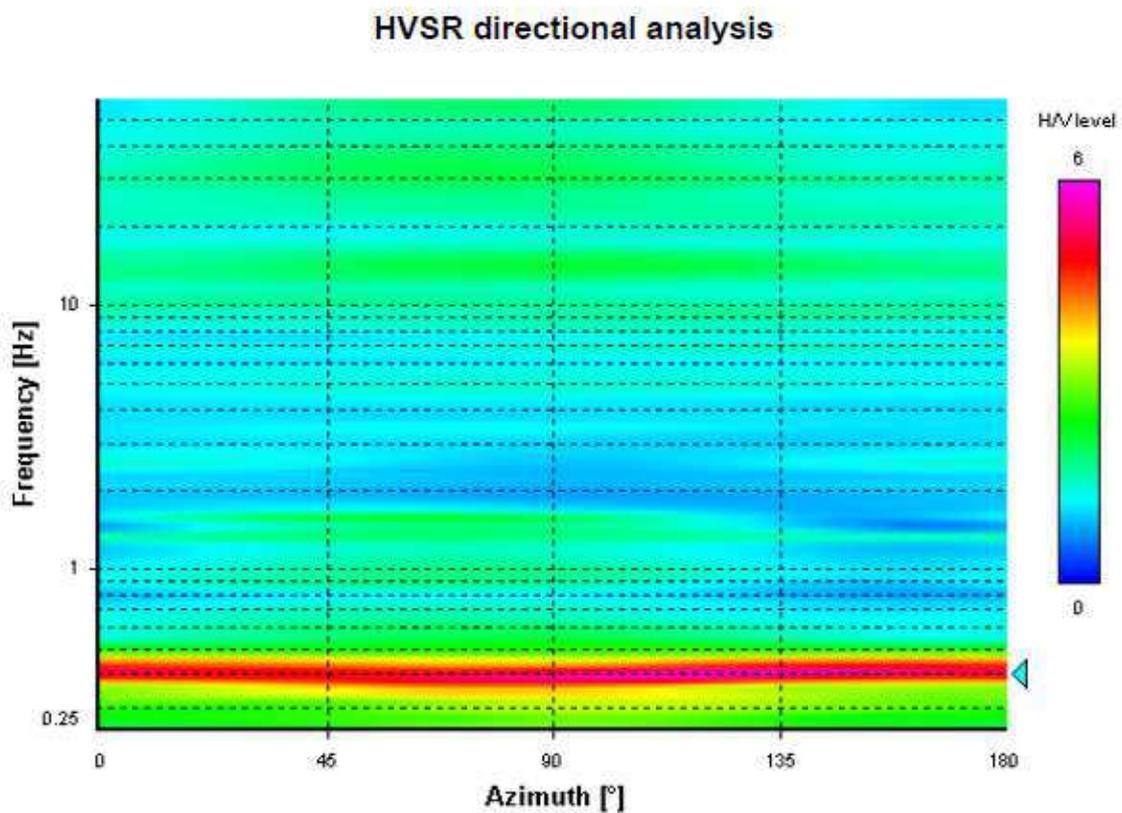
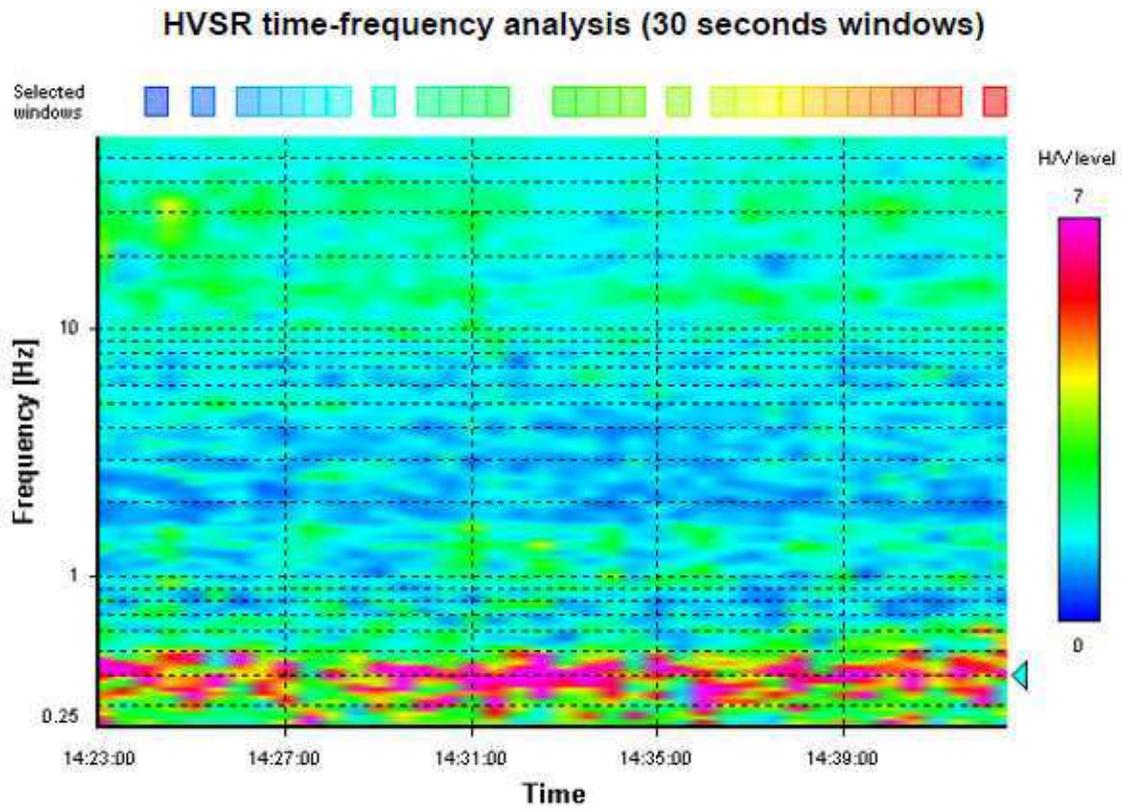


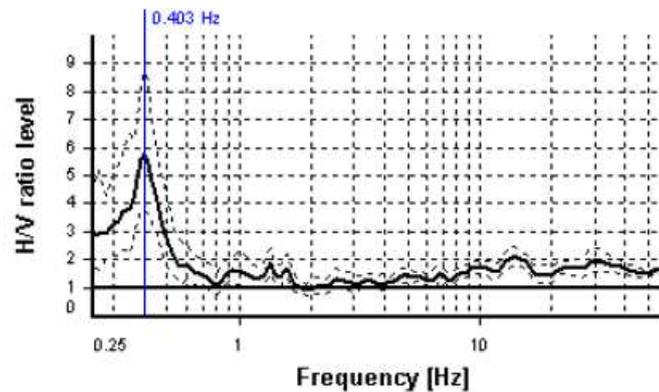
Fig. 30 - HVSR06: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.403 Hz

