RELAZIONE GEOLOGICA
RELAZIONE SULLE INDAGINI
MODELLAZIONE SISMICA



Committente:	***PROVINCIA DELL'AQUILA***	
Commessa:	***LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEI PONTICELLI LUNGO LA S.P. 31 "FORULENSE." COMUNE DI TORNIMPARTE (AQ). PONTICELLO C KM 8+020.***	***C27.25***

SETTEMBRE 2025

ORDINE DEI GEOLOGI DELL'ABRUZZO – GEOLOGO DOTT. PALESTINI CHRISTIAN ALBO N° 258

ORDINE DEI GEOLOGI DELL'ABRUZZO – GEOLOGO DOTT. RICCIARDI ALESSIO ALBO N° 259

SERVIZI PER L'INGEGNERIA – EDILTEST S.r.l. – L'AQUILA

Provincia dell'Aquila Prot.0022324-04/09/2025-p_aq-PG-0014-001100020001-A 0025

INDICE

1 INTRODUZIONE 3

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO GENERALE 4

3 LE SEQUENZE SISMICHE DEL CENTRO ITALIA 7

3.1 IL TERREMOTO DELL'AQUILA DEL 2009 7

3.2 IL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA 2016-2017 8

4 INDAGINI GEOTECNICHE 12

4.1 PROVA PENETROMETRICA DINAMICA 12

4.2 FORMULE PER I PARAMETRI GEOTECNICI 13

4.2.1 Terreni incoerenti 13

4.2.2 Terreni coesivi 14

5 INDAGINI SISMICHE 15

5.1 SISMICA A RIFRAZIONE 15

5.1.1 Cenni teorici 15

5.1.2 Acquisizione ed interpretazione dati 17

5.2 MASW 19

5.2.1 Cenni teorici 19

5.2.2 Acquisizione ed interpretazione dati 20

5.3 HVSR 20

5.3.1 Cenni teorici 20

5.3.2 Acquisizione ed interpretazione dati 21

5.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO 22

5.5 CATEGORIE TOPOGRAFICHE 23

6 MODELLAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEL SITO 25

7 MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO 26

7.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE 26

7.2 MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO 27

8 VERIFICA A LIQUEFAZIONE 29

9 CONCLUSIONI 31

TAVOLE

TAV. 1 CARTA TOPOGRAFICA
TAV. 2 CARTA GEOLOGICA
TAV. 3 CARTA DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA
TAV. 4 CARTA DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA
TAV. 5 CARTA DELLE M.O.P.S.
TAV. 6 UBICAZIONE INDAGINI

ALLEGATI

ALLEGATO 1 | PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

- PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH1
- PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH2
- PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE | Elaborazioni

ALLEGATO 2 | SISMICA A RIFRAZIONE

- SISMICA A RIFRAZIONE SR1 | Sezione sismo stratigrafica
- SISMICA A RIFRAZIONE SR1 | Tabulati
- SISMICA A RIFRAZIONE SR1 | Dromocrone
- SISMICA A RIFRAZIONE SR1 | Sismogrammi

ALLEGATO 3 | MASW

- MASW1
- MASW1 | Sismogrammi

ALLEGATO 4 | HVSR

- HVSR1
- HVSR2

1 INTRODUZIONE

La presente relazione illustra i risultati di uno studio geologico realizzato nel Comune di *TORNIMPARTE (AQ)*, commissionato da *PROVINCIA DELL'AQUILA* e finalizzato al progetto *LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEI PONTICELLI LUNGO LA S.P. 31 "FORULENSE." COMUNE DI TORNIMPARTE (AQ). PONTICELLO C KM 8+020.*

Da un punto di vista cartografico ufficiale, è possibile fare le seguenti considerazioni:

- L'area di studio non è interessata da pericolosità idrogeologica ai sensi della *CARTA DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA* del *P.A.I. - PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO* (TAV. 3);
- L'area di studio non è interessata da pericolosità idraulica ai sensi della *CARTA DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA* del *P.S.D.A. - PIANO STRALCIO DIFESA ALLUVIONI* (TAV. 4);
- L'area di studio è classificata come *Zona 9 - ZONA STABILE SUSCETTIBILE DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE* ai sensi della *CARTA DELLE M.O.P.S.* della *MICROZONAZIONE SISMICA* del territorio comunale (TAV. 5).

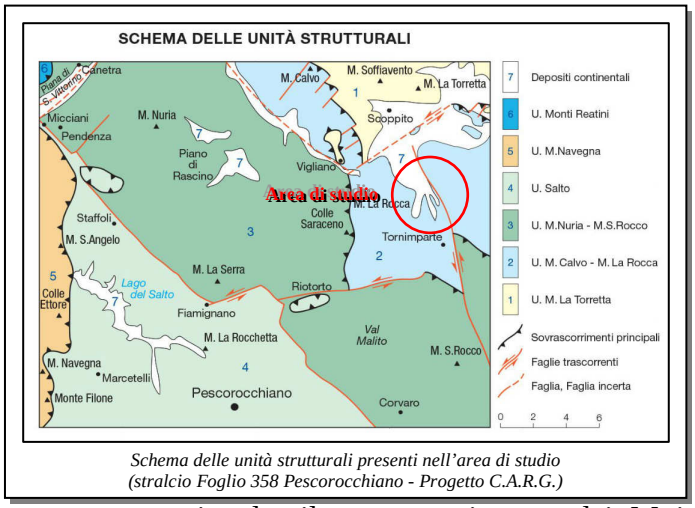
Alla luce del sopralluogo tecnico effettuato e delle difficoltà logistiche del sito, il piano indagini, redatto dal progettista, è stato sviluppato secondo le seguenti fasi:

- ✓ Reperimento di dati bibliografici.
- ✓ Rilevamento geologico e geomorfologico.
- ✓ Realizzazione di n° 2 prove penetrometriche dinamiche DPSH.
- ✓ Realizzazione di n° 1 indagine sismica a rifrazione.
- ✓ Realizzazione di n° 1 indagine sismica MASW.
- ✓ Realizzazione di n° 2 indagini sismiche HVSR.
- ✓ Modellazione geologico-tecnica del sito.
- ✓ Modellazione sismica del sito.
- ✓ Verifica a liquefazione.

Le suddette fasi sono state ritenute idonee a definire le caratteristiche geologico-tecniche e sismiche del sito, fornendo elementi utili per le soluzioni progettuali ai sensi del *D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni."*

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO GENERALE

L'area di studio, compresa nel foglio n° 145 "AVEZZANO" della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, nel foglio n° 358 "PESCOROCCHIANO" del Progetto C.A.R.G. in scala 1:50.000 e nel foglio ovest della Carta Geologica dell'Abruzzo di L. VEZZANI & F. GHISETTI, è ubicata in un'area pedemontana subpianeggiante nella frazione Palombaia del Comune di Tornimparte.



Schema delle unità strutturali presenti nell'area di studio (stralcio Foglio 358 Pescorocchiano - Progetto C.A.R.G.)

Da un punto di vista geologico regionale l'area di studio è parte della cosidetta "zona di incontro" tra l'estremo settore nordorientale del dominio neritico laziale-abruzzese, quello pelagico umbro-marchigianosabino e la fascia di transizione tra piattaforma e bacino. Essa è attraversata per un certo tratto da un importante elemento tettonico, a carattere regionale, il sovrascorrimento dei M.ti Reatini, che rappresenta un segmento della più estesa rampa transpressiva impostatasi sulla fascia di deformazione della master fault liassica, la linea Anzio-Ancona, che costituisce il confine tra Appennino Settentrionale e Appennino Centrale.

L'evoluzione geologica dell'area in esame riflette gli effetti di una intensa tettonica polifasica, che dalle fasi distensive legate al rifting mesogeo si è ulteriormente sviluppata durante il regime di avampaese, articolando sempre più il settore, controllandone progressivamente la paleogeografia, fino alla costruzione di un edificio a pieghe e sovrascorrimenti, dislocato successivamente in seguito allo sviluppo di una intensa tettonica distensiva associata al sollevamento regionale.

In base a proprie caratteristiche litostratigrafiche, strutturali o per una particolare evoluzione tettonica e sedimentaria, nell'area sono presenti sei unità tettoniche principali. Dalla più interna e geometricamente più sollevata, alla più esterna e più bassa, esse sono:

Unità M.ti Reatini, Unità M.te Navegna; Unità Salto; Unità M.te Nuria-M.te S. Rocco; Unità M.te Calvo – M.te della Rocca; Unità M.te La Torretta.

Tutte le unità suddette sono state coinvolte nella strutturazione della catena in un intervallo di tempo compreso tra il Messiniano superiore e la base del Pliocene, secondo una sequenza normale da ovest verso est; tuttavia sono documentate anche riattivazioni fuori sequenza di alcuni dei principali sovrascorrimenti (ad es. la linea Olevano-Antrodoco). Dopo la strutturazione della catena, o addirittura durante le prime fasi di questa, nell'area in esame si sono deposte estese coperture continentali. Per la massima parte queste sono rappresentate da depositi di ambiente lacustre o fluvio-lacustre (limi, sabbie, ghiaie, conglomerati e travertini) che nel Pleistocene inferiore hanno colmato le depressioni tettoniche; sui versanti si rinvengono detriti stratificati, brecce e talora depositi di paleofrane. Tra il Pleistocene inferiore e il Pleistocene superiore si sono verificate ripetutamente nell'area condizioni climatiche freddo-aride in concomitanza delle quali si osserva la deposizione di diversi sintemi.

Di seguito vengono descritte le principali unità litostratigrafiche affioranti in un intorno significativo dell'area di studio.

STRATIGRAFIA DEI DEPOSITI CONTINENTALI

DEPOSITI ALLUVIONALI (Olocene)

Tale formazione è attribuibile ai depositi alluvionali del Torrente Raio ed è costituita da miscele di limi sabbiosi, sabbie limose e ghiaie sabbiose, la cui genesi è da attribuire a processi di sedimentazione di tipo alluvionale. Lo spessore dei depositi alluvionali può raggiungere valori massimi di circa 8-10 m.

Da un punto di vista geomorfologico, l'assetto dell'area risulta fortemente condizionato dall'attività delle dislocazioni tettoniche quaternarie oltre che dal diverso succedersi di processi di erosione e sedimentazione legati all'alternarsi delle fasi climatiche ed all'incisione valliva connessa con il rapido sollevamento regionale verificatisi a partire dalla fine del Pleistocene inferiore. Il territorio di Tornimparte è suddiviso in una parte pedemontana ondulata e abitata ad una quota altimetrica media di 830 m s.l.m., contornata a sud-ovest, ovest e nord-ovest dalle creste di M. Ruella (1.540 m), M. La Piaggia (1.637 m) e M. La Serra (1.599 m) e aperta a nord verso il resto della Conca Aquilana (Scoppito e Sassa),

ed una parte montana in quota lungo le pendici e i contrafforti del gruppo montuoso carsico di Monte San Rocco-Monte Cava (2.000 m) che rappresenta l'elevazione più alta del comune, nonché lo spartiacque con il territorio laziale.

La parte pedemontana è solcata dal corso del Torrente Raio e dai suoi numerosi torrenti-affluenti che raccolgono insieme l'acqua di scolo delle montagne del comune; tale corso d'acqua a carattere tipicamente stagionale si immette poi come affluente destro nell'Aterno nel territorio del comune di L'Aquila.

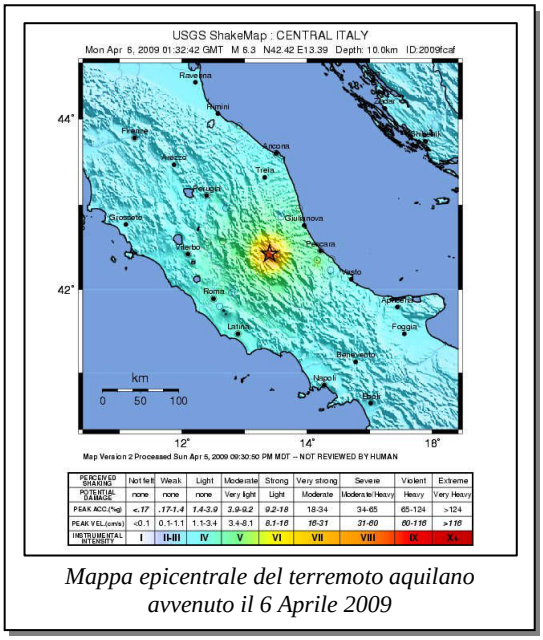
Scendendo nel dettaglio, il ponte oggetto di studio (posto ad una quota di 717 m s.l.m.) è ubicato in corrispondenza del Fosso Peligne, sviluppato in direzione circa N-S. che incide un'area subpianeggiante.

Da un punto di vista idrogeologico, le aree di piattaforma carbonatica appenninica sono caratterizzate da estesi acquiferi, rappresentati dalle sequenze carbonatiche che costituiscono le principali dorsali montuose, la cui permeabilità è molto elevata per fratturazione e carsismo. L'effetto del carsismo si esplica soprattutto nelle aree di ricarica, all'interno dei rilievi, in presenza di aree endoreiche anche di estensione notevole. Questi importanti acquiferi, estesi in genere per diverse centinaia di chilometri quadrati, vanno ad alimentare sorgenti basali di portata elevata, poste alla periferia dei massicci, a quote topograficamente depresse, dove l'acquifero viene tamponato da sedimenti a ridotta permeabilità. I limiti di permeabilità sono costituiti da depositi terrigeni flyschoidi tardomiocenici o da sedimenti plio-quaternari di riempimento delle valli fluviali e delle depressioni tettoniche intramontane. I sedimenti quaternari, costituiti da depositi di versante, alluvioni fluviali e sedimenti lacustri e/o palustri, presentano una permeabilità variabile in funzione della granulometria e della cementazione, generalmente inferiore a quella degli acquiferi carbonatici, consentendo in qualche caso travasi sotterranei delle falde regionali negli acquiferi porosi multistrato.

In particolare, nell'area di studio non si è evidenziata una falda acquifera superficiale fino alle massime profondità investigate (circa 3 m); non si esclude che la falda sia localizzata in profondità.

3 LE SEQUENZE SISMICHE DEL CENTRO ITALIA

3.1 IL TERREMOTO DELL'AQUILA DEL 2009



Mappa epicentrale del terremoto aquilano avvenuto il 6 Aprile 2009

Il terremoto dell'Aquila del 2009 è consistito in una serie di eventi sismici, iniziati nel dicembre 2008 e parzialmente terminati nel 2012, con epicentri nell'intera area della città, della conca aquilana e di parte della provincia dell'Aquila (bassa Valle dell'Aterno, Monti della Laga e Monti dell'Alto Aterno). La scossa principale, verificatasi il 6 aprile 2009 alle ore 3:32, ha avuto una magnitudo momento (MMS) pari a 6.3 (5.8 o 5.9 sulla scala della magnitudo locale), con epicentro in località Roio, nella zona compresa tra le frazioni di Roio Colle, Genzano e Collefracido, interessando in misura variabile buona parte dell'Italia Centrale. In termini di scala Mercalli (legata alla misura dei danni ed agli effetti del terremoto), la stima iniziale dell'INGV è stata tra l'ottavo e il nono grado.

Nelle 48 ore dopo la scossa principale, si sono registrate altre 256 scosse o repliche, delle quali più di 150 nel giorno di martedì 7 aprile, di cui 56 oltre la magnitudo 3.0 ML. Tre eventi di magnitudo superiore a 5,0 sono avvenuti il 6, il 7 e il 9 aprile. Dall'esame dei segnali della stazione INGV aquilana (AQU, ubicata nei sotterranei del Forte spagnolo), sono state conteggiate oltre 10 mila scosse[20].

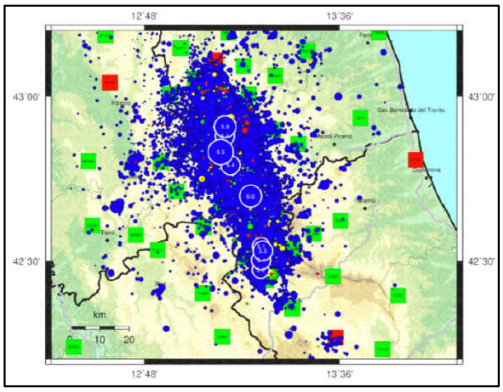
Nei giorni successivi alla scossa principale altri intensi focolai sismici si sono sviluppati a sud-est del capoluogo (Valle dell'Aterno, epicentro Ocre: scosse del 7 e dell'8 aprile 2009 con magnitudo tra 3.0 e 5.6 MMS) e poco più a nord (zona del Gran Sasso, epicentro Campotosto: scosse del 6, 7, 8, 9, 10 e 13 aprile 2009 con magnitudo tra 3.1 e 5.4 MMS). Lo sciame sismico successivo all'evento principale del 6 aprile si è spostato in zone limitrofe a nord-ovest della città ed, in generale, della conca aquilana (Pizzoli, Campotosto e Montereale). Un altro evento di magnitudo 4.7 MMS (4.5 ML) è avvenuto alle ore 22.58 del 22 giugno, con epicentro vicino all'abitato di Pizzoli, a 11 km dall'Aquila; nella stessa

giornata, e soprattutto nella mattinata immediatamente successiva ci sono state anche numerose scosse minori.

La struttura tettonica che ha dato origine all'evento è da individuarsi in una faglia che attraversa il bacino aquilano ad una profondità compresa tra gli 8 ed i 13 km e sul cui piano è avvenuta l'intera sequenza; si tratta di una faglia di tipo normale (estensiva) con andamento nordovest/sudest ed immersione a sudovest, tipica della dorsale appenninica centrale. Le evidenze superficiali di fagliazione, correlate al sisma, sono state individuate maggiormente nel tratto compreso tra Paganica, Tempera e L'Aquila e risultano compatibili con la teorizzata struttura sismogenetica. Ulteriori evidenti manifestazioni sono state rintracciate nella zona del Monte Ocre, a sud sud-est del capoluogo in corrispondenza dell'epicentro dell'evento del giorno 8 aprile di ML 5.3 (Mw 5.5), che va comunque ricompreso nella struttura e nella sequenza principale. Nella notte tra l'8 ed il 9 aprile si è invece attivata con 3 forti eventi (max ML 5.2 - Mw 5.5) la struttura tettonica del Lago di Campotosto. Tutti questi ulteriori terremoti hanno avuto una profondità ipocentrale di circa 15 km, ben superiore a quella del mainshock (8.8 km).