A_0 amplitude = 5.754

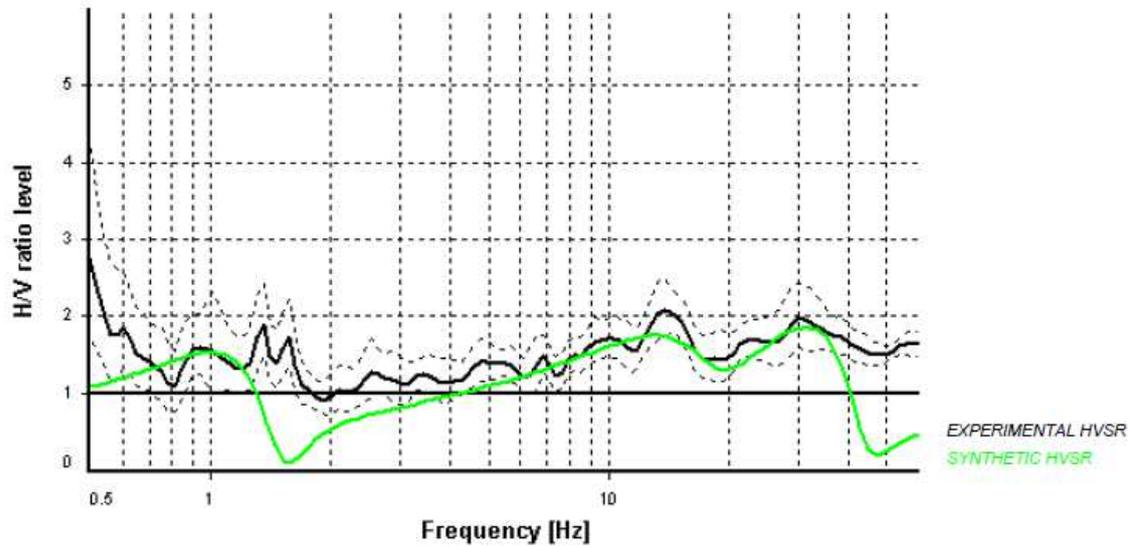
Average $f_0 = 0.381 \pm 0.049$



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	29 valid windows (length > 24.8 s) out of 29	OK
$n_c(f_0) > 200$	350.86 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 32	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f \text{ in } [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.25 Hz	OK
$\exists f^+ \text{ in } [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	0.50287 Hz	OK
$A_0 > 2$	5.75 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.61% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.04935 < 0.08066	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.54436 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Fig. 31 – Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.75	0.75	88
1.9	2.65	218
2.7	5.35	255
7	12.35	440
16	28.35	380
-	>28.5	340

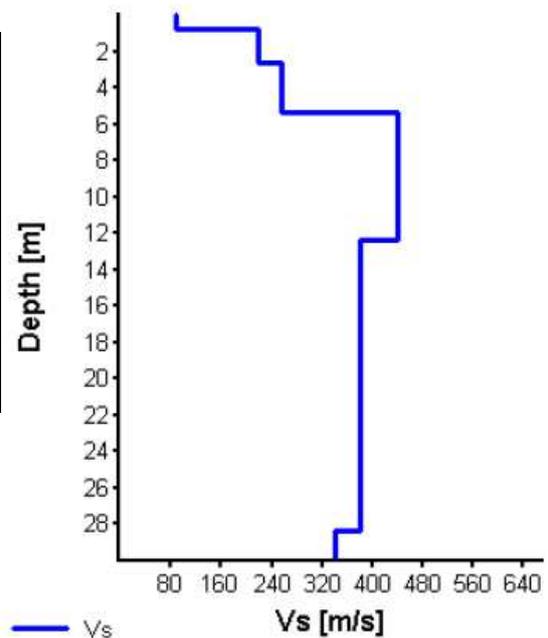


Fig. 32 - HVSR06: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. X - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV6.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 331 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

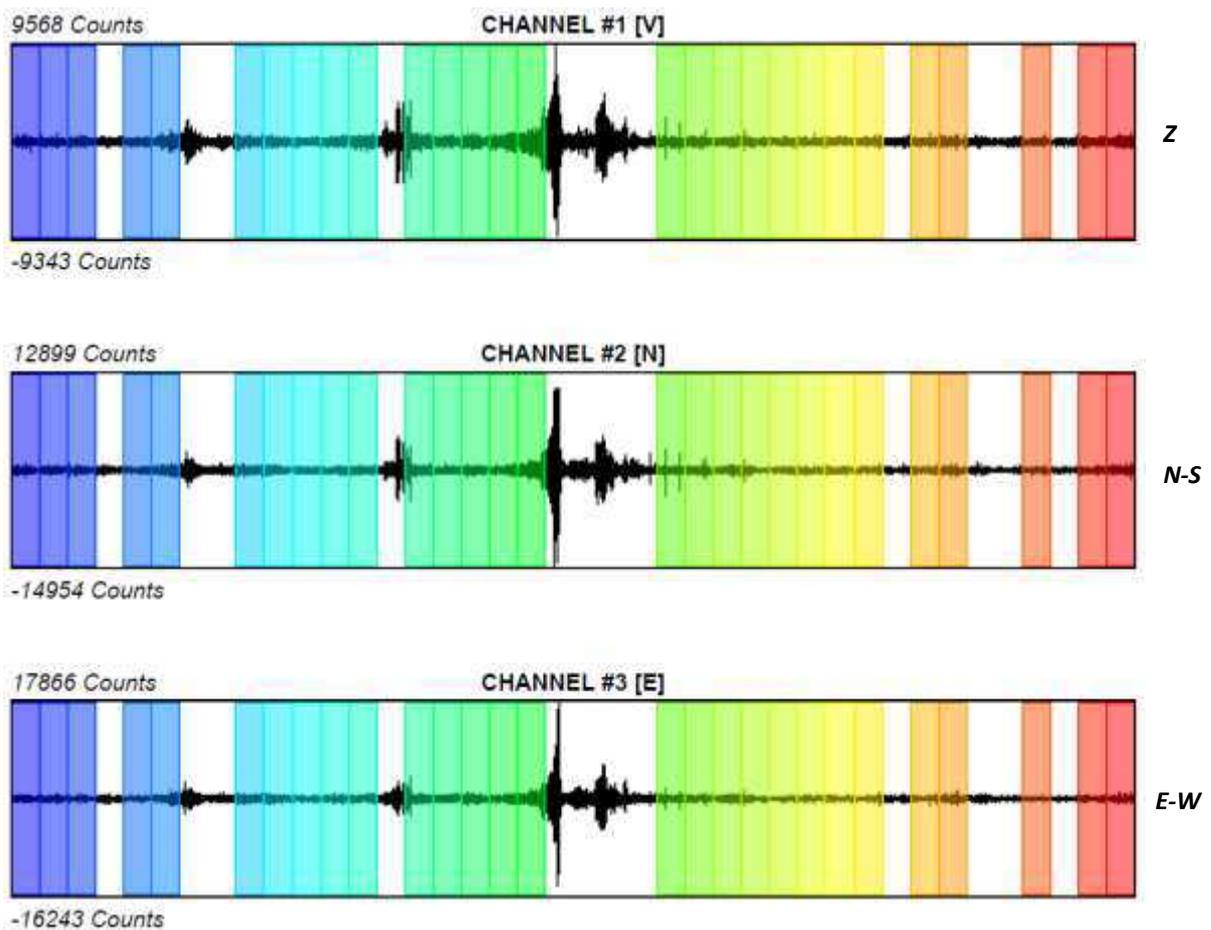
il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla CATEGORIA "C".

7.7 HV7

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 34) a 0.378 Hz con H/V pari a 4.2 ed ulteriori 3 picchi con valori di H/V compreso tra 1 e poco più di 2, rispettivamente a 0.976Hz, 14.207 Hz ed a 29.92 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 35).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 13:31:00
Recording end time: 2019/11/11 13:51:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 29
Average windows length: 30 s

Fig. 33 - HVSR07: Segnali e windowing

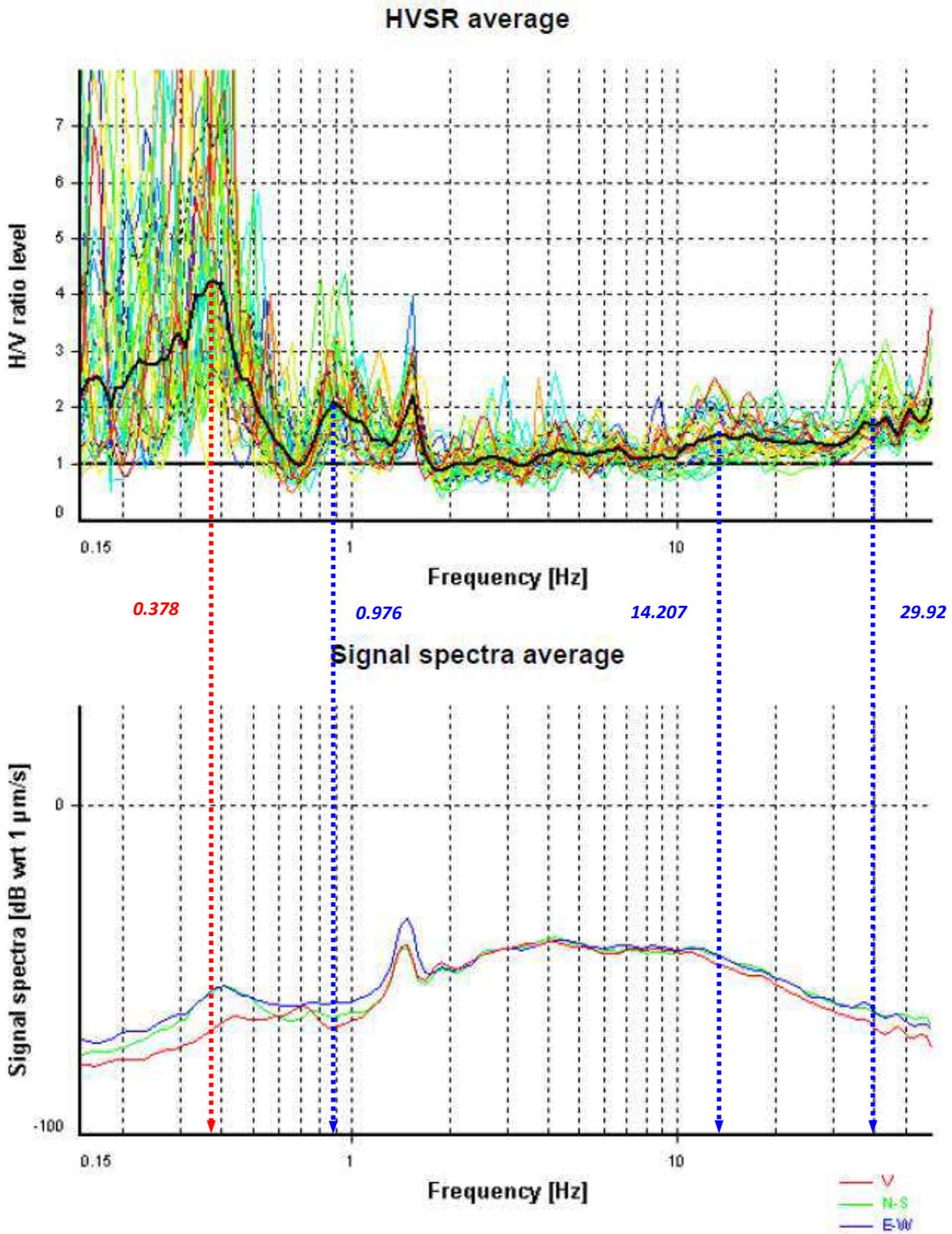
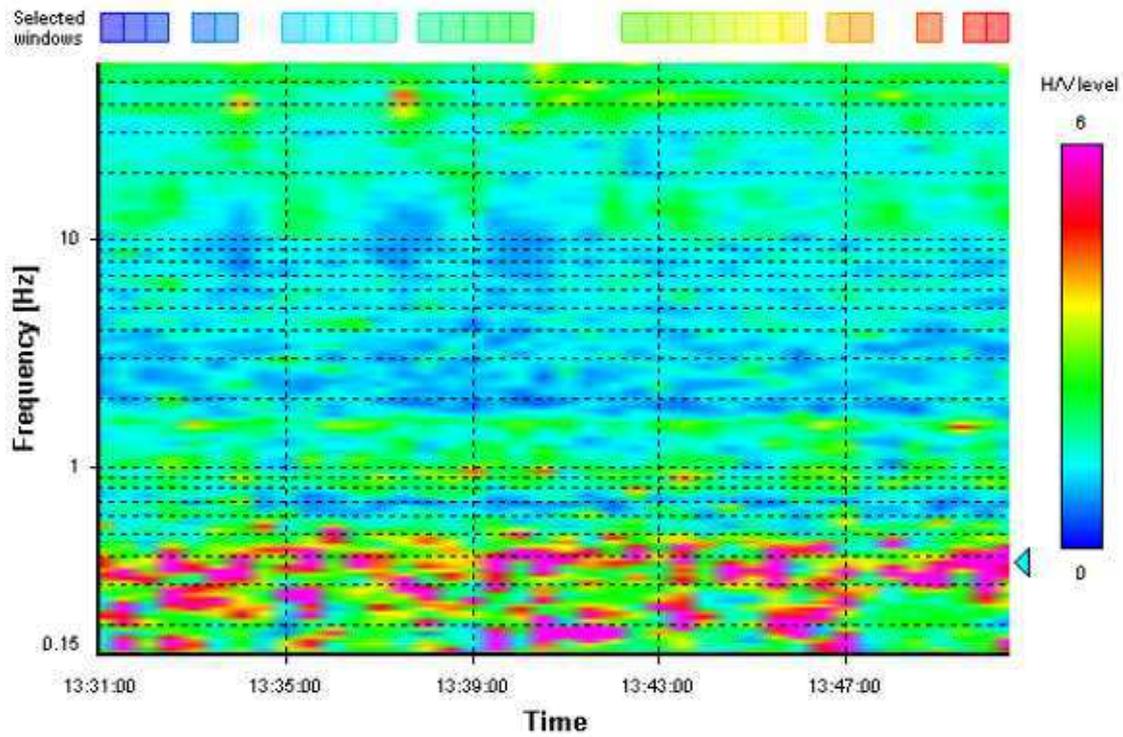