3.2 IL TERREMOTO DEL CENTRO ITALIA 2016-2017

A partire dal 24 agosto 2016, l'Italia centrale è stata interessata da una sequenza sismica di notevole importanza; la sequenza include un numero eccezionalmente alto di terremoti che comprende gli eventi del 24 agosto, quelli del 26 ottobre, quello della mattina del 30 ottobre e i quattro eventi del 18 gennaio 2017.

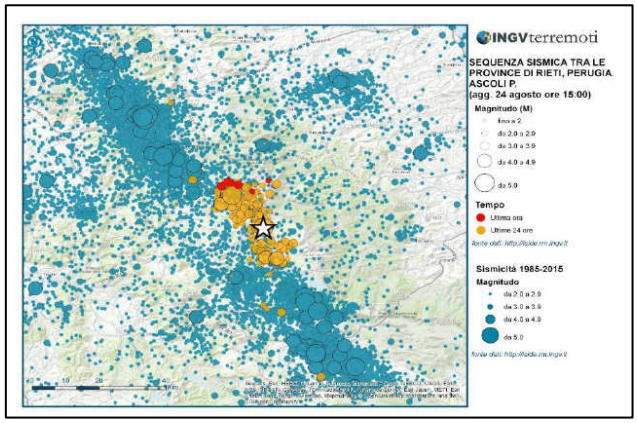


Mappa epicentrale della sequenza sismica dell'Italia centrale aggiornata al 26/04/2017

La prima forte scossa si è avuta il 24 agosto 2016 e ha avuto una magnitudo di M 6.0, con epicentro situato lungo la Valle del Tronto, tra i comuni di Accumoli (RI) e Arquata del Tronto (AP). Due potenti repliche sono avvenute il 26 ottobre 2016 con epicentri al confine umbro-marchigiano, tra i comuni della Provincia di Macerata di Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera. Il 30 ottobre 2016 è stata registrata la scossa più forte, di

magnitudo M 6.5 con epicentro tra i comuni di Norcia e Preci, in Provincia di Perugia. Il 18 gennaio 2017 è avvenuta una nuova sequenza di quattro forti scosse di magnitudo M superiore a 5, con massima pari a 5.5 ed epicentri localizzati tra i comuni aquilani di Montereale, Capitignano e Cagnano Amiterno.

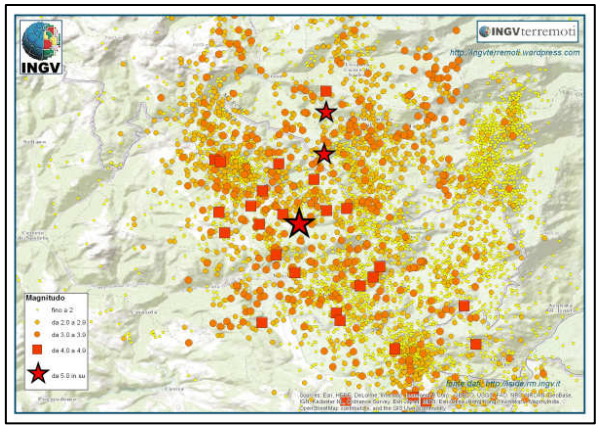
Per quanto riguarda la scossa del 24 agosto 2016, le osservazioni e le analisi preliminari elaborate dall'INGV attraverso rilevazioni sismologiche, geodetiche e geologiche e sulla scorta delle informazioni scientifiche dei processi sismogenetici e della storicità sismica dell'area hanno permesso una prima interpretazione dell'evento. La distribuzione degli eventi principali e delle repliche alla data del 27 agosto, indica un piano principale a direzione variabile tra N140° e N170° e inclinazione tra 45° e 70° SW; nella parte settentrionale è presente anche una faglia coniugata NE immergente.



Sismicità nel settore dell'Appennino interessato dalla sequenza di Amatrice iniziata il 24 agosto 2016 (simboli gialli e rossi).

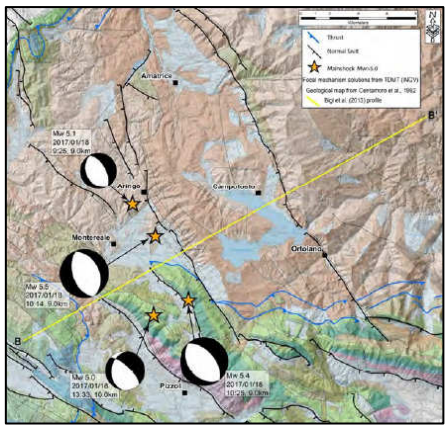
L'area sismogenetica sarebbe caratterizzata dalla presenza di diversi segmenti di faglia con elevata complessità strutturale. La scossa principale avrebbe causato una rottura di un segmento di faglia orientato in direzione NNO-SSE e immergente verso SO. La rottura generata in corrispondenza della città di Accumoli sembrerebbe essersi propagata in direzioni opposte verso Amatrice (direzione S-SE) e verso Norcia (direzione N-NE); non sarebbe ancora chiaro se esista continuità tra le due parti di faglia, oppure se la rottura abbia interessato due segmenti distinti e tra loro separati. Le oltre 2000 repliche localizzate si distribuiscono in una fascia tra Norcia e Amatrice lunga circa 25 km e larga circa 12. Le repliche di magnitudo maggiore sono concentrate ai due estremi della zona attivata con la scossa principale, in particolare nella zona di Norcia a NW, dove è stata localizzata la replica di magnitudo maggiore M 5.3, e nella zona di Amatrice a SE. L'insieme delle repliche indica l'attivazione di un sistema di faglie orientato in direzione appenninica e interessato da forte complessità interna.

Secondo i dati elaborati da INGV, ottenuti anche tramite rilevazioni satellitari, lo spostamento della faglia alle 03:36 del 24 agosto avrebbe causato, a livello di superficie, un abbassamento del terreno di 15–20 cm, lungo un'ampia fascia di territorio allungata e parallela alla direzione della faglia; sui due lati di rottura del piano di faglia lo scorrimento dei due lembi di crosta terrestresarebbe compreso tra 0 e 1,3 m.



Sequenza sismica ottobre 2016 (la stella più grande rappresenta l'epicentro dell'evento di magnitudo 6.5 del 30 ottobre e le altre due sono relative ai terremoti avvenuti il 26 ottobre).

Il terremoto del 30 ottobre 2016 delle 06:40:17 è stato l'evento italiano più forte avvenuto in Italia dopo quello di magnitudo 6.9 del 1980 dell'Irpinia. Il meccanismo focale (TDMT) del terremoto del 30 ottobre è del tutto simile a quelli dei terremoti precedenti della sequenza, che mostrano delle faglie distensive orientate in senso SSE-NNW. ll piano di rottura del terremoto di M 6.5 del 30 ottobre 2016 si è propagato verso la superficie ed ha prodotto una vistosa fagliazione sul terreno lungo il Sistema di faglia Vettore-Bove. Su questa base si è potuta mappare una rottura in superficie che si estende con continuità per un minimo di 15 km tra Castelluccio di Norcia e Ussita. La rottura cosismica si è prodotta su più piani di faglia del sistema tettonico, ad esempio lungo il settore del Monte Vettore è stata riconosciuta l'attivazione di tre faglie sintetiche e di due strutture tettoniche antitetiche. Le entità delle dislocazioni sono importanti e raggiungono i 2 m prevalentemente sulla componente verticale della rottura lungo i piani di faglia principali, ovest immergenti, sia in roccia che in depositi incoerenti.



Mappa geologica ed epicentri degli eventi di Magnitudo > 5 del 18 gennaio 2017.

Il 18 gennaio del 2017 si sono verificate quattro scosse molto intense in un arco di tempo poco superiore alle quattro ore: la prima alle 10:25 di magnitudo M 5.1 con epicentro a Montereale; la seconda di magnitudo M 5.5 alle 11:14 con epicentro a Capitignano; la terza alle 11:25 di magnitudo M 5.4

con epicentro a Pizzoli; la quarta di magnitudo M 5.0 alle 14:33 con epicentro a Cagnano Amiterno. Queste nuove scosse hanno coinvolto tutti i paesi già colpiti dai precedenti eventi sismici dell'Abruzzo, delle Marche, del Lazio e in parte dell'Umbria. Questi eventi sono stati localizzati dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV in un'area lunga circa 10-15 km in direzione appenninica e larga circa 5-6 km che si trova in una zona compresa tra l'area interessata dalla sequenza sismica del 2009 e la parte meridionale della sequenza sismica iniziata il 24 agosto scorso in Italia centrale.

La faglia coinvolta dagli eventi del gennaio 2017 appartiene al sistema di faglie dei Monti della Laga, il cui settore più settentrionale si è attivato con l'evento del 24 agosto. Il terremoto storico più prossimo alla zona è quello del 2 febbraio 1703 di magnitudo M 6.7, ma i dati geologici disponibili indicano che questo evento sarebbe avvenuto sulle faglie più occidentali (es. Pizzoli, Monte Marine).

4 INDAGINI GEOTECNICHE

4.1 PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infissione a percussione di una punta conica all'interno del terreno.



Esecuzione delle prove penetrometriche dinamiche

Lo strumento utilizzato è un penetrometro tipo *GEO DEEP DRILL* assegnato, secondo la classificazione ISSMFE (1988), alla categoria superpesante (DPSH). La prova consiste nel misurare il numero di colpi necessari ad infiggere, per profondità progressive di 20 cm, una punta conica con sezione pari a 20 cm^2 mediante la caduta a gravità, da un'altezza di 75 cm, di un maglio di 73 kg su una batteria di aste collegate con la punta stessa. Come è noto, la penetrazione dinamica di punte coniche battute nel terreno consente un riconoscimento di massima delle caratteristiche di resistenza dei terreni attraversati. Inoltre, dall'analisi del *trend* del numero di colpi e dalla visione del materiale recuperato sulle aste estratte, è possibile ottenere informazioni sulle caratteristiche litologiche dei termini e sull'eventuale presenza di acqua.

Parametro caratteristico dello stato d'addensamento di un terreno incoerente e della consistenza di un terreno coesivo è R_d (*resistenza di rottura dinamica alla punta*). Tale parametro è ricavabile dalla *formula degli OLANDESI*:

$$R_d = \frac{M^2 \cdot h}{A \cdot e \cdot (M + I + P)}$$

dove:

M = peso del maglio (73 kg);

h = altezza di caduta del maglio (75 cm);

A = sezione della punta conica (20 cm^2);

e = 20/N dove N corrisponde al numero di colpi per ogni approfondimento di 20 cm;

I = peso dell'incudine (30 kg);

P = peso della batteria delle aste (6,4 kg/m).

Un'ampia casistica di prove condotte ha mostrato delle precise correlazioni tra le *DPSH* e le prove penetrometriche dinamiche standard (*SPT*).

In linea di massima il numero di colpi N_{DPSH} per infissioni di 20 cm è legato al numero di colpi N_{SPT} per infissioni di 30 cm dalla seguente relazione:

$$N_{SPT} \cong 1{,}75 \cdot N_{DPSH}$$

Questo risultato sperimentale offre la possibilità di utilizzare la vasta bibliografia delle prove *SPT* per lo studio delle caratteristiche geotecniche dei terreni granulari e coesivi.

4.2 FORMULE PER I PARAMETRI GEOTECNICI

4.2.1 Terreni incoerenti

Stato di addensamento (Classificazione A.G.I., 1977)

N_{SPT}	Stato di addensamento
0 – 4	Sciolto
4 – 10	Poco addensato
10 – 30	Moderatamente addensato
30 – 50	Addensato
> 50	Molto addensato

Peso di volume (TERZAGHI-PECK, 1967)

$$\gamma\ (\mathrm{t/m^3}) = 1{,}141 \cdot N_{SPT}^{\ 0{,}1177} \qquad \textit{Terreno secco}$$

Densità relativa (GIBBS-HOLTZ, 1957)

N_{SPT}	D_r
0 – 4	0 – 15%
4 – 10	15 – 35%
10 – 30	35 – 65%
30 – 50	65 – 85%
> 50	85 – 100%

Angolo di attrito (SHIOI E FUKUNI, 1981)

$$\varphi\,(^\circ) = 15 + \sqrt{15 \cdot N_{SPT}}$$

Modulo di elasticità

E' (kg/cm^2) = 2,5· (N_{SPT} + 15) *Sabbie sature*
E' (kg/cm^2) = 5· (N_{SPT} + 15) *Sabbie poco addensate*
E' (kg/cm^2) = 180 + 7,5·N_{SPT} *Sabbie molto addensate*
E' (kg/cm^2) = 12· (N_{SPT} + 6) *Sabbie ghiaiose*
E' (kg/cm^2) = 3· (N_{SPT} + 6) *Sabbie limose*
E' (kg/cm^2) = 3,2· (N_{SPT} + 15) *Sabbie argillose*

4.2.2 Terreni coesivi

Stato di consistenza (Classificazione A.G.I., 1977)

N_{SPT}	Stato di consistenza
< 2	Privo di consistenza
2 – 4	Poco consistente (molle)
4 – 8	Moderatamente consistente
8 – 15	Consistente
15 – 30	Molto consistente
> 30	Estremamente consistente (duro)

Peso di volume (BOWLES, 1967)

$$\gamma \text{ (t/m}^3\text{)} = 1{,}6314 \cdot N_{SPT}^{\ 0{,}0714}$$

Coesione non drenata

$$C_u \text{ (t/m}^2\text{)} = 0{,}625 \cdot N_{SPT} \quad N_{SPT} < 8$$
$$C_u \text{ (t/m}^2\text{)} = 0{,}665 \cdot N_{SPT} \quad N_{SPT} \geq 8$$

Modulo di elasticità non drenato

$$E_u \text{ (t/m}^2\text{)} = 150 \cdot C_u$$

Modulo di compressibilità edometrica

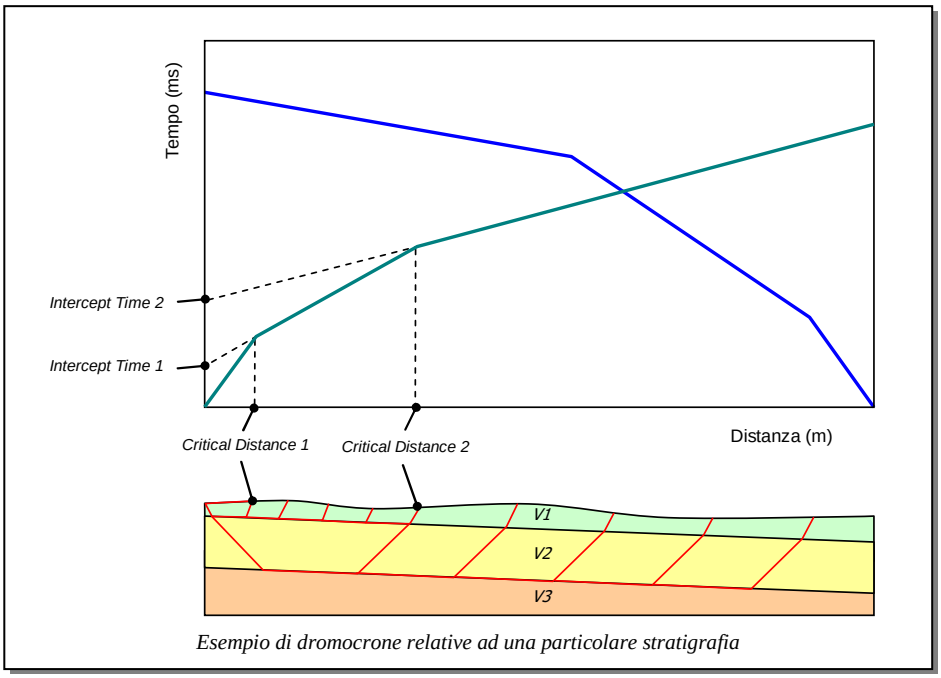
$$M \text{ (t/m}^2\text{)} = 0{,}625 \cdot E_u$$

5 INDAGINI SISMICHE

5.1 SISMICA A RIFRAZIONE

5.1.1 Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura del tempo necessario affinché una perturbazione di origine elastica si trasmetta dalla sorgente (*shot point*) ai ricevitori (*geofoni*), i quali rilevano gli arrivi delle onde sismiche ed inviano i segnali ad un'unità di acquisizione (*sismografo*) che registra i sismogrammi. Rappresentando in un sistema di assi cartesiani i tempi di arrivo delle onde sismiche ai geofoni in funzione della loro distanza dal punto di scoppio, si ottiene una famiglia di curve tempi-distanze (*dromocrone*) funzione delle caratteristiche geologiche locali. Nella seguente figura sono rappresentate le dromocrone relative alle onde dirette e rifratte nel caso di una semplice struttura geologica.



Esempio di dromocrone relative ad una particolare stratigrafia

Considerando il diagramma spazio-tempo, si nota che ad una certa distanza dallo scoppio (*Critical Distance 1*) le onde dirette arrivano contemporaneamente alle onde rifratte sulla prima interfaccia. Per i geofoni posti ad una distanza minore di tale punto, il primo arrivo è rappresentato da un'onda diretta che viaggia nel primo mezzo, a velocità *V1*. Per distanze maggiori della *Critical Distance 1*, il primo arrivo corrisponde all'onda rifratta sulla prima interfaccia, che viaggia ad una velocità *V2*. Tale condizione si mantiene fino a quando, oltre la *Critical Distance 2*, il primo arrivo corrisponde all'onda rifratta sulla seconda

interfaccia, che viaggia a velocità *V3*. Si possono costruire dromocrone anche nel caso di *n* strati, purché le velocità aumentino sempre con la profondità. Ogni punto angolare indica il passaggio da uno strato al successivo e le velocità sono indicate dall'inverso della pendenza dei rispettivi rami di dromocrone; se gli strati sono poco potenti e con velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi ed anche la corrispondente dromocrona risulterà curva.