Fig. 34 - HVSRO7: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



HVSR directional analysis

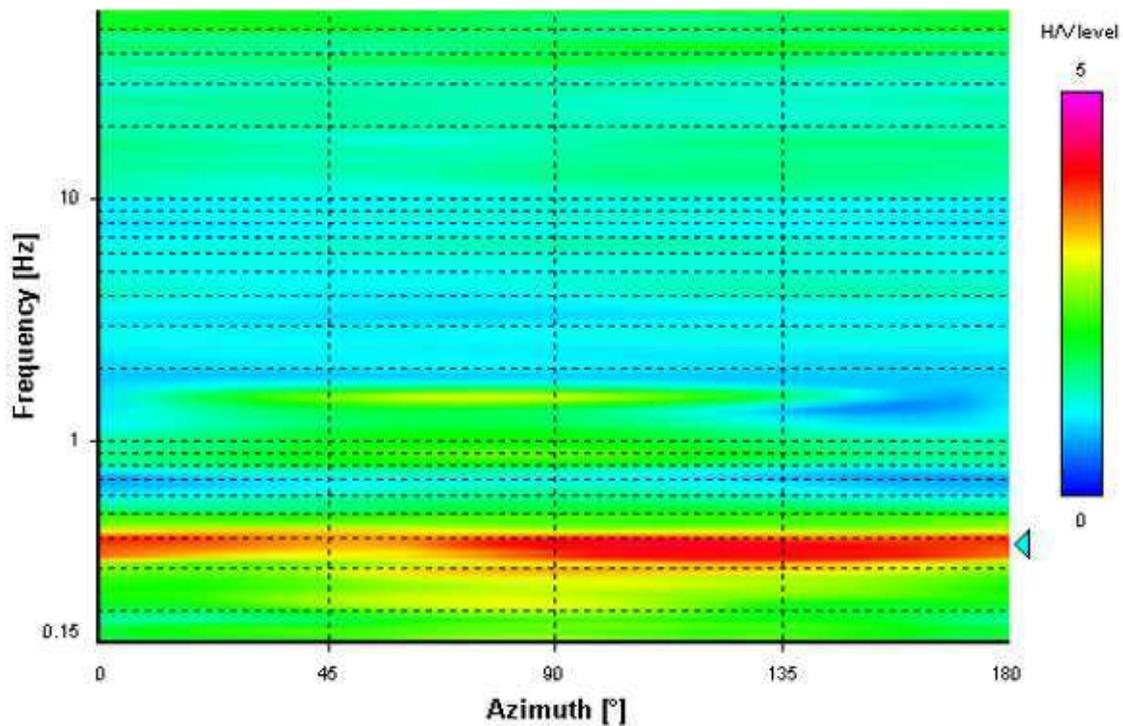


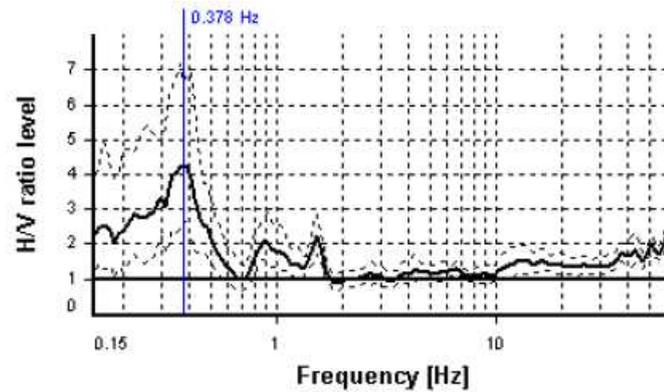
Fig. 35 - HVSR07: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.378 Hz

A_0 amplitude = 4.245

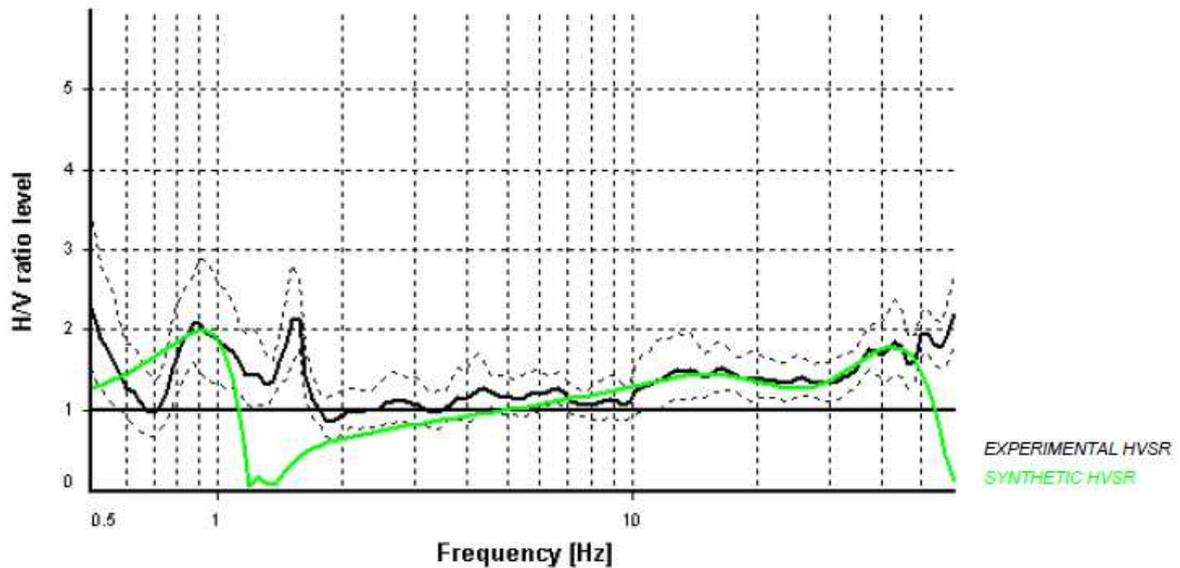
Average $f_0 = 0.348 \pm 0.065$



HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	28 valid windows (length > 26.44 s) out of 28	OK
$n_c(f_0) > 200$	317.71 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f \text{ in } [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.1834 Hz	OK
$\exists f^+ \text{ in } [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	0.52175 Hz	OK
$A_0 > 2$	4.25 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	3.94% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.06475 < 0.07565	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.5658 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Fig. 36 – Criteri *SESAME* per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
0.5	0.5	78
1.9	2.4	195
2.4	4.8	285
3	7.5	360
-	>7.5	370