La prospezione sismica a rifrazione è particolarmente indicata per ottenere informazioni nel caso di strutture geologiche caratterizzate da uno strato compatto rifrangente (*bedrock*) posto al di sotto di una serie stratigrafica dotata di velocità di propagazione delle onde sismiche inferiore. Nella maggior parte dei casi, la prospezione sismica individua uno strato superficiale definito *aerato*, rappresentato da un sistema misto costituito dal terreno e dall'aria presente nei vuoti intergranulari. L'aerato è uno strato dotato di una forte attenuazione sismica e spesso presenta velocità sismiche inferiori alla velocità del suono (≅ 340 m/s); questo fenomeno, tipico dei *porous media*, dipende dal fatto che nei primi metri di terreno si ha un'interferenza distruttiva tra le onde elastiche (a traiettoria principalmente orizzontale) che si propagano nello scheletro solido e quelle che si propagano nell'aria intergranulare; il fenomeno, reso molto complesso da parametri quali la disposizione spaziale dei granuli e la sinuosità delle traiettorie sismiche, fa si che la velocità sismica del sistema terreno-aria possa risultare inferiore a quella delle singole fasi. I principali limiti della sismica a rifrazione risiedono nell'impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità di propagazione delle onde sismiche decrescente con la profondità. In tal caso, l'onda rifratta dallo strato sottostante meno veloce subisce una flessione verso il basso e non può tornare in superficie; in tale situazione, lo strato sottostante meno veloce è definito *orizzonte muto*.

Altra limitazione si ha in presenza di strati profondi di modesto spessore; in questo caso, l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone e non è quindi rilevabile. Riferendosi inoltre alla correlazione con i contatti litostratigrafici individuati in sondaggi geognostici, si precisa che l'identificazione degli strati rilevati con la prospezione sismica dipende dal grado di effettiva omogeneità dello spessore litostratigrafico; infatti, spesso interferiscono, con effetti opposti, fenomeni di cementazione o di degradazione al tetto e/o al letto dello strato geologico, i quali causano rispettivamente un innalzamento e un

abbassamento dei valori della velocità delle onde sismiche. Per tale motivo, non sempre le discontinuità fisiche rilevate con l'indagine sismica corrispondono a semplici limiti stratigrafici e geologici.

5.1.2 Acquisizione ed interpretazione dati

Come generatore di onde sismiche è stato utilizzato un martello di 10 kg che, tramite un operatore, batte su una piastra metallica per generare onde P e/o S. Per ogni *shot point* viene preparata nel terreno una piazzola, asportando i primi centimetri di suolo vegetale scadente, in cui si posiziona la piastra; in questo modo si ottiene una migliore energizzazione sismica in termini di ampiezza e di spettro dell'impulso immesso, con un incremento del rapporto segnale/rumore. Come sensori sono stati utilizzati geofoni verticali da 4,5-14 Hz (onde P) e/o geofoni orizzontali da 10 Hz (onde S), infissi nel terreno o poggiati sulla pavimentazione ad intervalli costanti (≤ 5 m) e collegati tramite cavi elettrici multipolari all'unità di acquisizione dati; quest'ultima è costituita da un sismografo modello Ambrogeo ECHO 24 a 12-24 canali, collegato ad un notebook.

Eseguito il posizionamento dei geofoni sul terreno (o pavimentazione), collegati questi tramite morsetti bipolari ai cavi elettrici e questi ultimi al sismografo, sono stati realizzati alcuni *shots* di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione del sismografo in termini di determinazione del livello del rumore di fondo ed impostazione delle amplificazioni dei canali di registrazione. Effettuata la taratura della strumentazione, si è proceduto all'acquisizione sismica effettuando l'energizzazione (o somma di energizzazioni) su ciascun punto d'impatto (inizio, fine linea e posizioni intermedie). L'istante di tempo zero, ovvero il segnale d'inizio registrazione, è inviato allo strumento da uno *shock-sensor (hammer switch)* posto direttamente sul martello *(trigger).*



Fasi di acquisizione della linea sismica

I sismogrammi acquisiti sono stati, in primo luogo, sottoposti ad una fase di *processing* digitale consistente in filtraggi (*band-pass*, *high-cut*, *low-cut*), amplificazioni (*gain*, *amplitude factor*) ed equalizzazioni (*trace equalisation*), al fine di ridurre rumori di fondo e strumentali dai sismogrammi, aumentando il rapporto segnale/rumore ed esaltando i primi arrivi delle onde sismiche.

Successivamente si è passati alla fase d'interpretazione consistente, inizialmente, nell'individuazione dei primi arrivi (*First Break Point* o *FBP*) delle onde sulle tracce sismiche; da questi sono state ottenute le dromocrone. L'interpretazione delle dromocrone è stata effettuata utilizzando, in un primo tempo, il metodo *Intercept time* per definire le velocità reali dei mezzi e le profondità dei rifrattori sotto i punti di scoppio; per determinare con esattezza la velocità sismica del *bedrock* (il sismostrato più profondo), si è utilizzato il metodo *True velocity*.

Successivamente sono stati usati i metodi *Delay Time*, *Generalized Reciprocal Method (GRM)* e *Ray Tracing* tomografico per avere una migliore interpretazione dei dati acquisiti. Il metodo d'interpretazione *Delay Time* fa uso della sovrapposizione degli arrivi provenienti dal medesimo rifrattore, ottenuti dalla comparazione delle registrazioni omologhe in linea; in questo modo, si calcola il tempo di ritardo *(Delay Time*) con il quale può essere stimata la profondità del rifrattore in questione sotto ogni singolo geofono dello stendimento sismico.

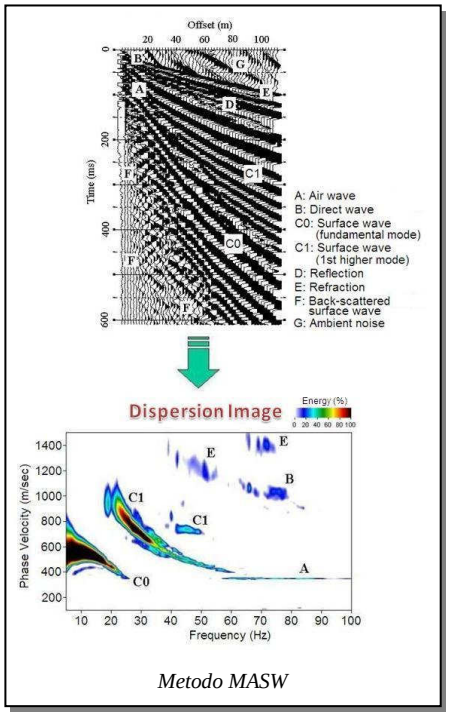
Il metodo d'interpretazione *Generalized Reciprocal Method (GRM, PALMER, 1980)* è una generalizzazione del metodo *Delay Time* ed è utilizzato per una migliore ricostruzione della geometria del *bedrock*.

Il metodo d'interpretazione *Ray Tracing* consente di effettuare una tomografia sismica del terreno, affinando le interpretazioni ottenute dai precedenti metodi; partendo, infatti, dal modello di terreno elaborato attraverso i metodi classici, il *Ray Tracing* scompone il mezzo in celle a differente velocità sismica, quindi vengono simulate, attraverso un metodo d'inversione iterativa, le traiettorie dei raggi sismici nel terreno e si ricostruiscono le relative dromocrone, arrivando alla definizione di un modello di terreno le cui dromocrone calcolate si avvicinano a quelle misurate.

5.2 MASW

5.2.1 Cenni teorici

Il metodo *MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)* studia la propagazione delle onde superficiali dalla sorgente (*shot point*) ai ricevitori (*geofoni*) e permette di definire il profilo di velocità delle onde di taglio (V_S). Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di *Rayleigh*, le quali risultano essere soggette al fenomeno della *dispersione*: in un mezzo stratificato, onde con diversa lunghezza d'onda si propagano con diverse velocità di fase. Tale fenomeno è dovuto al fatto che onde ad alta frequenza si propagano negli strati superficiali lenti (quindi danno informazioni sulla parte più superficiali del suolo) mentre onde a bassa frequenza si propagano negli strati profondi veloci (quindi danno informazioni sugli strati più profondi).



Metodo MASW

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio regolare e con stratificazione parallela, per cui una limitazione alla sua applicabilità è rappresentata da strati significativamente pendenti (più di 20-30°) e topografia irregolare.

La determinazione della velocità delle onde di taglio (V_S) tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) e S (26%).

I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

5.2.2 Acquisizione ed interpretazione dati

Come generatore di onde sismiche è stato utilizzato un martello di 10 kg che, tramite un operatore, batte su una piastra metallica, mentre come sensori sono stati utilizzati geofoni verticali da 4,5 Hz, infissi nel terreno o poggiati sulla pavimentazione ad intervalli costanti (≤ 5 m) e collegati tramite cavi elettrici multipolari all'unità di acquisizione dati; quest'ultima è costituita da un sismografo modello Ambrogeo ECHO 24 a 12-24 canali, collegato ad un notebook. Le energizzazioni sono state effettuate ad inizio e/o fine linea, ad una distanza dal 1° geofono (*offset*) pari a 1-5 volte la distanza intergeofonica.

I sismogrammi acquisiti sono stati, in primo luogo, sottoposti ad una fase di *processing* digitale (*stacking*, *dc remove*, *cuttings*, *trace killing*), al fine di ridurre i rumori di fondo e strumentali dai sismogrammi, aumentando il rapporto segnale/rumore ed esaltando le onde di superficie.

Successivamente si è passati alla fase d'interpretazione consistente, inizialmente, nell'analisi spettrale dei sismogrammi ed estrazione della curva di dispersione mediante *picking* nel dominio *FK* e *FV*; infine, attraverso un metodo d'inversione iterativa, si arriva alla definizione di un profilo di V_S ottimale, per il quale si ha la migliore corrispondenza tra curva di dispersione calcolata e misurata.

5.3 HVSR

5.3.1 Cenni teorici

Il rumore sismico ambientale (*noise*), presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento), dall'attività antropica e dall'attività dinamica terrestre; tale rumore è definito *microtremore* in quanto riguarda oscillazioni molto piccole (10^{-15} $[m/s^2]^2$ in termini di accelerazione) e molto inferiori a quelle indotte dai terremoti.

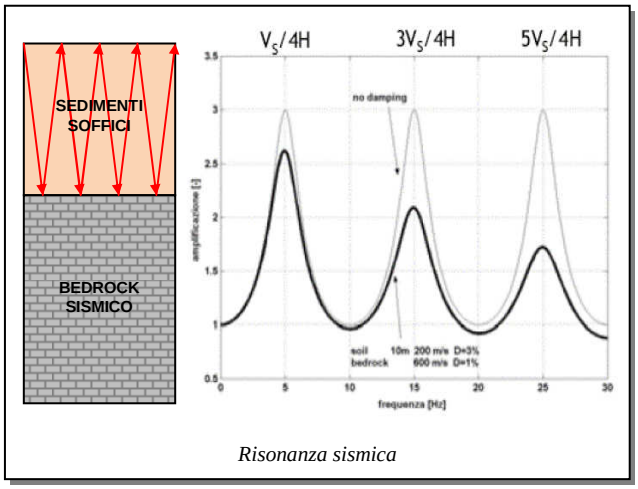


Esecuzione delle misure HVSR

Lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno pianeggiante presenta l'andamento illustrato in figura, dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati

come originati dalle onde oceaniche; tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie ma anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali, che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

In generale, nel tragitto dalla sorgente ad un sito in superficie, le onde elastiche subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti ed attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato; nei microtremori, quindi, è presente una parte debolmente correlata nel segnale che contiene informazioni relative ai mezzi attraversati. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene un'informazione nascosta all'interno del rumore casuale e che può essere estratta attraverso opportune metodologie.



Risonanza sismica

5.3.2 Acquisizione ed interpretazione dati

L'acquisizione dei microtremori è stata effettuata con tromografo digitale Micromed TROMINO®.

Le indagini sono state effettuate posizionando il tromografo sul terreno (asportando i primi centimetri di suolo al fine di ottenere un buon accoppiamento) e/o sulla struttura ed effettuando una registrazione di durata pari a 10-20 minuti.

L'archiviazione ed elaborazione dati è stata effettuata attraverso il software *Grilla*, il quale permette di suddividere ognuna delle 3 componenti del segnale registrato in finestre temporali (es. 20 s), per ognuna delle quali vengono calcolati gli spettri in frequenza, vengono lisciati con una funzione di *smoothing* (es. *Triangular windows* 10%) e vendono mediati al fine di limitare i disturbi indotti da rumori transitori.

L'analisi che si è maggiormente consolidata nello studio dei microtremori è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale o *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)*, applicata da NOGOSHI e IGARASHI (1970) e resa popolare principalmente da NAKAMURA (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Il metodo di NAKAMURA si basa sulle seguenti ipotesi:

- le sorgenti dei microtremori sono locali, trascurando qualsiasi contributo dovuto a sorgenti profonde;
- le sorgenti dei microtremori in superficie non influenzano i microtremori alla base;
- la componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione locale.

In un sistema bistrato, in cui una coltre sedimentaria con velocità delle onde di taglio V_S sovrasta un *bedrock*, la somma tra onde incidenti e riflesse genera ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente è 4 volte (o suoi multipli dispari n) lo spessore H del primo strato. La curva *HVSR* mostrerà un picco per la frequenza fondamentale di risonanza f pari a:

$$f = n \cdot \frac{V_S}{4H}$$

In un sistema multistrato, con alternanza tra strati di spessore h_i e con velocità V_{Si}, la frequenza fondamentale di risonanza f è pari a:

$$f = \frac{1}{4\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

Attraverso un metodo d'inversione, si determina un profilo di V_S ottimale, per il quale si ha la migliore corrispondenza tra curva *HVSR* calcolata e misurata.

5.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO

A) *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.

B) *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.

C) *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.

D) *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.

E) *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.

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dall'espressione:

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

dove H rappresenta la profondità del substrato (definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s), h_i e $V_{S,i}$ indicano lo spessore (in m) e la velocità (in m/s) delle onde di taglio S dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo H = 30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

5.5 CATEGORIE TOPOGRAFICHE

T1 - Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°.

T2 - Pendii con inclinazione media i > 15°.

T3 - Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° ≤ i ≤ 30°.

T4 - Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°.

Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

6 MODELLAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEL SITO

Dall'insieme dei dati emersi dal rilevamento geologico-geomorfologico, da quelli bibliografici e dall'esecuzione delle indagini in sito, si è potuto ricostruire l'assetto litostratigrafico e geotecnico del sito indagato.

Nell'area di studio sono presenti i depositi alluvionali del Torrente Raio datati *Olocene-Attuale*; in particolare, al di sotto dei terreni superficiali e di riporto di spessore inferiori al metro, sono presenti sabbie limose poco addensate passanti, a profondità di circa 2 m, a ghiaie sabbiose molto addensate.

Nel sito non si è evidenziata una falda acquifera superficiale ma deboli reflui di percolazione in corrispondenza dei livelli più permeabili; non si esclude che la falda sia localizzata in profondità, in corrispondenza dei terreni prevalentemente ghiaiosi.

È possibile schematizzare il terreno nel seguente profilo litotecnico cui il progettista può fare riferimento per le sue valutazioni di carattere tecnico. Si precisa che le profondità riportate in tabella rappresentano una media dei valori riscontrati nelle singole prove; per avere la caratterizzazione stratigrafica di dettaglio, si rimanda agli elaborati di ciascuna prova penetrometrica dinamica (ALL. 1).

Stratigrafia		Descrizione litologica	Parametri geotecnici
0,5 m		Terreni superficiali e di riporto	γ' = 1,75 - 1,85 t/m^3 φ' = 24 - 26° c' = 0 t/m^2
2,1 m		Sabbie limose *Poco addensate*	γ' = 1,70 - 1,80 t/m^3 φ' = 26 - 28° c' = 0 - 0,1 t/m^2 D_r = 40 - 60% M = 450 - 650 t/m^2
		Ghiaie sabbiose *Molto addensate*	γ' = 2,00 - 2,20 t/m^3 φ' = 33 - 35° c' = 0 t/m^2 D_r = 80 - 90% M = 2.000 - 3.000 t/m^2

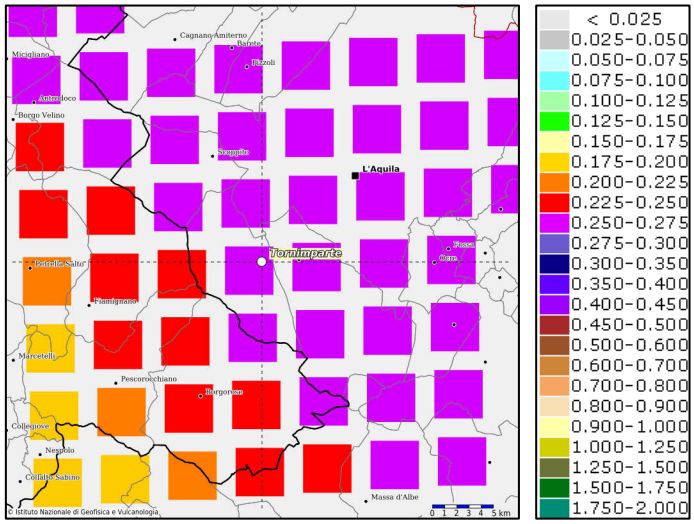
γ' = peso di volume; φ' = angolo di attrito; c' = coesione efficace; D_r = densità relativa; M = modulo edometrico

7 MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO

7.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

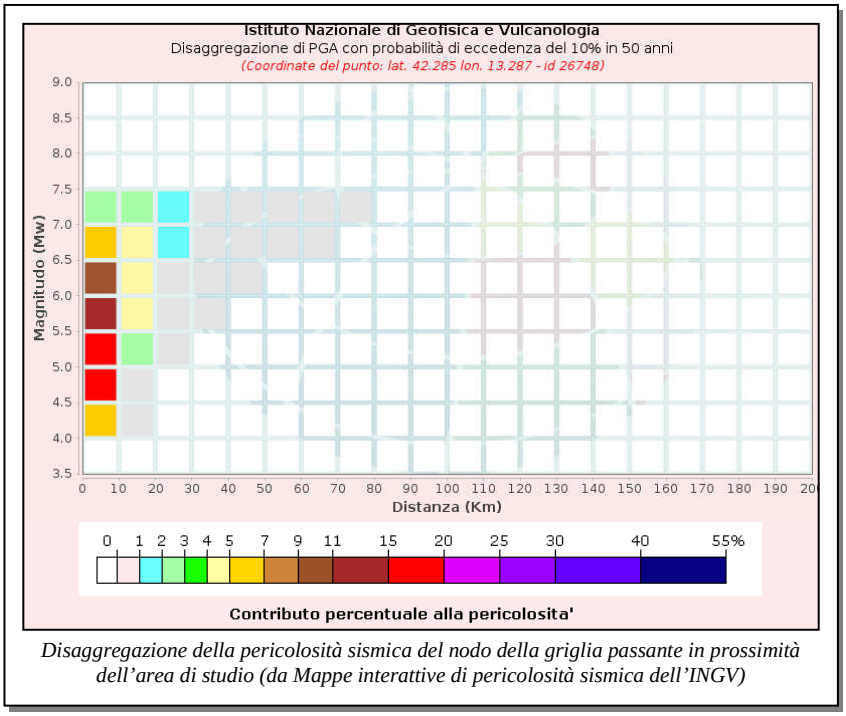
Le attuali normative vigenti permettono di definire un valore di pericolosità sismica di base, calcolato, per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali.

Allo stato attuale, la pericolosità sismica (su reticolo di riferimento e nell'intervallo temporale di riferimento) è fornita dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia) ed è, per convenzione, quella espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi (V_S > 800 m/s; cat. A, punto 3.2.1 del 30 D.M. 14/09/2005). L'INGV ha messo a disposizione sul proprio sito web una mappa interattiva della pericolosità sismica di base attraverso cui è possibile visualizzare, per tutto il territorio nazionale, la griglia di riferimento per il calcolo della pericolosità sismica di base in ogni punto. L'area di studio presenta valori di accelerazione massima del suolo rigido ag all'incirca compresi tra le fasce **0,250-0,275 g**. Attraverso il suddetto sito, è anche possibile ottenere, per ogni singolo nodo della griglia di riferimento, il dettaglio dell'analisi di disaggregazione della pericolosità sismica, ovvero la valutazione dei contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito (MCGUIRE, 1995; BAZZURRO & CORNELL, 1999). La forma più classica e comune di disaggregazione è quella di tipo bidimensionale in magnitudo e distanza (M-R) che permette di definire il contributo di sorgenti sismogenetiche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M; in pratica, il processo di disaggregazione in M-R fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso.



Mappa di pericolosità sismica riferita all'area di studio - 84° percentile (da Mappe interattive di pericolosità sismica dell'INGV)

Analogamente alla disaggregazione in M-R, è possibile definire la disaggregazione di tipo tridimensionale in M-R-ε, dove ε rappresenta il numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento (logaritmico) devia dal valore mediano predetto da una data legge di attenuazione, dati M ed R. L'analisi riportata nella figura a lato è riferita alla disaggregazione in **M-R-ε** del nodo della griglia passante in prossimità dell'area di studio; dall'analisi complessiva dei dati, si hanno valori medi di Magnitudo **M = 5,69**, Distanza **D = 7,66 km** ed un **ε = 0,946**.

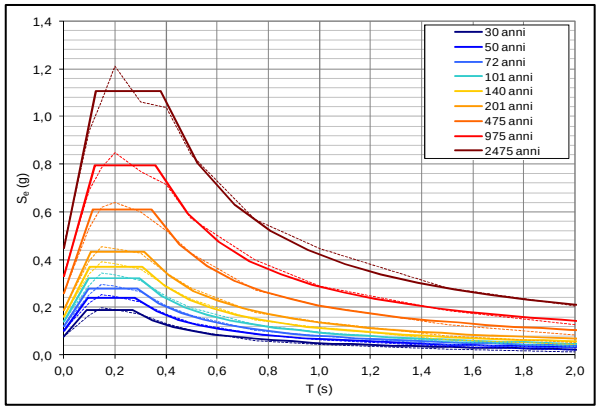


Disaggregazione della pericolosità sismica del nodo della griglia passante in prossimità dell'area di studio (da Mappe interattive di pericolosità sismica dell'INGV)

7.2 MODELLAZIONE SISMICA DEL SITO

Il sito presenta, in accordo con la procedura prevista nell'allegato A del *D.M. 14/01/2008*, i seguenti parametri sismici con i relativi spettri di risposta elastici, che ne definiscono la *pericolosità sismica di base*.

T_R	a_g	F_o	T_C^*
[anni]	[g]	[-]	[s]
30	0,078	2,401	0,271
50	0,102	2,333	0,280
72	0,121	2,320	0,287
101	0,140	2,303	0,294
140	0,161	2,296	0,306
201	0,188	2,308	0,315
475	0,258	2,360	0,343
975	0,331	2,401	0,361
2475	0,449	2,458	0,380



La sismica a rifrazione (ALL. 2) evidenzia una sezione sismostratigrafica con i seguenti sismostrati:

- ✓ Sismostrato 1, con V_P = 270-410 m/s e spessore massimo di circa 2,3 m;
- ✓ Sismostrato 2, con V_P = 710-850 m/s e presente fino a circa 5,0-6,0 m di profondità;
- ✓ Sismostrato 3, con V_P = 2.030 m/s

La MASW (ALL. 3) evidenzia il seguente profilo delle onde di taglio V_S:

MASW1	
Profondità sismostrato (m)	**V_S (m/s)**
1,0	179
2,1	189
3,5	289
5,4	381
7,8	459
11,2	565
16,1	663
22,2	704
30,0	754

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio (da 1 m di profondità) è $V_{S,eq}$ = 549 m/s; alla luce di tali valori, delle caratteristiche stratigrafiche e topografiche dei terreni, il sito indagato ha *Categoria di sottosuolo B* e *Categoria topografica T1*.

Le misure HVSR (ALL. 4) evidenziano le seguenti frequenze di amplificazione sismica al suolo:

HVSR1	HVSR2
Frequenza (Hz)	**Frequenza (Hz)**
7,6	7,3
42,4	58,6
58,8	74,2
82,4	93,0

I picchi ad alta frequenza (≥ 42,4 Hz) sono probabilmente legati ad amplificazioni stratigrafiche superficiali. I picchi a bassa frequenza (≤ 7,6 Hz) sono probabilmente legati ad amplificazioni stratigrafiche profonde.

Di seguito si riporta il modello geofisico del terreno:

Sismostrato	Velocità media onde P V_P (m/s)	Velocità media onde S V_S (m/s)	Profondità media (m)	Coefficiente di POISSON dinamico ν	Modulo di YOUNG dinamico E_d (MPa)	Modulo di taglio dinamico G_d (MPa)	Modulo di compressibilità dinamico K_d (MPa)
1	340	180	2,1	0,31	152	58	130
2	780	340	5,4	0,38	607	220	863
3	2.030	630		0,45	2.297	794	7.183

8 VERIFICA A LIQUEFAZIONE

La liquefazione è un processo di accumulo della pressione del fluido interstiziale che causa, in un terreno non coesivo saturo, la diminuzione della resistenza e/o rigidezza a taglio a seguito dello scuotimento sismico, con possibile raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua, che riempie gli interstizi, eguaglia la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide.

Ai sensi del § 7.11.3.4.2 del *D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*, la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1) Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1 g.
2) Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali.
3) Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N1)60 > 30 oppure qc1N > 180 dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa.
4) Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle Figura 7.11.1(a) ed in Figura 7.11.1(b) del capitolo 7 delle *Norme tecniche per le costruzioni*.

La verifica a liquefazione di un terreno viene effettuata attraverso metodi semplificati che si basano sulla stima di un fattore di resistenza alla liquefazione (*Fs*):

$$Fs = \frac{CRR}{CSR}$$

dove *CRR (Cyclic Resistance Ratio)* indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e *CSR (Cyclic Stress Ratio)* la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

Il valore di *CSR* può essere stimato mediante il metodo di *SEED E IDRISS (1971)*:

$$CSR = 0{,}65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \frac{1}{MSF}$$

dove a_{max} è l'accelerazione orizzontale al suolo, g è l'accelerazione di gravità, σ_v è la tensione verticale litostatica, σ'_v è la tensione verticale litostatica efficace, r_d è un coefficiente correttivo delle tensioni (funzione della profondità), *MSF* è un coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma.

Il valore di *CRR* può essere stimato da prove penetrometriche dinamiche mediante il metodo di *SEED E IDRISS (1982)*:

$$CRR = \frac{Na}{90} \qquad Na = N_f + N_{SPT}\left(\frac{1{,}7}{0{,}7 + \sigma'_v}\right)$$

dove $N_f = 0$ se $d_{50} > 0{,}25$ mm o $N_f = 7{,}5$ se $d_{50} \leq 0{,}25$ mm, d_{50} e il diametro della curva granulometrica corrispondente al passante al 50% (mm), N_{SPT} è il numero di colpi della prova penetrometrica standard e σ'_v è la tensione verticale litostatica efficace (kg/cm^2). Un deposito non è suscettibile a liquefazione se $Fs > 1{,}3$.

È inoltre importante, al di là dei risultati della verifica, valutare le conseguenze della eventuale liquefazione degli strati sabbiosi, tenendo sempre presente che:

- lo strato liquefacibile deve avere spessore maggiore di 3 m oppure due contorni impermeabili;
- la liquefazione può avere effetti sulle fondazioni superficiali solo se lo strato superficiale non soggetto a liquefazione è più sottile di 3 m.

La verifica a liquefazione può essere omessa in quanto si verifica almeno la condizione 4) del § 7.11.3.4.2 del *D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni."*

9 CONCLUSIONI

Lo studio è consistito in un rilevamento geologico e geomorfologico finalizzato all'inquadramento delle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area interessata dall'opera di progetto; più in particolare, sono state individuate le litologie presenti, l'assetto litostratigrafico e i principali processi morfogenetici in atto e quiescenti.

Successivamente, su indicazione del progettista, sono state realizzate n° 2 prove penetrometriche dinamiche DPSH, n° 1 indagine sismica a rifrazione, n° 1 indagine sismica MASW e n° 2 indagini sismiche HVSR, finalizzate alla caratterizzazione geologica, geotecnica e sismica del sito.

Nell'area di studio sono presenti i depositi alluvionali del Torrente Raio datati *Olocene-Attuale*; in particolare, al di sotto dei terreni superficiali e di riporto di spessore inferiori al metro, sono presenti sabbie limose poco addensate passanti, a profondità di circa 2 m, a ghiaie sabbiose molto addensate.

Nel sito non si è evidenziata una falda acquifera superficiale ma deboli reflui di percolazione in corrispondenza dei livelli più permeabili; non si esclude che la falda sia localizzata in profondità, in corrispondenza dei terreni prevalentemente ghiaiosi.

Alla luce dei dati emersi dallo studio, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- L'area di studio non è interessata da pericolosità idrogeologica ai sensi del *P.A.I.*, quindi non è soggetta ai vincoli di edificabilità previsti dal piano.
- L'area di studio non è interessata da pericolosità idraulica ai sensi del *P.S.D.A.*, quindi non è soggetta ai vincoli previsti dal piano.
- L'area di studio è classificata come *Zona 9 - ZONA STABILE SUSCETTIBILE DI AMPLIFICAZIONE SISMICA LOCALE* ai sensi della *CARTA DELLE M.O.P.S.*
- Al di sotto dei terreni superficiali e di riporto di spessore inferiore al metro, il sito presenta terreni dotati di caratteristiche geotecniche inizialmente mediocri che, tuttavia, migliorano sensibilmente con la profondità, raggiungendo caratteristiche ottime a profondità media di circa 2,1 m, in corrispondenza dei depositi ghiaiosi molto competenti.

- Il sito è classificato sismicamente con *Categoria di sottosuolo B* e *Categoria topografica T1*.
- Il sito presenta amplificazione sismica al suolo per le frequenze 7,6 Hz, 42,4 Hz, 58,8 Hz, e 82,4 Hz (HVSR1) e 7,3 Hz, 58,6 Hz, 74,2 Hz, e 93,0 Hz (HVSR2); i picchi ad alta frequenza (≥ 42,4 Hz) sono probabilmente legati ad amplificazioni stratigrafiche superficiali mentre i picchi a bassa frequenza (≤ 7,6 Hz) sono probabilmente legati ad amplificazioni stratigrafiche profonde.
- La verifica a liquefazione può essere omessa in quanto si verifica almeno la condizione 4) del § 7.11.3.4.2 del *D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni."*
- Si consiglia di realizzare adeguate opere di drenaggio e regimazione delle acque di scorrimento superficiale al fine di limitare le infiltrazioni nei terreni, evitare fenomeni di erosione superficiale (e/o dilavamento) e mantenere inalterate le caratteristiche geotecniche dei terreni.
- In caso di opere di scavo, sbancamento e movimento terra, si consiglia di verificare ed eventualmente stabilizzare i fronti di scavo.
- Si raccomanda di adottare soluzioni progettuali compatibili con le caratteristiche geologiche, geotecniche e sismiche illustrate.

L'Aquila, Settembre 2025.



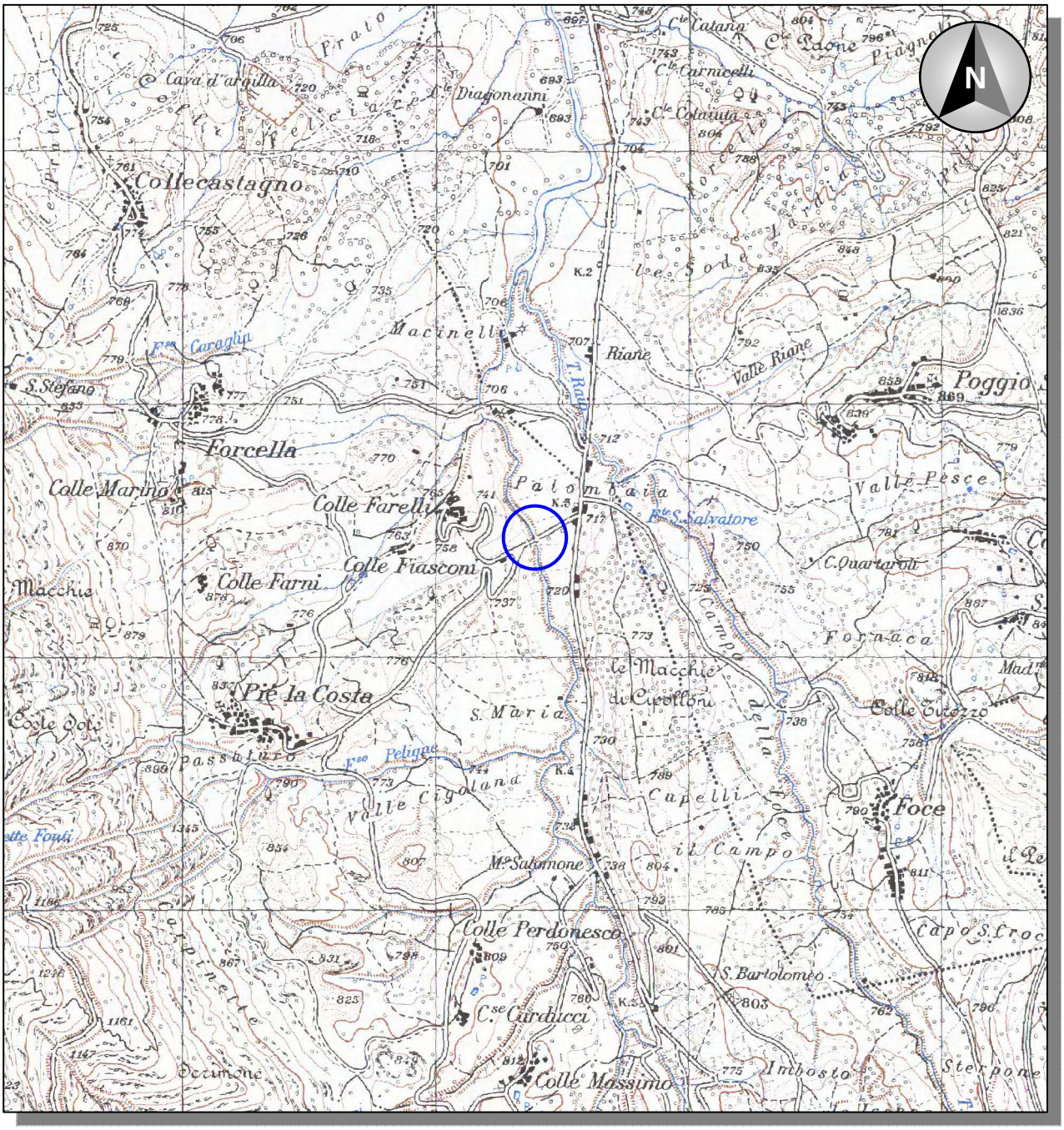
TAVOLE

EDILTEST S.r.l.