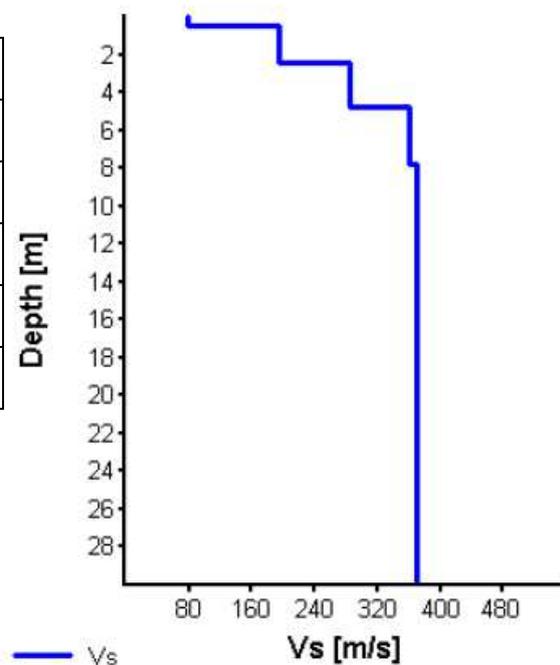


Fig. 37 - HVSR07: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. XI - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV7.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 323 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

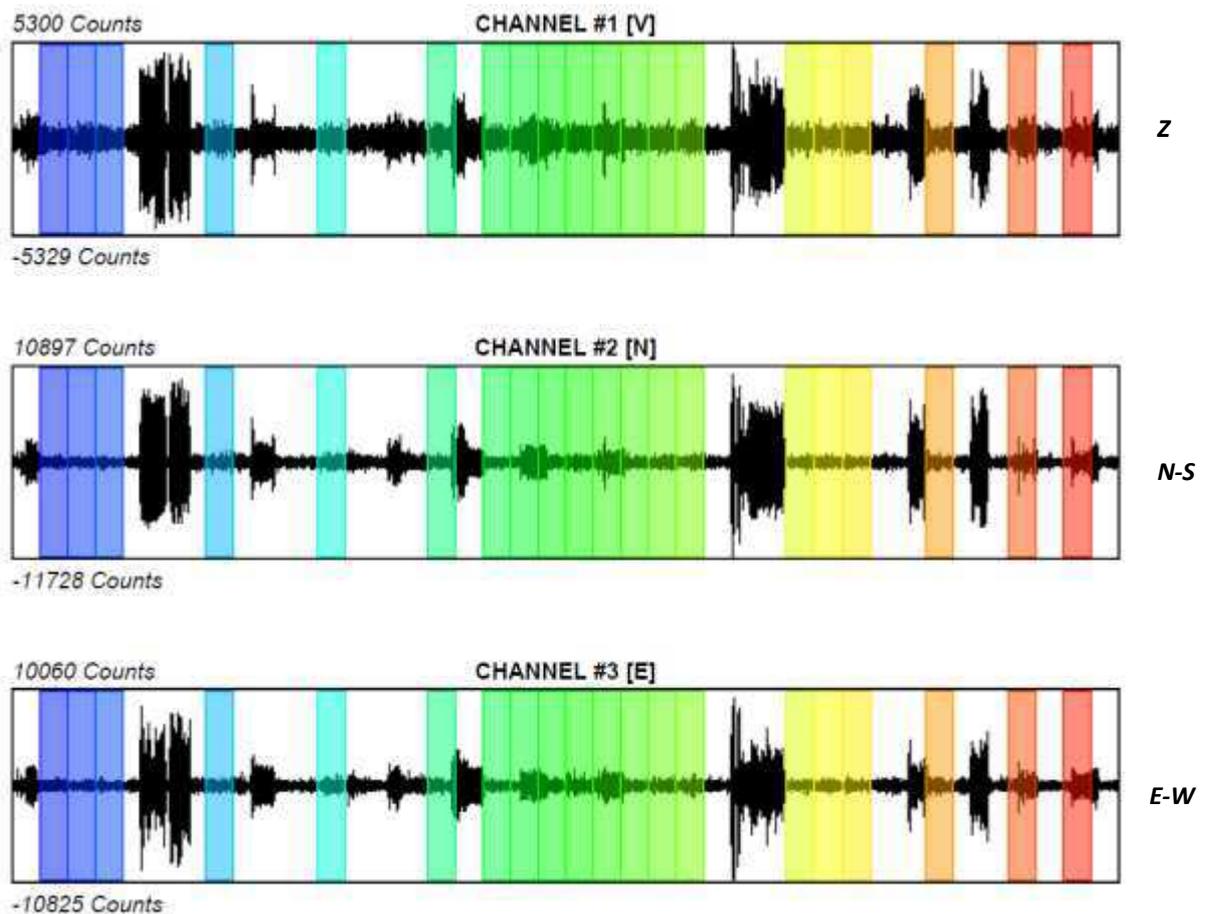
il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla CATEGORIA "C".

7.8 HV8

La misura HVSR ha evidenziato 1 picco molto pronunciato (fig. 39) a 0.322 Hz con H/V pari a 5.2 ed ulteriori 3 picchi con valori di H/V compresi tra 1.6÷3.3, rispettivamente a 0.749 Hz, 8.365 Hz ed a 21.957 Hz.

Il primo rappresenta il modo fondamentale, i restanti blandi effetti stratigrafici di risonanza.

Il campo d'onda che ha generato il picco relativo alla frequenza fondamentale risulta isotropo e stazionario (fig. 40).



Sampling frequency: 300 Hz
Recording start time: 2019/11/11 11:00:00
Recording end time: 2019/11/11 11:20:00
Recording length: 0h 20 min 00 sec
Windows count: 20
Average windows length: 30 s