CARTA TOPOGRAFICA

Scala 1:25.000

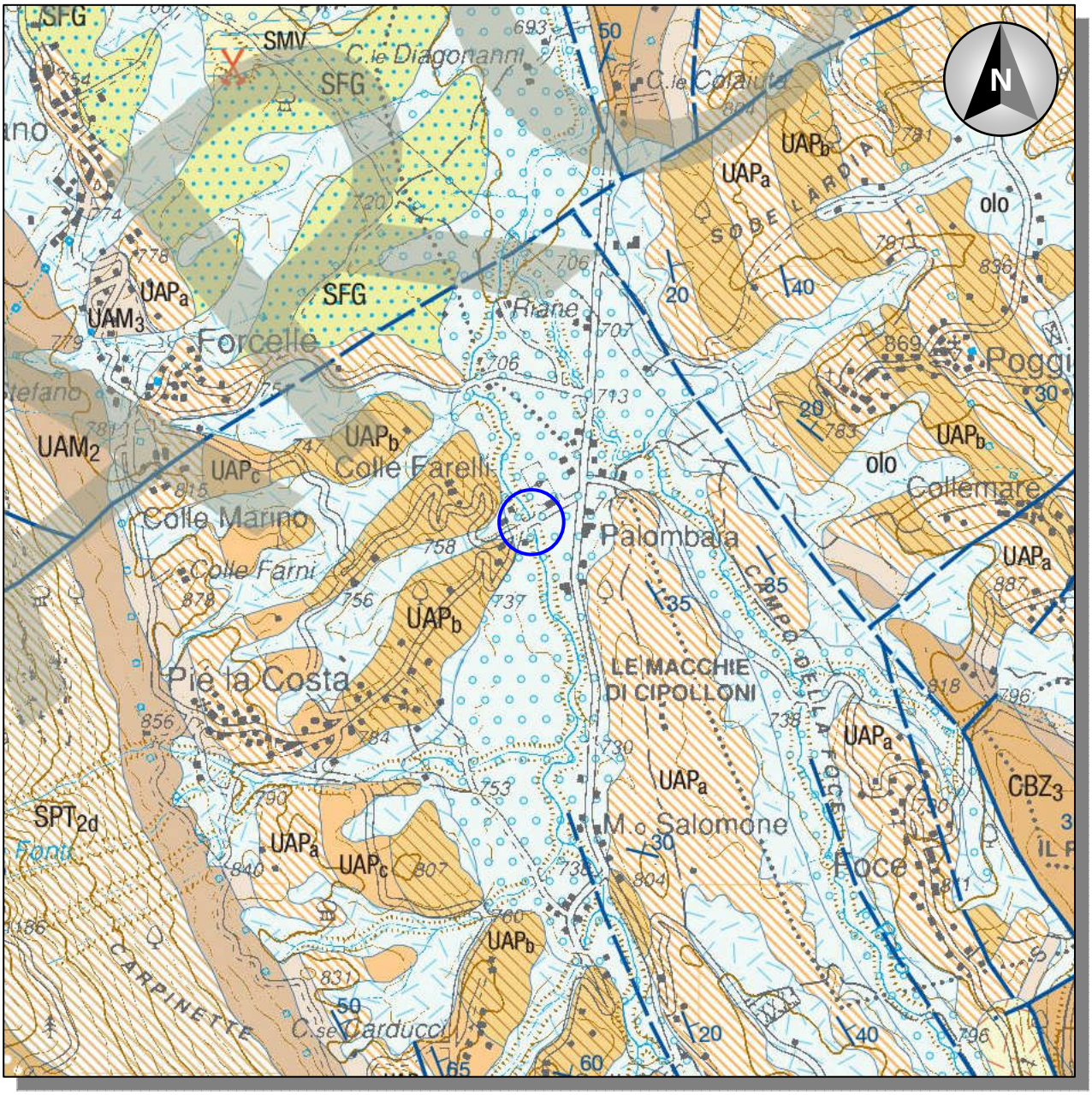
TAV. 1



LEGENDA

Area di studio

EDILTEST S.r.l.	**CARTA GEOLOGICA** *Scala 1:25.000*	**TAV. 2**



LEGENDA

DEPOSITI CONTINENTALI

olo — **DEPOSITI UBIQUITARI - DEPOSITI ATTUALI E RECENTI**
Depositi alluvionali, depositi lacustri, depositi palustri, depositi detritici di versante, depositi eluvio-colluviali.
OLOCENE - ATTUALE

Sovrassegni delle facies sedimentarie quaternarie

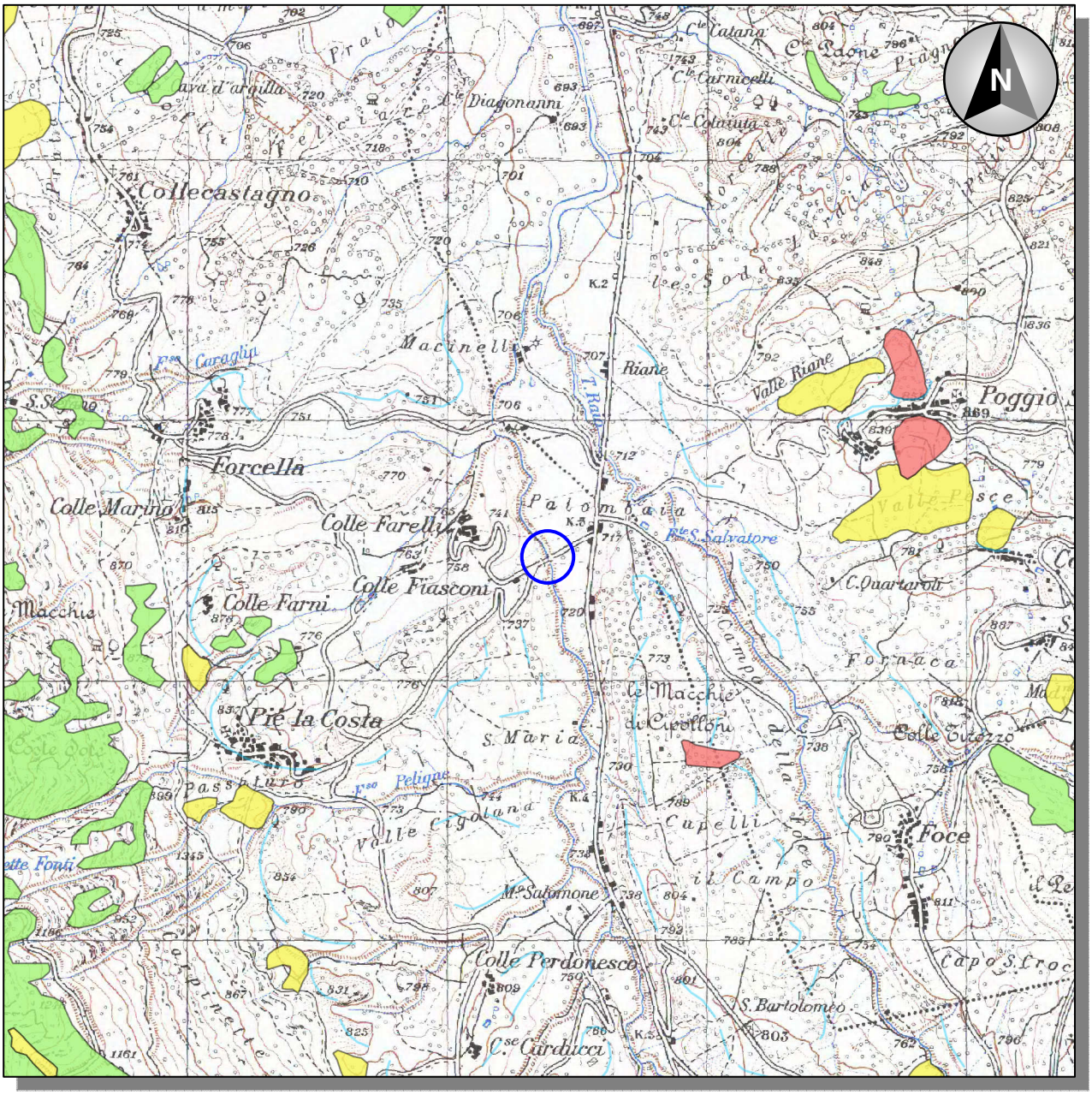
depositi alluvionali prevalentemente ghiaiosi

Area di studio

EDILTEST S.r.l.

CARTA DELLA PERICOLOSITÀ DA FRANA
(P.A.I.)
Scala 1:25.000

TAV. 3



LEGENDA

P1 PERICOLOSITÀ MODERATA
Aree interessate da Dissesti con bassa possibilità di riattivazione

P2 PERICOLOSITÀ ELEVATA
Aree interessate da Dissesti con alta possibilità di riattivazione

P3 PERICOLOSITÀ MOLTO ELEVATA
Aree interessate da Dissesti in attività o riattivati stagionalmente

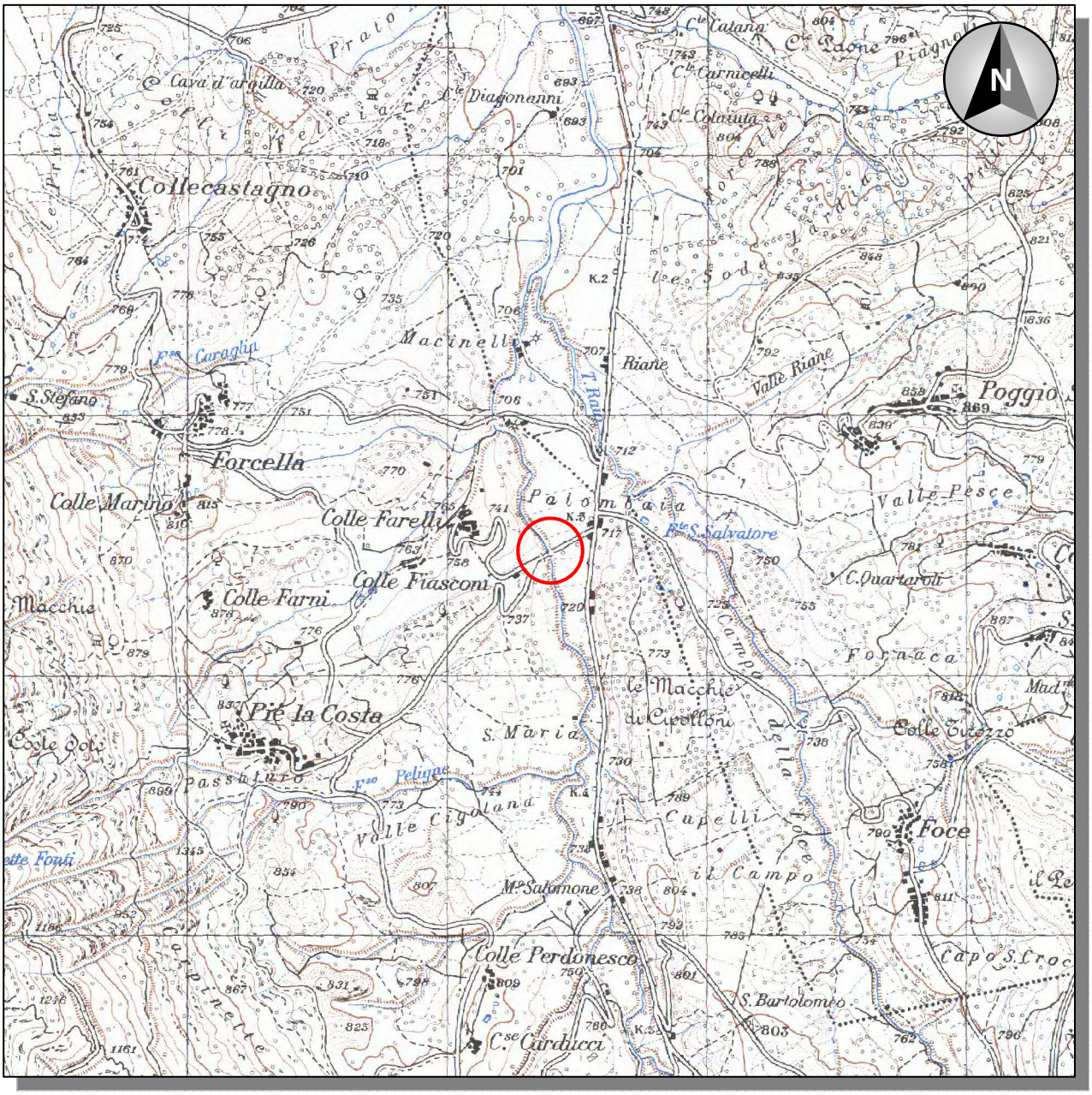
PS PERICOLOSITÀ DA SCARPATE
Aree interessate da Dissesti generati da Scarpate

Area di studio

EDILTEST S.r.l.

CARTA DELLA PERICOLOSITÀ IDRAULICA
(P.S.D.A.)
Scala 1:25.000

TAV. 4



LEGENDA

P4 PERICOLOSITÀ MOLTO ELEVATA
h50 > 1 m - v50 > 1 m/s

P3 PERICOLOSITÀ ELEVATA
1 m > h50 > 0,5 m - h100 > 1 m - v100 > 1 m/s

P2 PERICOLOSITÀ MEDIA
h100 > 0 m

P1 PERICOLOSITÀ MODERATA
h200 > 0 m

Area di studio

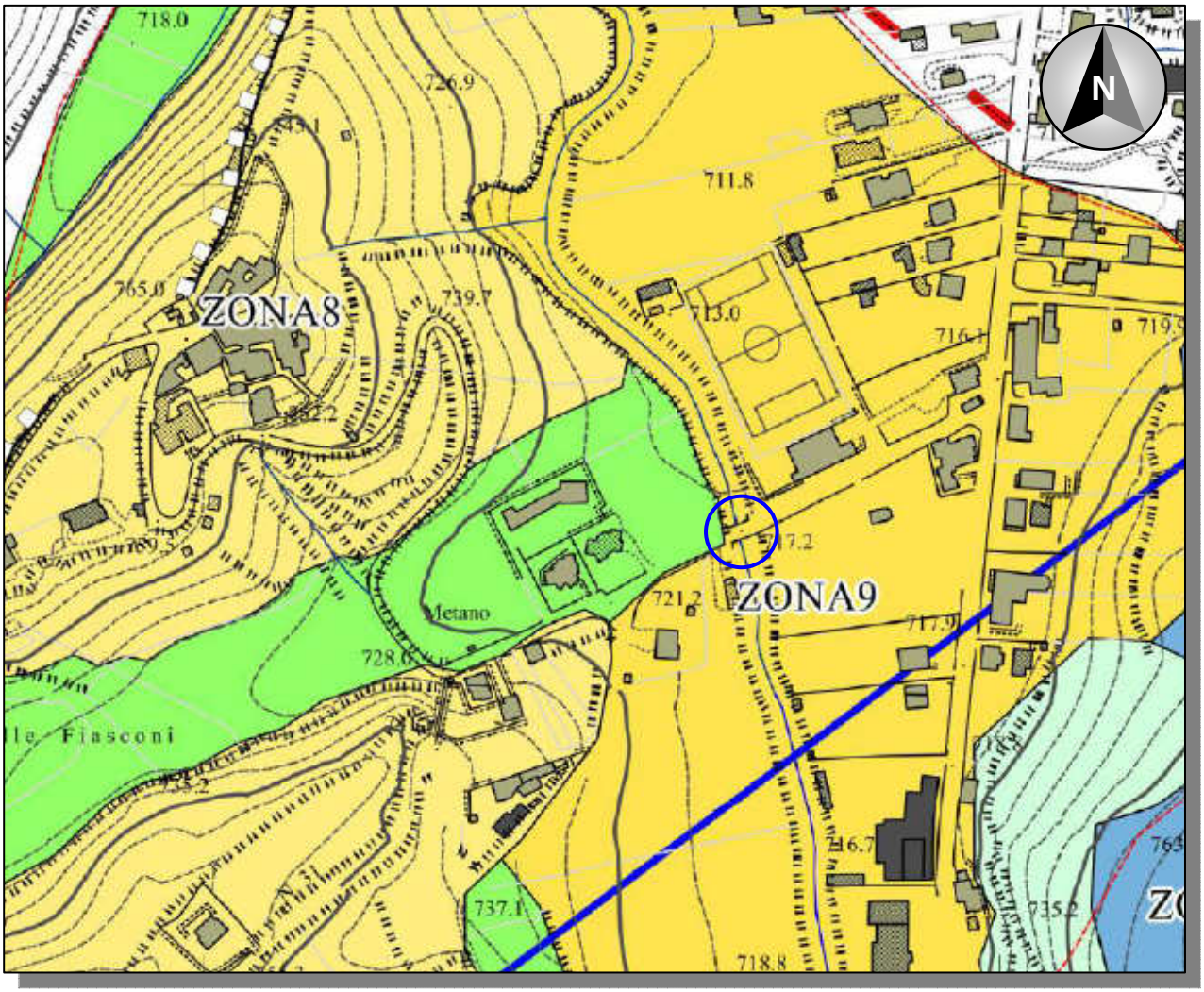
EDILTEST S.r.l.

CARTA DELLE M.O.P.S.

(MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI TORNIMPARTE)

Scala 1:5.000

TAV. 5



LEGENDA

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

ZONA 9

B5, Spessore max 10 m, Sciolto (IV)

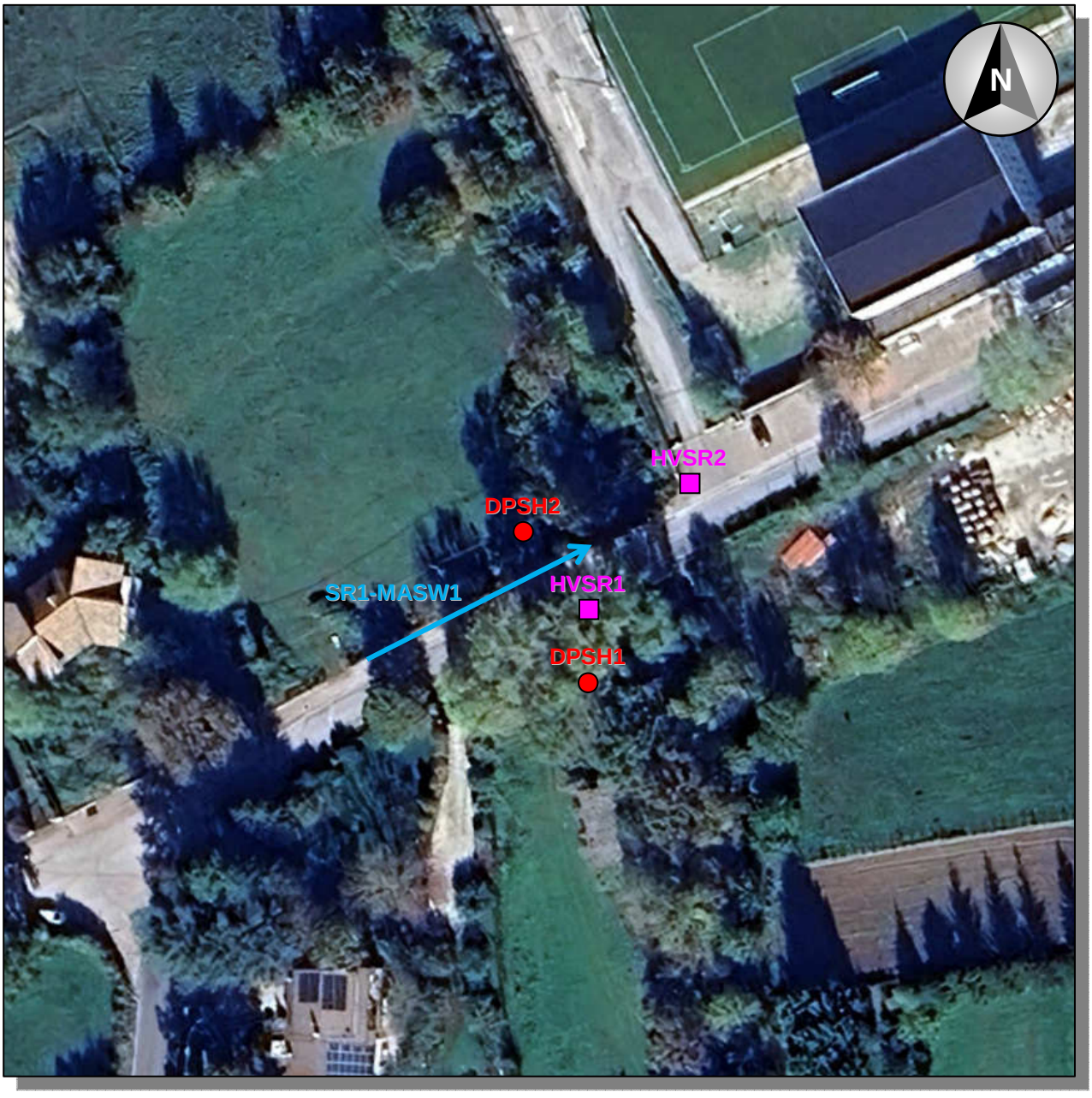
E5-Sabbia-ghiaiosa, Elementi lapidei di dimensioni comprese mediamente tra 2 e 60 mm. *LINEE GUIDA REGIONALI - Stardard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica v 1.2 (REGIONE ABRUZZO).*
Corrisponde alla classe **SW** (Sabbie pulite e ben assortite, sabbie ghiaiose)**.** *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica v. 2.0 (DPC).*

B5
Vs inferiore a 800 m\s

B3-B4-B5, Rocce stratificate costituite da alternanze ordinate di livelli lapidei e livelli pelitici (con contrasto di competenza). B3(lapideo <75%); B4(25%<lapideo<75%); B5(pelitico >75%). *LINEE GUIDA REGIONALI - Stardard di rappresentazione cartografica e archiviazione informatica v 1.2 (REGIONE ABRUZZO).*
Corrisponde alla classe **ALS** (Substrato alternanza di litotipi non stratificato)**.** *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica v. 2.0 (DPC).*

Area di studio

EDILTEST S.r.l.	**UBICAZIONE INDAGINI** *Scala 1:1.000*	**TAV. 6**



LEGENDA

DPSH	Prova penetrometrica dinamica
SR-MASW	Indagine sismica a rifrazione e MASW
HVSR	Indagine sismica HVSR

ALLEGATI

ALLEGATO 1

PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

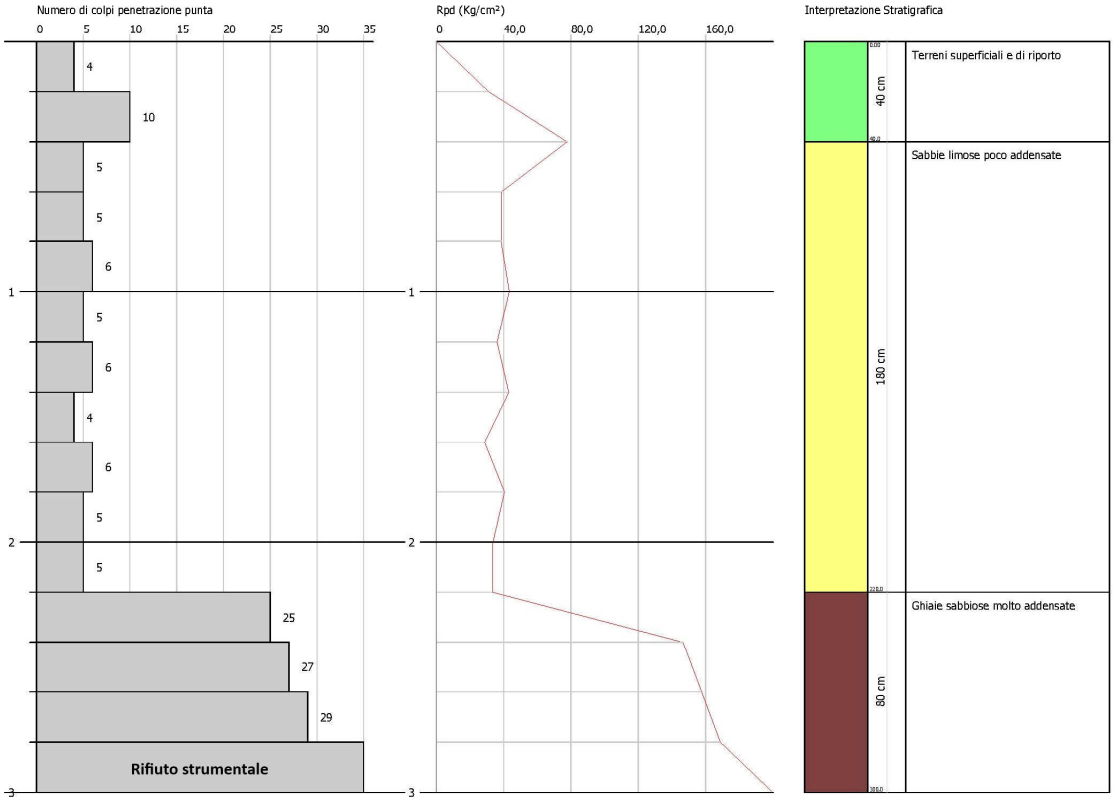
EDILTEST S.r.l.

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH1

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH1
Strumento utilizzato... GEO DEEP DRILL

Committente: Provincia dell'Aquila
Cantiere: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Località: Tornimparte (AQ)

Data: 17/07/2025



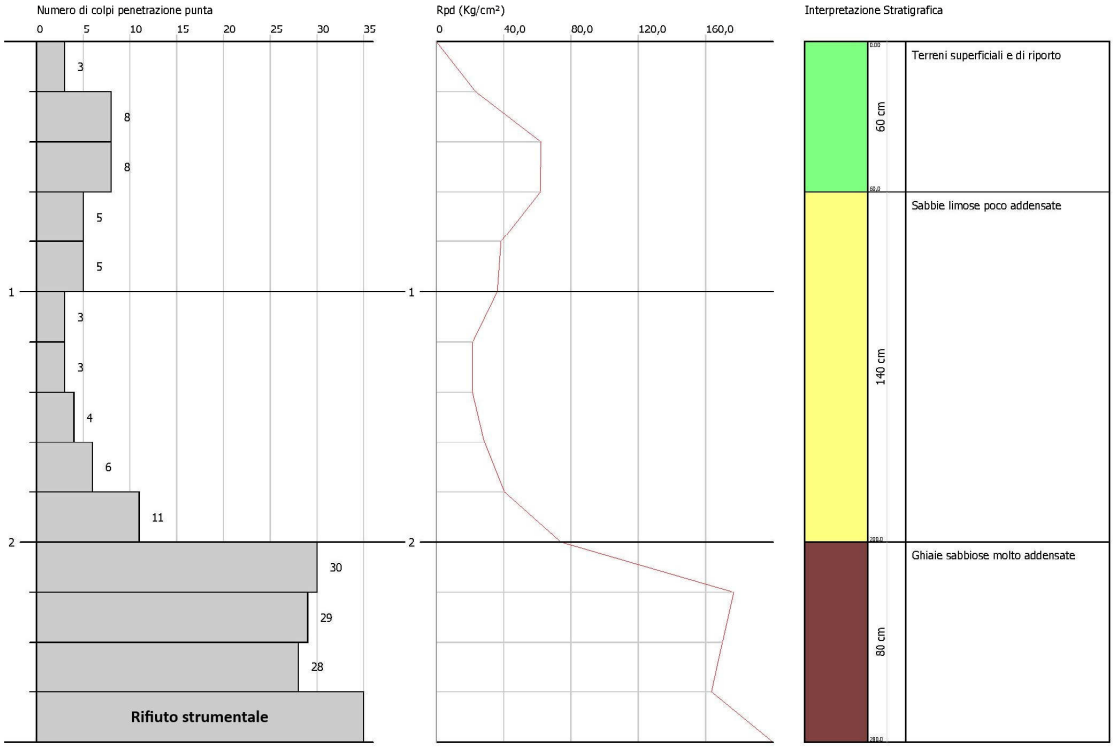
EDILTEST S.r.l.

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH2

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH2
Strumento utilizzato... GEO DEEP DRILL

Committente: Provincia dell'Aquila
Cantiere: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Località: Tornimparte (AQ)

Data: 17/07/2025



EDILTEST S.r.l.

PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE
Elaborazioni

PROVA DPSH1

Strumento utilizzato... GEO DEEP DRILL
Prova eseguita in data 17/07/2025
Profondità prova 3,00 mt
Falda non rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm²)	Res. dinamica (Kg/cm²)	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²)	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²)
0,20	4	0,855	31,22	36,53	1,56	1,83
0,40	10	0,851	77,70	91,33	3,89	4,57
0,60	5	0,847	38,68	45,67	1,93	2,28
0,80	5	0,843	38,51	45,67	1,93	2,28
1,00	6	0,840	43,48	51,77	2,17	2,59
1,20	5	0,836	36,08	43,14	1,80	2,16
1,40	6	0,833	43,12	51,77	2,16	2,59
1,60	4	0,830	28,63	34,51	1,43	1,73
1,80	6	0,826	42,78	51,77	2,14	2,59
2,00	5	0,823	33,65	40,88	1,68	2,04
2,20	5	0,820	33,53	40,88	1,68	2,04
2,40	25	0,717	146,60	204,42	7,33	10,22
2,60	27	0,714	157,68	220,77	7,88	11,04
2,80	29	0,711	168,69	237,12	8,43	11,86
3,00	50	0,609	236,46	388,49	11,82	19,42

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA DPSH1

TERRENI COESIVI
Coesione non drenata (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Terzaghi -Peck	Sanglera t	Terzaghi -Peck (1948)	U.S.D.M .S.M	Schmert mann 1975	SUNDA (1983) Benassi e Vannelli	Fletcher (1965) Argilla di Chicago	Houston (1960)	Shioi - Fukui 1982	Begema nn	De Beer
Terreni superfici ali e di riporto	12,24	0,40	0,83	1,53	0,50	0,49	1,20	1,92	1,07	1,39	0,61	2,19	1,53
Sabbie limose poco addensat e	9,12	2,20	0,62	1,14	0,50	0,37	0,89	1,35	0,81	1,13	0,46	1,63	1,14
Ghiaie sabbiose molto addensat e	57,25	3,00	3,86	7,16	0,00	1,95	5,74	7,88	4,07	6,48	2,86	9,69	7,16

Modulo Edometrico (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Stroud e Butler (1975)	Vesic (1970)	Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner	Buisman-Sanglerat
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	56,16	--	126,63	122,40

Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	41,84	--	94,81	114,00
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	262,66	--	585,71	572,50

Modulo di Young (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Schultze	Apollonia
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	120,36	122,40
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	84,48	91,20
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	637,98	572,50

Classificazione AGI

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	A.G.I. (1977)	ESTREM. CONSISTENTE

Peso unità di volume

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	Meyerhof	2,02
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	Meyerhof	1,94
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	Meyerhof	2,50

Peso unità di volume saturo

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	Meyerhof	2,22
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	Meyerhof	2,13
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	Meyerhof	2,50

TERRENI INCOERENTI
Densità relativa

	Nspt	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957	Meyerhof 1957	Schultze & Menzenbach (1961)	Skempton 1986
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	46,2	87,81	0	37,73
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	39,49	75,8	0	31,01
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	85,85	100	100	87,07

Angolo di resistenza al taglio

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956	Meyerhof (1956)	Sowers (1961)	Malcev (1964)	Meyerhof (1965)	Schmertmann (1977) Sabbie	Mitchell & Katti (1981)	Shioi-Fukuni (1982)	Japanese National Railway	De Mello	Owasaki & Iwasaki
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	30,5	23,5	31,43	29,06	34,5	40,29	30-32	28,55	30,67	40,87	30,65

Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	29,61	22,61	30,55	28,58	33,33	0	<30	26,7	29,74	38,3	28,51
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	43,36	36,36	44,03	36,56	42,69	42	>38	44,3	44,17	53,95	48,84

Modulo di Young (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Terzaghi	Schmertmann (1978) (Sabbie)	Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa)	D'Appollonia ed altri 1970 (Sabbia)	Bowles (1982) Sabbia Media
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	249,72	97,92	145,13	271,80	136,20
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	---	72,96	108,32	---	---
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	540,08	458,00	676,25	609,38	361,25

Modulo Edometrico (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Buisman-Sanglerat (sabbie)	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	73,44	52,61	86,90	92,59
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	---	46,20	64,75	78,68
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	343,50	145,06	406,48	293,33

Classificazione AGI

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	Classificazione A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	Classificazione A.G.I	POCO ADDENSATO
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	Classificazione A.G.I	MOLTO ADDENSATO

Peso unità di volume

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	Meyerhof ed altri	1,80
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	Meyerhof ed altri	1,70
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	Meyerhof ed altri	2,27

Peso unità di volume saturo

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	12,24	0,40	12,24	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,93
Sabbie limose poco addensate	9,12	2,20	9,12	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,91
Ghiaie sabbiose molto addensate	57,25	3,00	57,25	Terzaghi-Peck 1948-1967	2,16

EDILTEST S.r.l.

PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE
Elaborazioni

PROVA DPSH2

Strumento utilizzato... GEO DEEP DRILL
Prova eseguita in data 17/07/2025
Profondità prova 2,80 mt
Falda non rilevata

Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

Profondità (m)	Nr. Colpi	Calcolo coeff. riduzione sonda Chi	Res. dinamica ridotta (Kg/cm²)	Res. dinamica (Kg/cm²)	Pres. ammissibile con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²)	Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²)
0,20	3	0,855	23,42	27,40	1,17	1,37
0,40	8	0,851	62,16	73,07	3,11	3,65
0,60	8	0,847	61,89	73,07	3,09	3,65
0,80	5	0,843	38,51	45,67	1,93	2,28
1,00	5	0,840	36,23	43,14	1,81	2,16
1,20	3	0,836	21,65	25,89	1,08	1,29
1,40	3	0,833	21,56	25,89	1,08	1,29
1,60	4	0,830	28,63	34,51	1,43	1,73
1,80	6	0,826	42,78	51,77	2,14	2,59
2,00	11	0,823	74,04	89,94	3,70	4,50
2,20	30	0,720	176,65	245,30	8,83	12,26
2,40	29	0,717	170,05	237,12	8,50	11,86
2,60	28	0,714	163,52	228,95	8,18	11,45
2,80	50	0,611	249,97	408,83	12,50	20,44

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA DPSH2

TERRENI COESIVI
Coesione non drenata (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Terzaghi -Peck	Sanglera t	Terzaghi -Peck (1948)	U.S.D.M .S.M	Schmert mann 1975	SUNDA (1983) Benassi e Vannelli	Fletcher (1965) Argilla di Chicago	Houston (1960)	Shioi - Fukui 1982	Begema nn	De Beer
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	0,75	1,38	0,50	0,44	1,09	1,74	0,98	1,29	0,55	1,98	1,38
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	0,62	1,16	0,50	0,37	0,91	1,36	0,82	1,14	0,46	1,65	1,16
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	4,04	7,48	0,00	2,02	6,00	8,40	4,19	6,85	2,99	10,69	7,48

Modulo Edometrico (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Stroud e Butler (1975)	Vesic (1970)	Trofimenkov (1974), Mitchell e Gardner	Buisman-Sanglerat
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	50,74	--	114,60	110,60
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	42,44	--	96,14	115,63

Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	274,68	--	612,43	598,70

Modulo di Young (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Schultze	Apollonia
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	106,79	110,60
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	85,98	92,50
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	668,11	598,70

Classificazione AGI

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Classificazione
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	A.G.I. (1977)	CONSISTENTE
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	A.G.I. (1977)	ESTREM. CONSISTENTE

Peso unità di volume

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	Meyerhof	2,00
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	Meyerhof	1,94
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	Meyerhof	2,50

Peso unità di volume saturo

	Nspt	Prof. Strato (m)	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	Meyerhof	2,20
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	Meyerhof	2,13
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	Meyerhof	2,50

TERRENI INCOERENTI
Densità relativa

	Nspt	Prof. Strato (m)	Gibbs & Holtz 1957	Meyerhof 1957	Schultze & Menzenbach (1961)	Skempton 1986
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	43,84	83,47	0	35,28
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	39,8	76,34	0	31,31
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	91,07	100	0	89,9

Angolo di resistenza al taglio

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Peck-Hanson-Thornburn-Meyerhof 1956	Meyerhof (1956)	Sowers (1961)	Malcev (1964)	Meyerhof (1965)	Schmertmann (1977) Sabbie	Mitchell & Katti (1981)	Shioi-Fukuni (1982)	Japanese National Railway	De Mello	Owasaki & Iwasaki
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	30,16	23,16	31,1	28,89	34,07	39,69	<30	27,88	30,32	39,98	29,87
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	29,64	22,64	30,59	28,6	33,38	0	<30	26,78	29,77	38,42	28,6

Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	44,11	37,11	44,76	31,63	42,67	42	>38	44,97	44,96	54,72	49,6

Modulo di Young (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Terzaghi	Schmertmann (1978) (Sabbie)	Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa)	D'Appollonia ed altri 1970 (Sabbia)	Bowles (1982) Sabbia Media
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	237,38	88,48	131,21	262,95	130,30
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	---	74,00	109,85	---	---
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	552,30	478,96	707,17	629,02	374,35

Modulo Edometrico (Kg/cm²)