Fig. 38 - HVSR08: Segnali e windowing

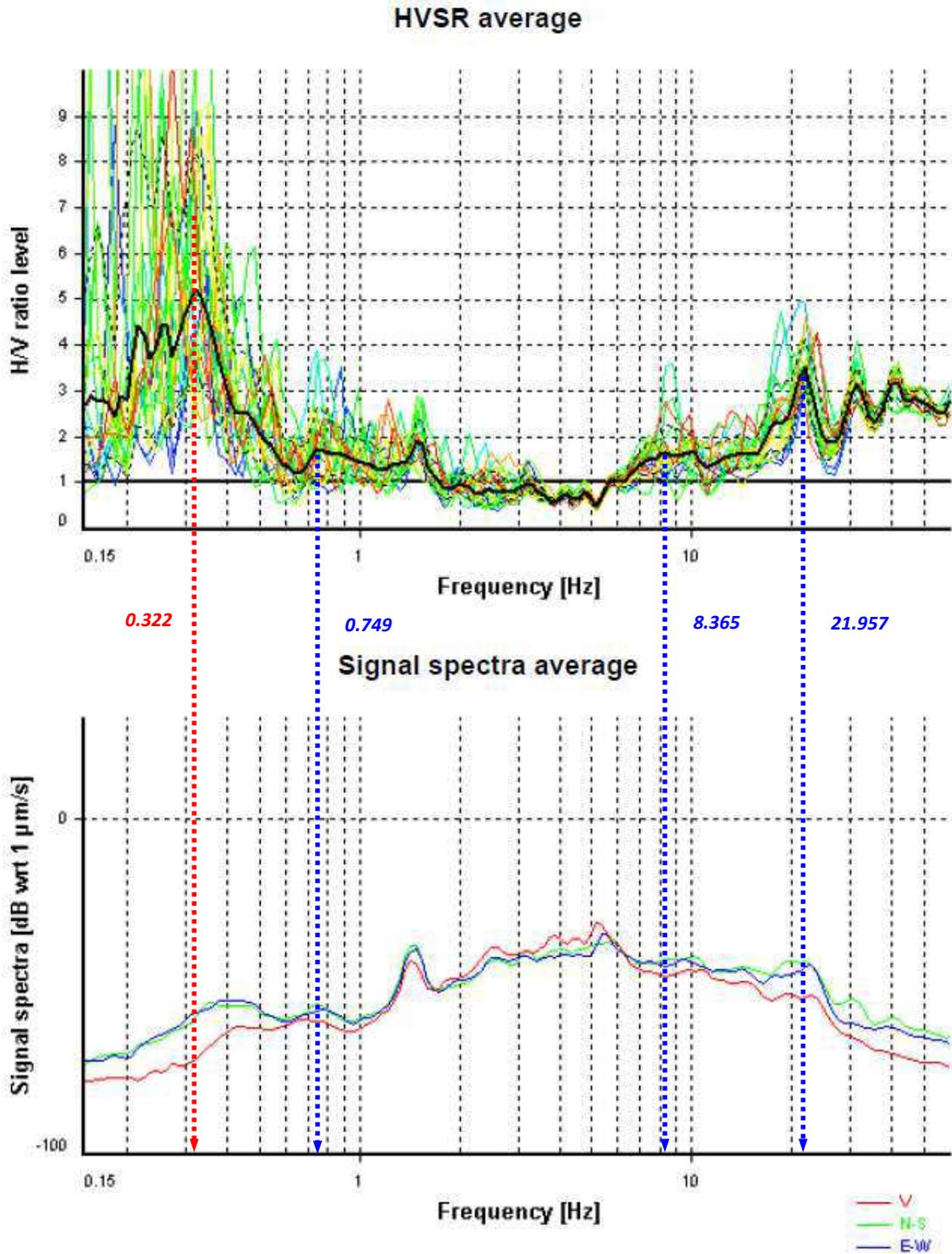


Fig. 39 - HVSR08: media H/V (sopra), media dello spettro dei segnali

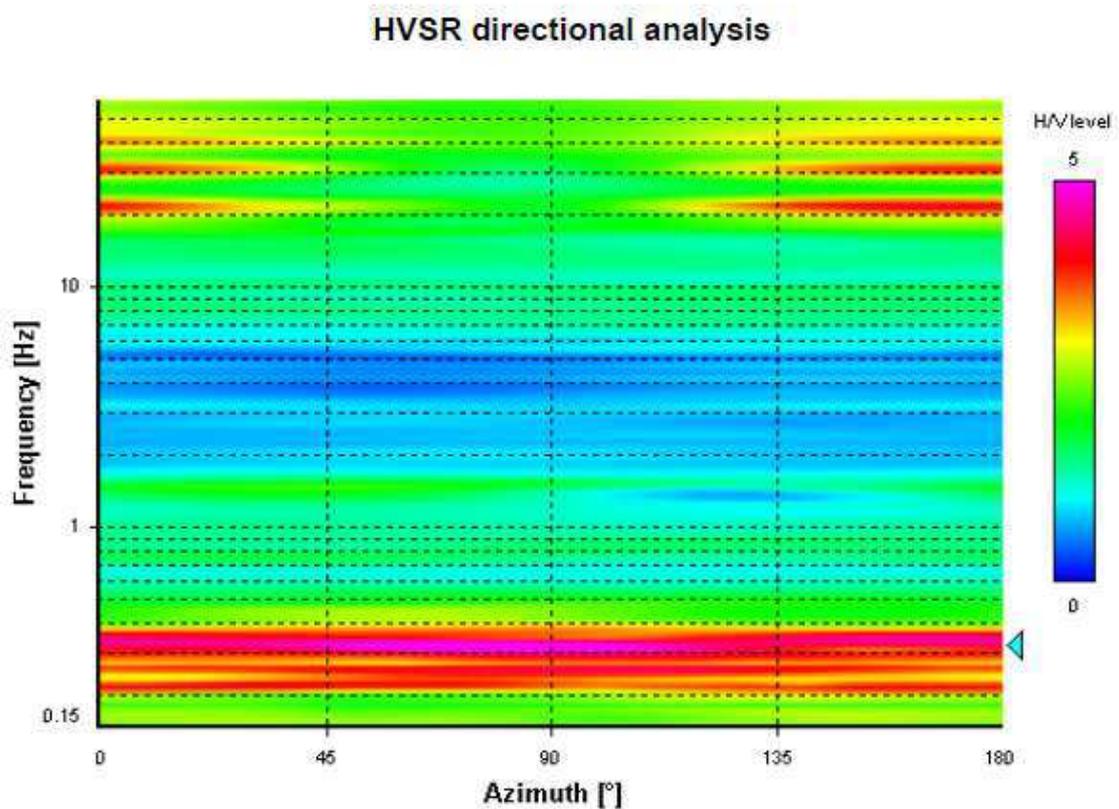
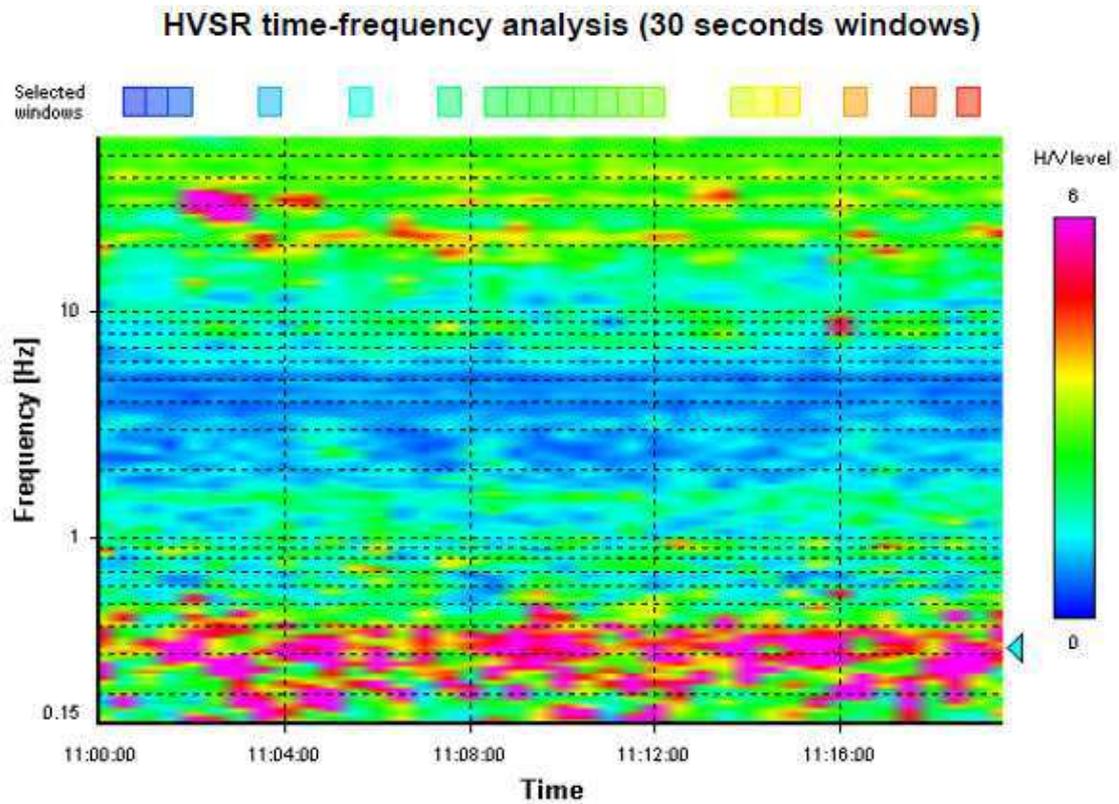