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Buisman-Sanglerat (sabbie)	Begemann 1974 (Ghiaia con sabbia)	Farrent 1963	Menzenbach e Malcev (Sabbia media)
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	66,36	50,18	78,53	87,33
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	---	46,46	65,68	79,25
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	359,22	150,44	425,08	305,02

Classificazione AGI

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Classificazione AGI
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	Classificazione A.G.I	MODERATAMENTE ADDENSATO
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	Classificazione A.G.I	POCO ADDENSATO
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	Classificazione A.G.I	MOLTO ADDENSATO

Peso unità di volume

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	Meyerhof ed altri	1,77
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	Meyerhof ed altri	1,70
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	Meyerhof ed altri	2,29

Peso unità di volume saturo

	Nspt	Prof. Strato (m)	Nspt corretto per presenza falda	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m³)
Terreni superficiali e di riporto	11,06	0,60	11,06	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,92
Sabbie limose poco addensate	9,25	2,00	9,25	Terzaghi-Peck 1948-1967	1,91
Ghiaie sabbiose molto addensate	59,87	2,80	59,87	Terzaghi-Peck 1948-1967	2,17

ALLEGATO 2

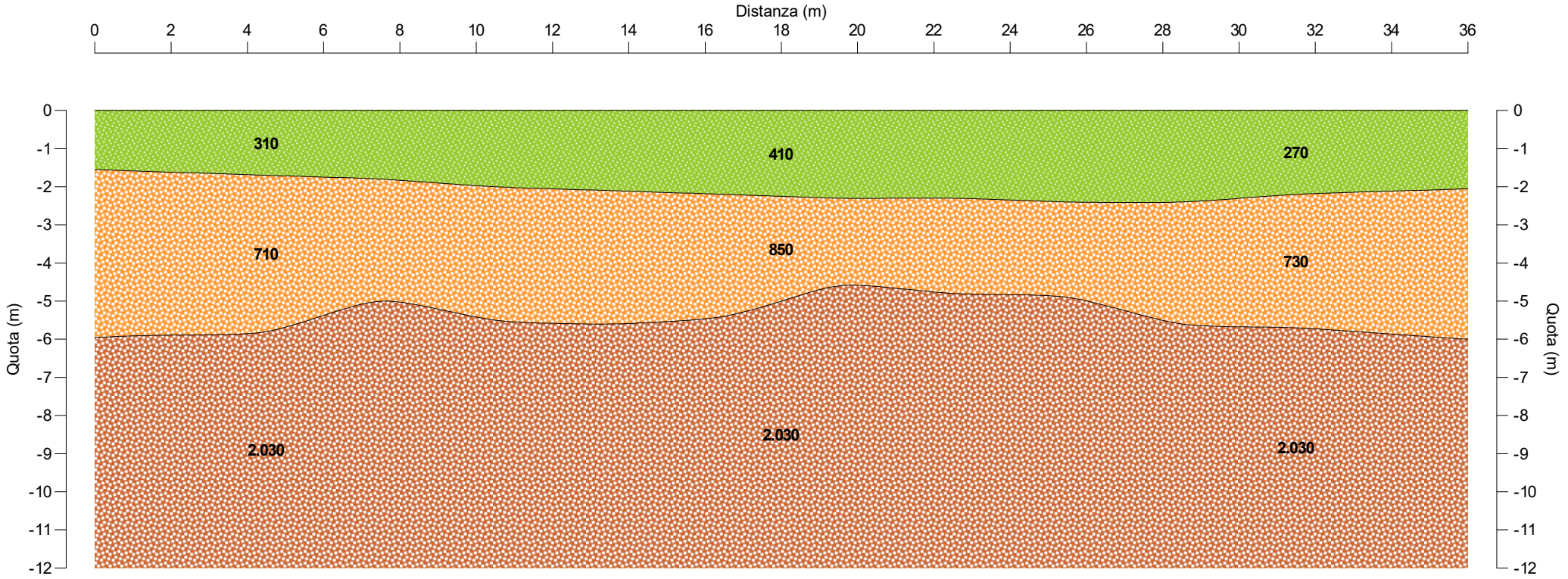
SISMICA A RIFRAZIONE

EDILTEST S.r.l.

SISMICA A RIFRAZIONE SR1

Sezione sismostratigrafica

Scala 1:150



LEGENDA

Sismostrato 1 — **310** Velocità onde P (m/s)

Sismostrato 2

Sismostrato 3

EDILTEST S.r.l.

SISMICA A RIFRAZIONE SR1
Tabulati

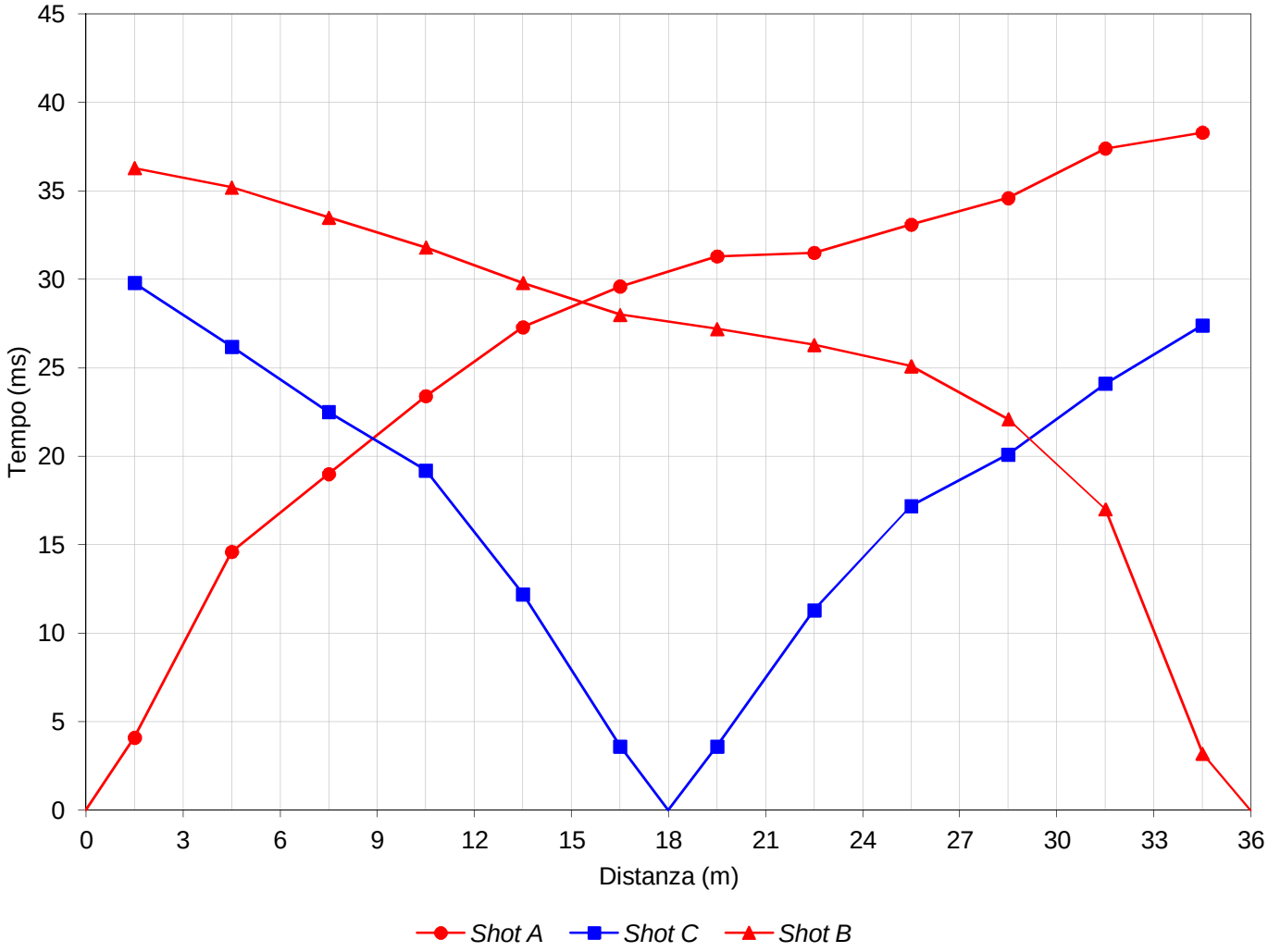
Shots Geofoni	Distanza (m)	Quota (m)	V_P 1 (m/s)	V_P 2 (m/s)	V_P 3 (m/s)	Prof. 1 (m)	Prof. 2 (m)
A	**0,0**	**0,00**	**312**	**705**	**2.032**	**1,6**	**6,0**
G1	1,5	0,00	320	717	2.032	1,6	5,9
G2	4,5	0,00	335	742	2.032	1,7	5,8
G3	7,5	0,00	351	767	2.032	1,8	5,0
G4	10,5	0,00	366	792	2.032	2,0	5,5
G5	13,5	0,00	382	817	2.032	2,1	5,6
G6	16,5	0,00	397	842	2.032	2,2	5,4
C	**18,0**	**0,00**	**405**	**854**	**2.032**	**2,3**	**5,0**
G7	19,5	0,00	394	843	2.032	2,3	4,6
G8	22,5	0,00	372	822	2.032	2,3	4,8
G9	25,5	0,00	350	800	2.032	2,4	4,9
G10	28,5	0,00	327	779	2.032	2,4	5,6
G11	31,5	0,00	305	757	2.032	2,2	5,7
G12	34,5	0,00	283	736	2.032	2,1	5,9
B	**36,0**	**0,00**	**272**	**725**	**2.032**	**2,1**	**6,0**

EDILTEST S.r.l.

SISMICA A RIFRAZIONE SR1

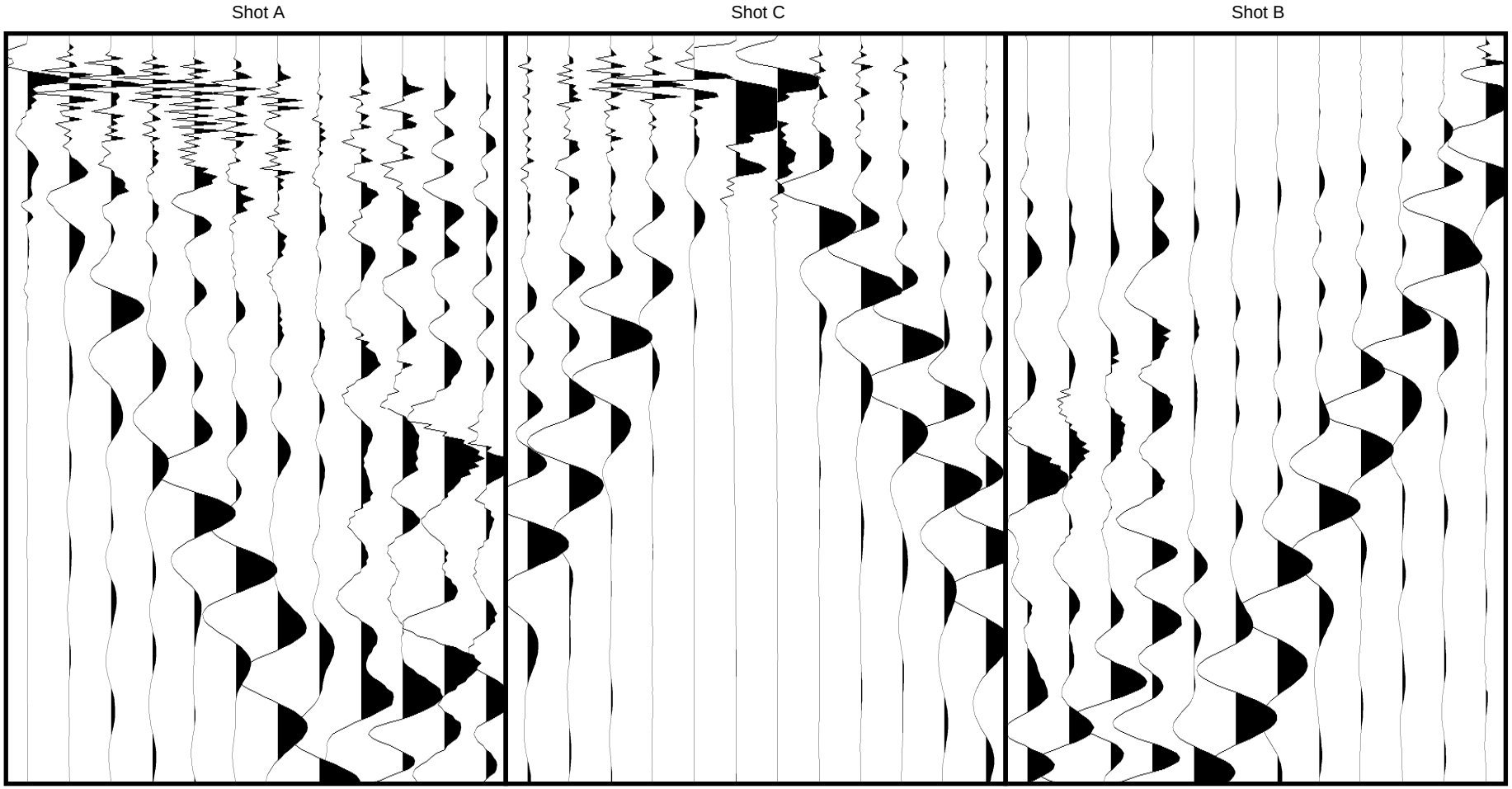
Dromocrone

Geof.	Dist. (m)	Shot A (ms)	Shot C (ms)	Shot B (ms)
G1	1,5	4,1	29,8	36,3
G2	4,5	14,6	26,2	35,2
G3	7,5	19,0	22,5	33,5
G4	10,5	23,4	19,2	31,8
G5	13,5	27,3	12,2	29,8
G6	16,5	29,6	3,6	28,0
G7	19,5	31,3	3,6	27,2
G8	22,5	31,5	11,3	26,3
G9	25,5	33,1	17,2	25,1
G10	28,5	34,6	20,1	22,1
G11	31,5	37,4	24,1	17,0
G12	34,5	38,3	27,4	3,2



EDILTEST S.r.l.

SISMICA A RIFRAZIONE SR1
Sismogrammi



Comune: Tornimparte (AQ)
Committente: Provincia dell'Aquila
Oggetto: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Data: 05/07/2025

Lunghezza linea: 36 m
Geofoni: 12
Distanza intergeofonica: 3 m
Shots: 3

Sismografo: ECHO 24
Record lenght: 0,2 s
Sample interval: 128 µs
Samples: 1560

ALLEGATO 3

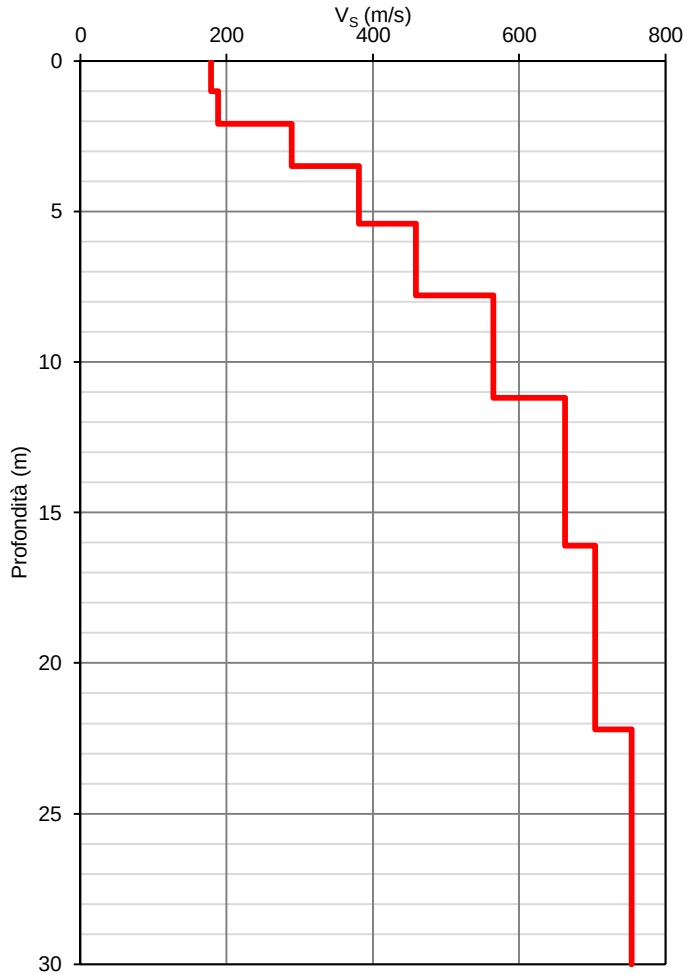
MASW

EDILTEST S.r.l.