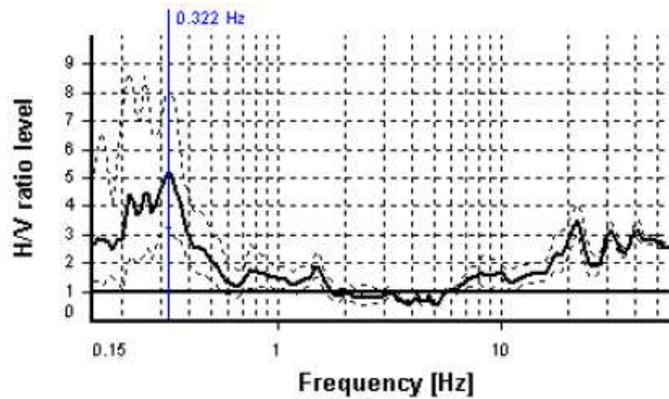
Fig. 40 - HVSR08: analisi HVSR tempo-frequenza (sopra), analisi di direzionalità (sotto)

Selected f_0 frequency

0.322 Hz

A_0 amplitude = 5.191

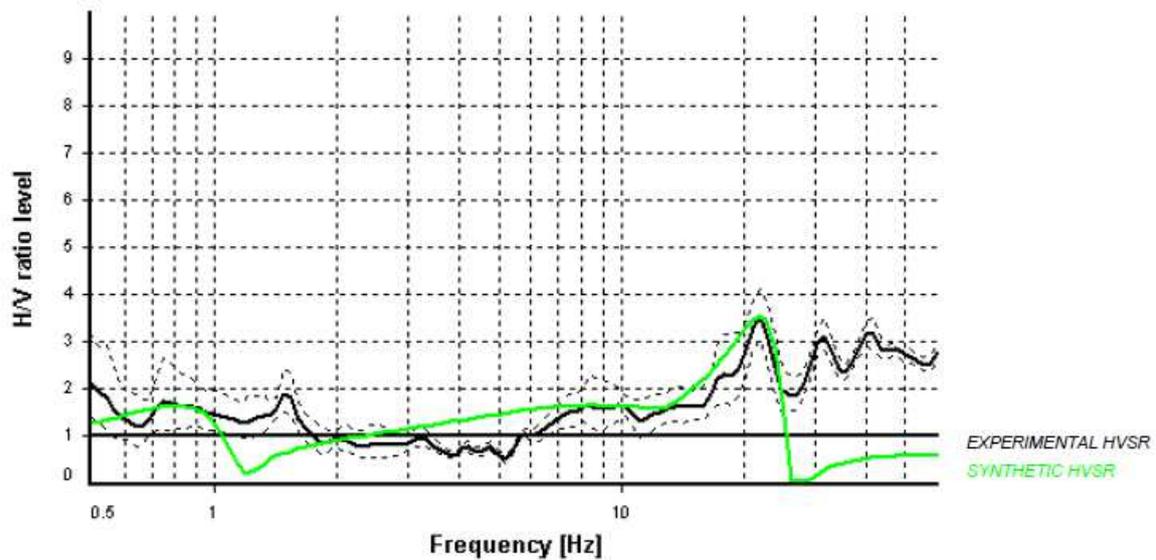
Average $f_0 = 0.292 \pm 0.063$



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	0 valid windows (length > 31.05 s) out of 20	NO
$n_c(f_0) > 200$	0 ≤ 200	NO
$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 35	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0.1834 Hz	OK
$\exists f^*$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$	0.42672 Hz	OK
$A_0 > 2$	5.19 > 2	OK
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	33.11% > 5%	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.06283 < 0.06441	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.57772 < 2.5	OK
Overall criteria fulfillment		NO

Fig. 41 – Criteri SESAME per il picco fondamentale individuato

Di seguito si riporta il risultato dell'elaborazione diretta eseguita sui picchi individuati sullo spettro H/V limitatamente al range di frequenza 0.5÷60 Hz, escludendo il picco fondamentale in quanto ampiamente al di fuori dall'intervallo di profondità richiesto per la stima del parametro V_{SEQ} .



H (m)	D (m)	V_s
1.4	1.4	94
3	4.3	247
1.3	5.6	275
4	9.6	290
13	22.6	430
-	>22.6	490

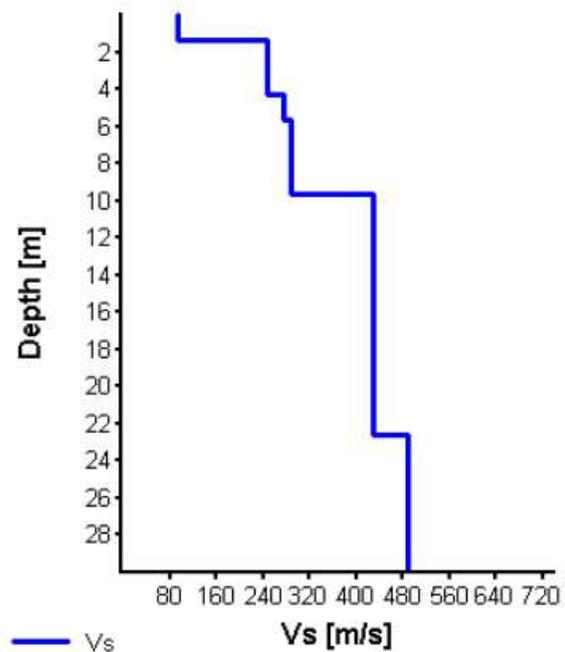


Fig. 42 - HVSR08: modellazione sintetica HVSR

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tab. XII - *Tabella di suddivisione delle categorie di suolo*

La classificazione del suolo di fondazione quindi, è stata identificata in base al profilo Vs stimato mediante l'indagine HV8.

- *profondità bedrock sismico: >30 m*
- *V_{SEQ}: 332 m/s*

Pertanto, sulla base delle risultanze delle indagini condotte nell'area (Tab. VI), ai sensi delle normative che attualmente regolano il settore (*Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*, recepita dalla Regione Puglia nel marzo 2004; *DGR Puglia 2 marzo 2004* e dalle modifiche allo stesso portate dal *Consiglio dei ministri con ordinanza n.3431 del 03.05.2005, D.M. 17/01/2018*), si dichiara che:

il sottosuolo oggetto di indagine appartiene alla CATEGORIA "C".

8 CONCLUSIONI MISURE VIBRAZIONALI

Le 8 indagini HVSR hanno permesso di definire in maniera univoca i picchi H/V riferibili ad effetti stratigrafici (Tab. XIII) relativi alla frequenza fondamentale. Per tale picco le misure hanno rilevato frequenze comprese tra 0.253 – 0.427 Hz e valori H/V compresi nel range 4.2÷6.9.

Come mostrato in figura 44 il valore della frequenza relativa al modo fondamentale diminuisce in direzione SE.

Gli ulteriori picchi di risonanza risultano variamente distribuiti nel range di frequenza esaminato e sono associabili a blandi effetti stratigrafici ($1.5 < H/V < 3.3$) nella sequenza indagata.

<i>misura</i>	<i>modo fondamentale</i>
HV1	0.363
HV2	0.349
HV3	0.297
HV4	0.253
HV5	0.427
HV6	0.403
HV7	0.378
HV8	0.322

Tab. XIII - frequenze fondamentali di risonanza

Si ricorda che tale campagna è stata eseguita per una stima in prima approssimazione della categoria di sottosuolo di appartenenza secondo il **D. Min. Infrastrutture 17/01/2018**.

L'elaborazione degli spettri *HV* ha condotto per ogni sito alla stima di un profilo V_s esteso sino a 30 m di profondità. Tutti i siti appartengono alla categoria di sottosuolo "C" ad eccezione del sito *HV1* per il quale è stata stimata una categoria di sottosuolo "B".

Tali valori di V_{SEQ} risultano del tutto indicativi. Pertanto per qualsiasi opera si consiglia l'esecuzione nel luogo di intervento di indagini geofisiche di tipo *MASW* o *Re.Mi.* per la determinazione della rispettiva "categoria di sottosuolo".



Fig. 43 – andamento nello spazio delle V_{SEQ} stimate e dei profili V_s

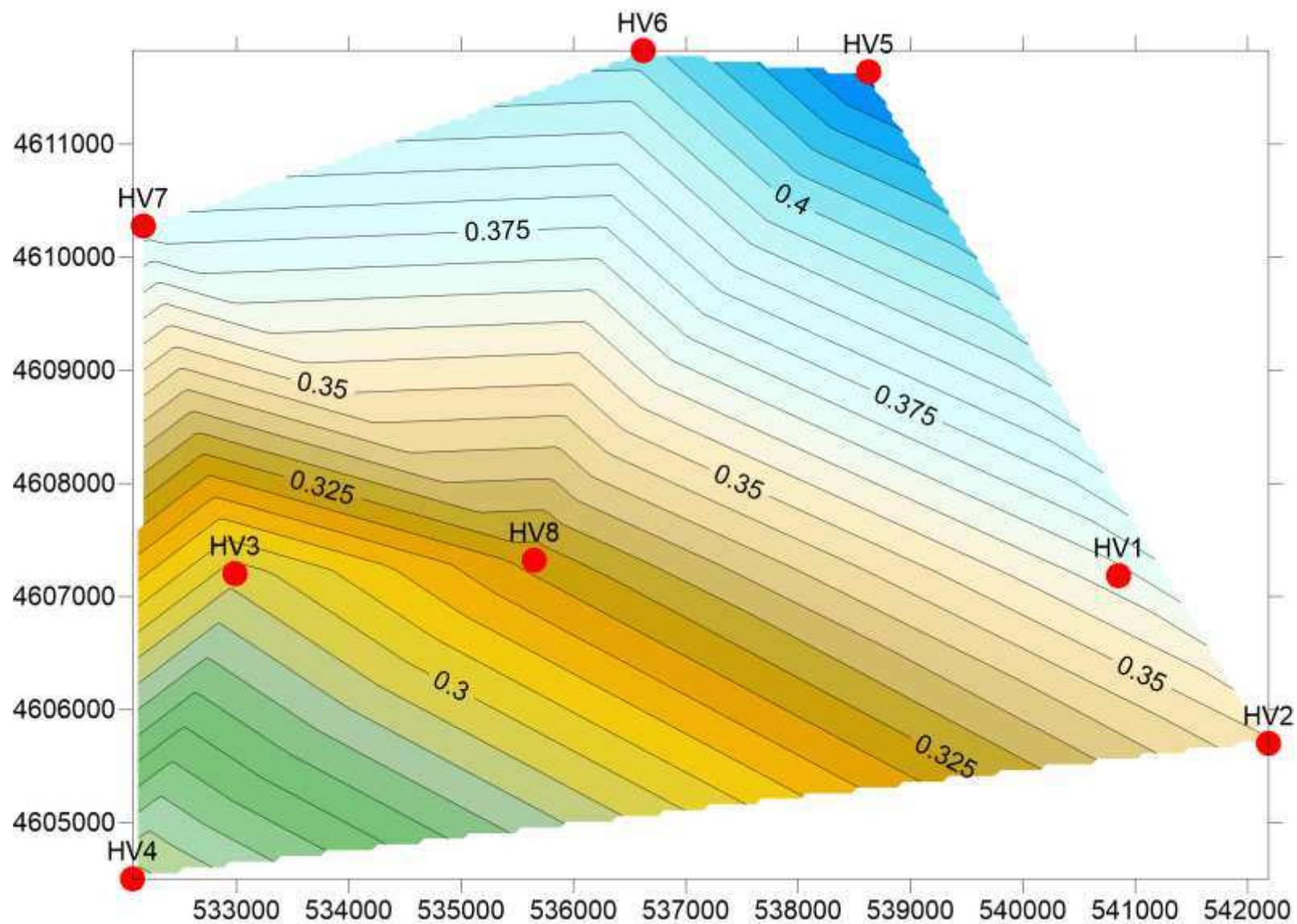


Fig. 44 – andamento nello spazio delle frequenze fondamentali di risonanza

9. BIBLIOGRAFIA

Castellaro. S. - *Caratterizzazione dinamica del sottosuolo ai fini dell'Ingegneria Sismica*" (<http://www.cias-italia.it/PDF>)