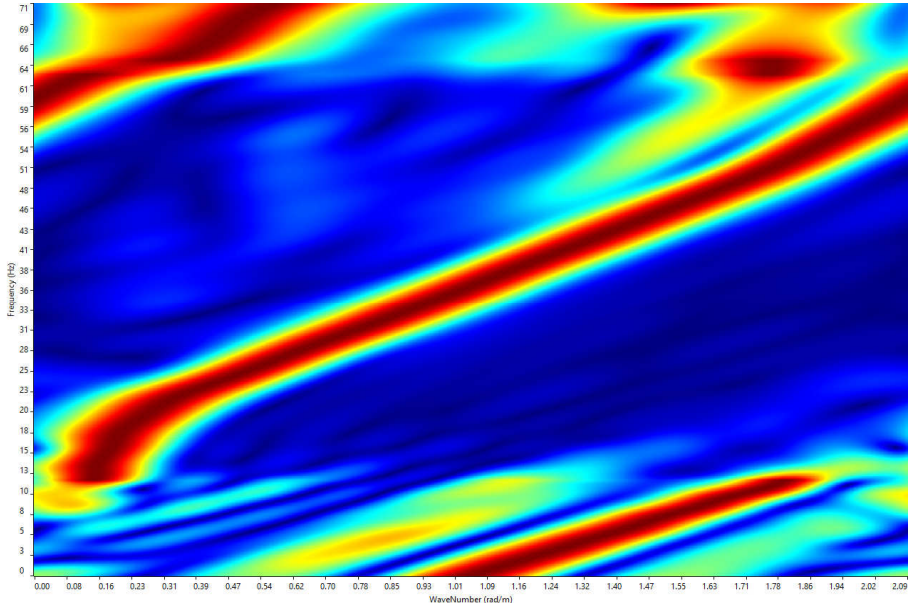
MASW1

Profilo onde di taglio V_S

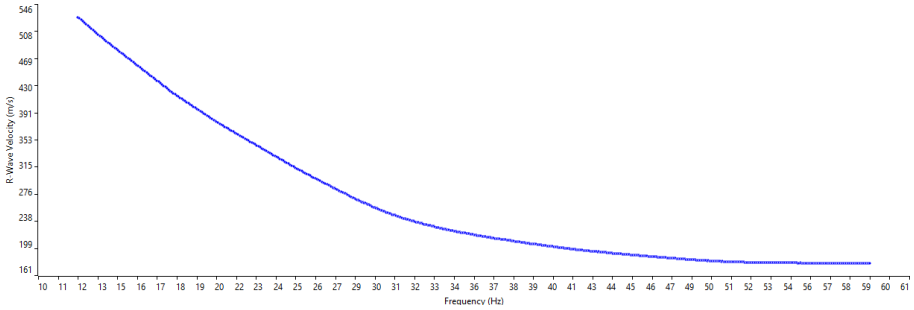
Prof. (m)	V_S (m/s)
1,0	179
2,1	189
3,5	289
5,4	381
7,8	459
11,2	565
16,1	663
22,2	704
30,0	754



Dominio FK

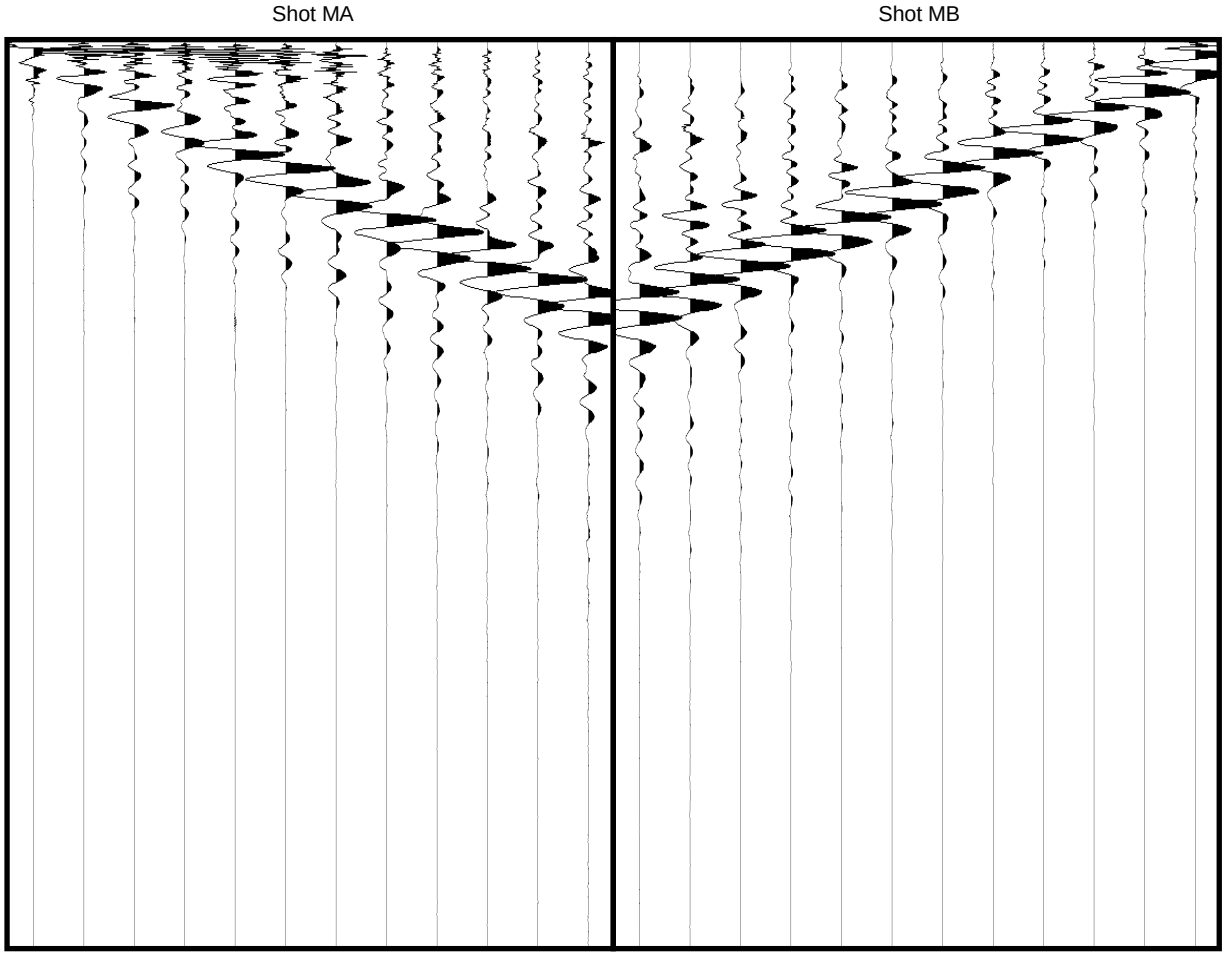


Curva di dispersione



EDILTEST S.r.l.

MASW1
Sismogrammi



Comune: Tornimparte (AQ)
Committente: Provincia dell'Aquila
Oggetto: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Data: 05/07/2025

Lunghezza linea: 39 m
Geofoni: 12
Distanza intergeofonica: 3 m
Shots: 2

Sismografo: ECHO 24
Record lenght: 1 s
Sample interval: 256 µs
Samples: 3900

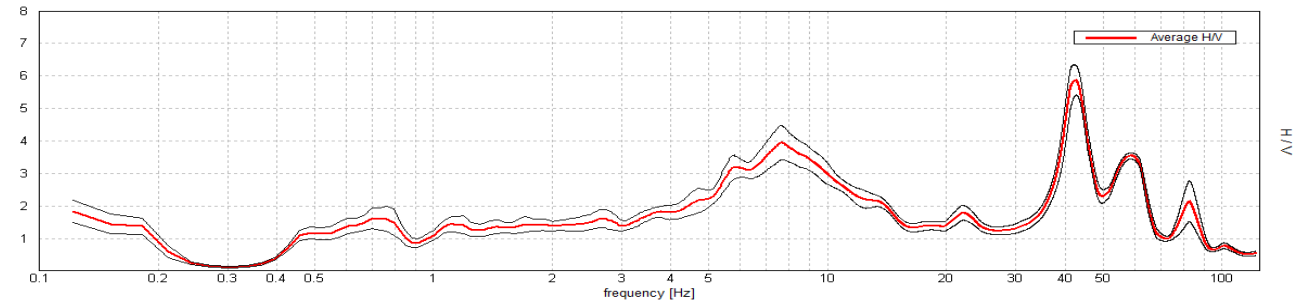
ALLEGATO 4

HVSR

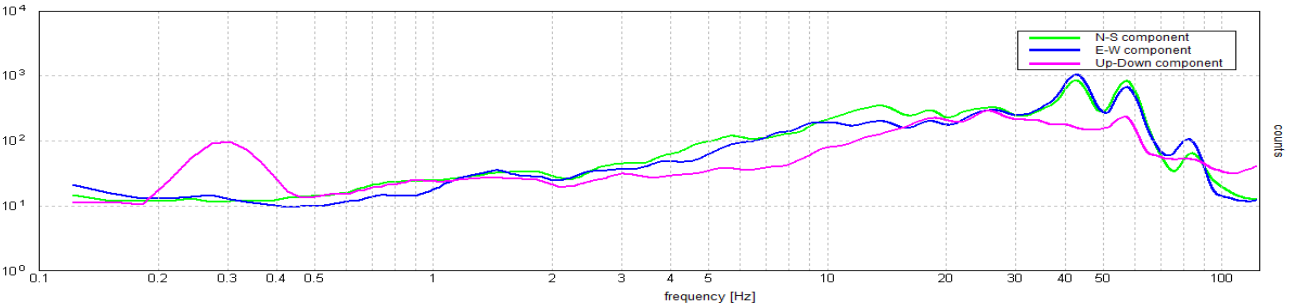
EDILTEST S.r.l.

HVSR1

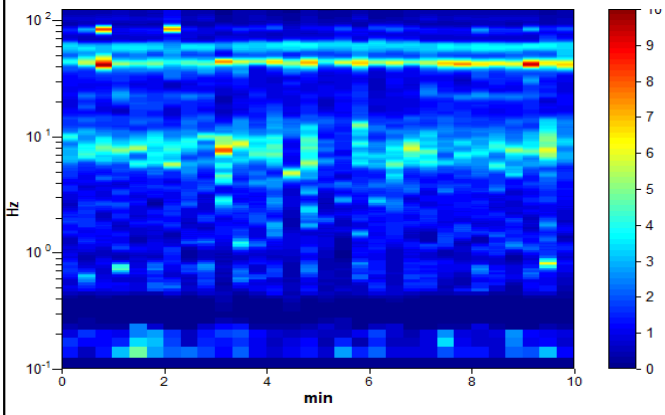
HVSR



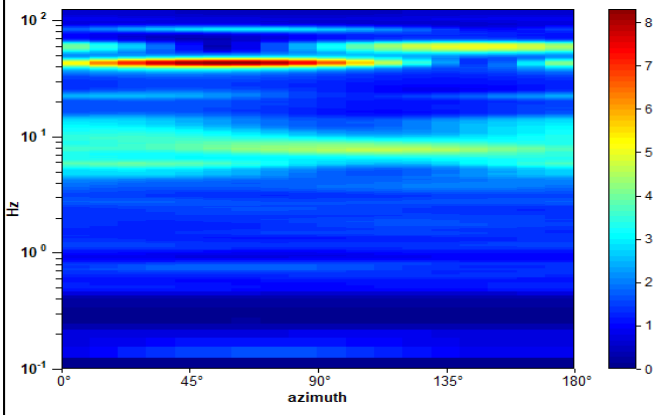
Spettri delle componenti



Serie temporale HVSR



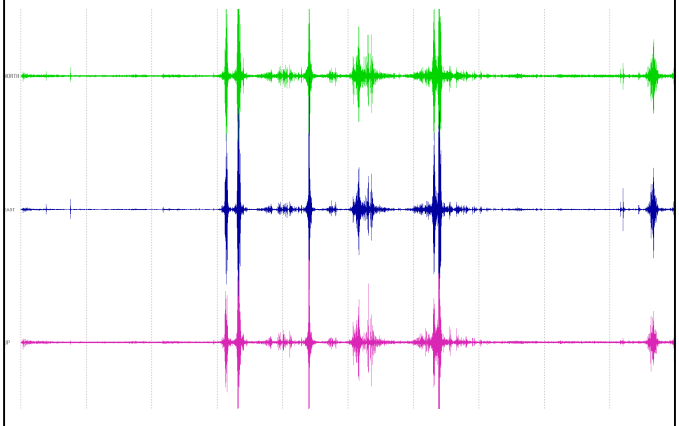
HVSR direzionale



Criteri linee guida SESAME

Picco massimo HVSR (Hz)	**42,4**
Criteri di affidabilità curva HVSR	
$f_0 > 10 / L_w$	OK
$n_c(f_0) > 200$	OK
$\sigma A(f) < 2$ per $0{,}5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0{,}5$Hz	OK
Criteri di affidabilità picco HVSR	
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	OK
Esiste f^+ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	OK
$A_0 > 2$	OK
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma A(f)] = f_0 \pm 5\%$	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	OK

Tracce



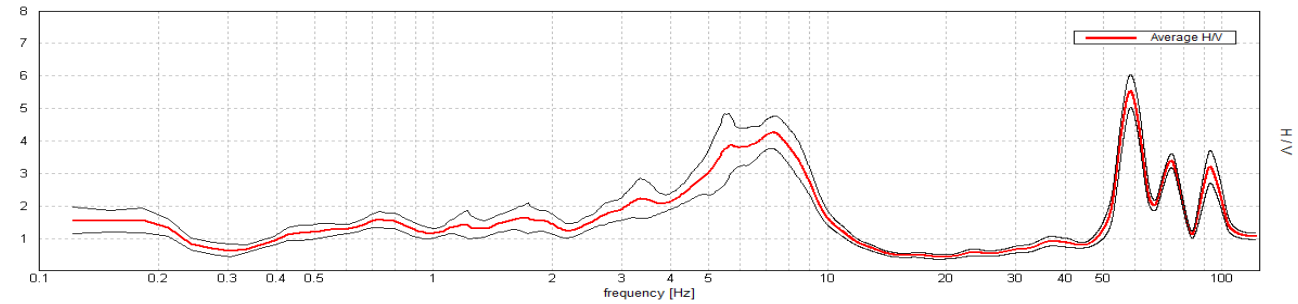
Comune: Tornimparte (AQ)
Committente: Provincia dell'Aquila
Oggetto: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Data: 05/07/2025

Tromografo: Tromino TRZ-0014/01-09
Tempo di registrazione: 10 min
Frequenza di campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 42 s
Lisciamento: Triangular window 15%

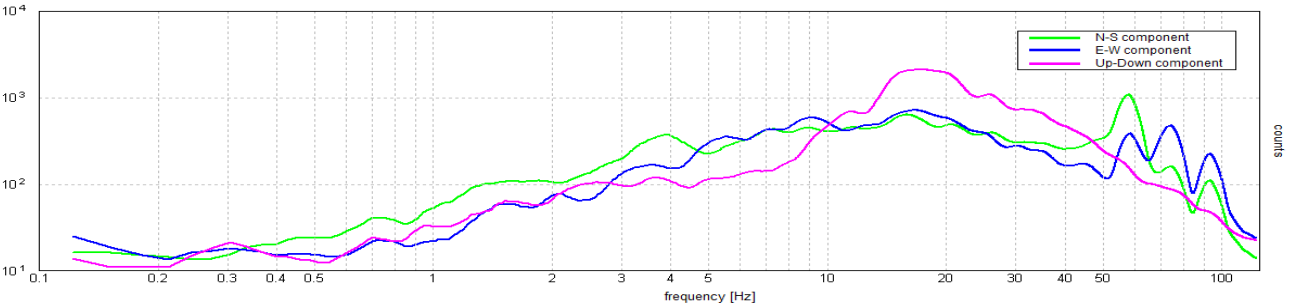
EDILTEST S.r.l.

HVSR2

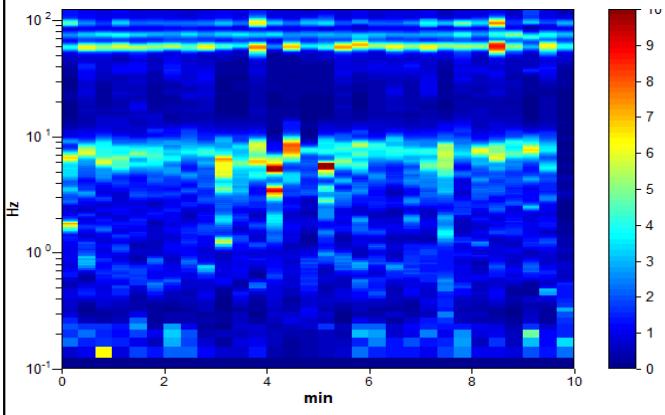
HVSR



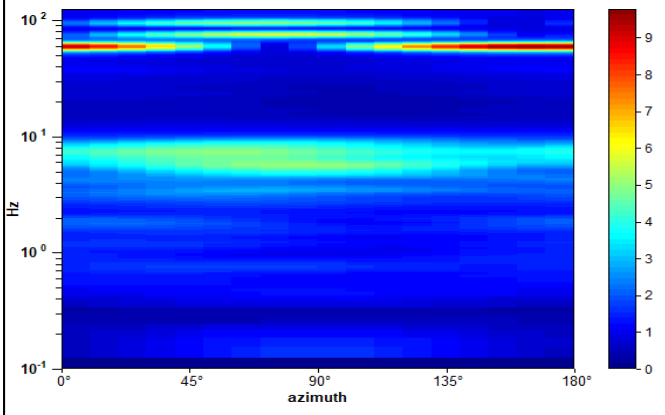
Spettri delle componenti



Serie temporale HVSR



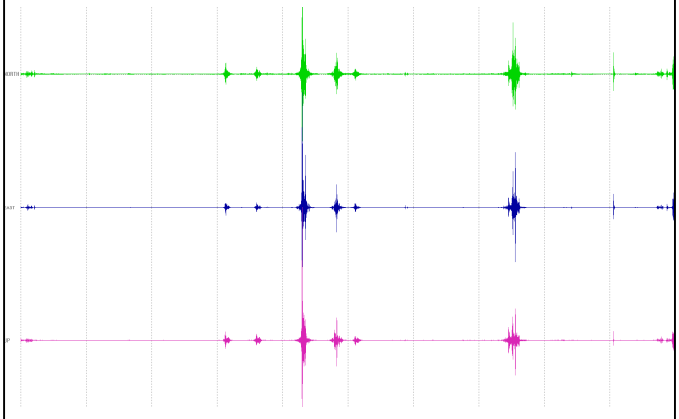
HVSR direzionale



Criteri linee guida SESAME

Picco massimo HVSR (Hz)	**58,6**
Criteri di affidabilità curva HVSR	
$f_0 > 10 / L_w$	OK
$n_c(f_0) > 200$	OK
$\sigma A(f) < 2$ per $0{,}5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0{,}5$Hz	OK
Criteri di affidabilità picco HVSR	
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	OK
Esiste f^+ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	OK
$A_0 > 2$	OK
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma A(f)] = f_0 \pm 5\%$	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	OK

Tracce



Comune: Tornimparte (AQ)
Committente: Provincia dell'Aquila
Oggetto: Lavori di messa in sicurezza dei ponticelli lungo la S.P. 31 "Forulense". Ponticello C km 8+020 in località Palombaia
Data: 05/07/2025

Tromografo: Tromino TRZ-0014/01-09
Tempo di registrazione: 10 min
Frequenza di campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 42 s
Lisciamento: Triangular window 15%