



**COMUNE DI SAN GODENZO**  
**(Città Metropolitana di Firenze)**

***VARIANTE AL VIGENTE REGOLAMENTO URBANISTICO  
PER REALIZZAZIONE ADEGUAMENTO VIABILITA' COMUNALE IN LOCALITA'  
PETROGNANO CON REALIZZAZIONE DI STALLI PER LA SOSTA***

**Riferimenti normativi:**

D.P.G.R. 30 gennaio 2020 – Reg. Reg. n. 5/R  
Legge Regionale 24 luglio 2018, n. 41

**Relazione geologica di fattibilità**

**Prof. Geol. Eros Aiello**  
**Dott. Geol. Gabriele Grandini**

**Novembre 2022**

## PREMESSA

Con il presente supporto geologico si dettagliano le caratteristiche relative alla previsione urbanistica e progettazione di un intervento di adeguamento di un tratto di viabilità esistente in località Petrognano in Comune di San Godenzo.

L'intervento si propone di migliorare la fruibilità del tratto di viabilità vicinale in località "Petrognano" (fra i toponimi "La Piazza e "Il Prato") con la realizzazione di n. 6 stalli di sosta da realizzare in fregio alla viabilità esistente ampliando la sezione stradale stessa verso monte per realizzare i citati stalli di sosta "in linea".

L'area di intervento si colloca in località "Petrognano" nel Comune di San Godenzo, in Provincia di Firenze, a circa 5 chilometri dal capoluogo di comune, nel territorio dell'alto Mugello.

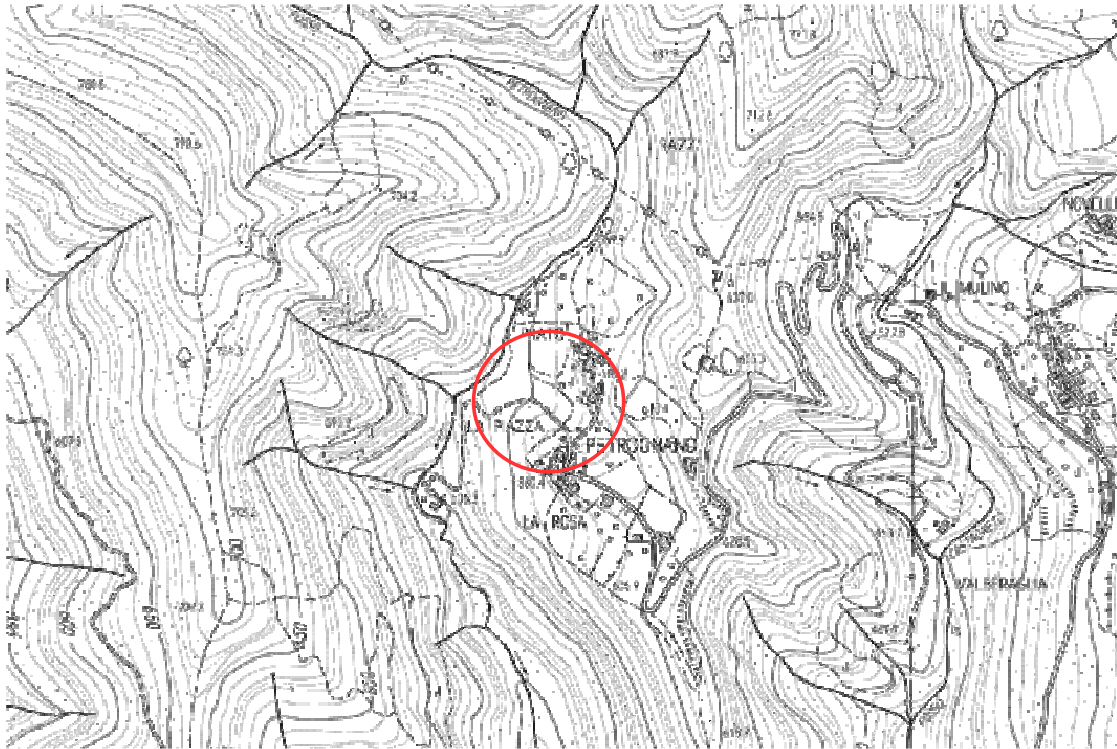


*Ubicazione dell'area da veduta aerea*

Il settore di intervento è baricentricamente individuato dalle seguenti coordinate geografiche.

ED50: latitudine: 43.943820° - longitudine: 11.607647°

WGS84: latitudine: 43.942870° - longitudine: 11.606669°



*Inquadramento cartografico da GEOscopio - Regione Toscana  
Carta CTR Regione Toscana in scala 1:10.000 - Volo 22/06/2016 - Sezione 264080*



*Panoramica del tratto stradale di interesse con la sovrascarpa di monte (ripresa da sud)*

Catastalmente le opere oggetto di previsione e di progettazione impegneranno la viabilità comunale e un terreno di proprietà privata che si estende a monte del tracciato stradale con profilo a scarpa oltre la banchina della

strada. Le opere prevedono l'acquisizione del terreno necessario sopra strada e quindi in proprietà privata tramite procedura espropriativa DPR 327/01 come da piano particellare allegato alla procedura progettuale di approvazione di opera pubblica.

Si riportano i riferimenti delle particelle catastali che saranno oggetto di intervento.

Foglio n. 35 del Comune di San Godenzo (FI)

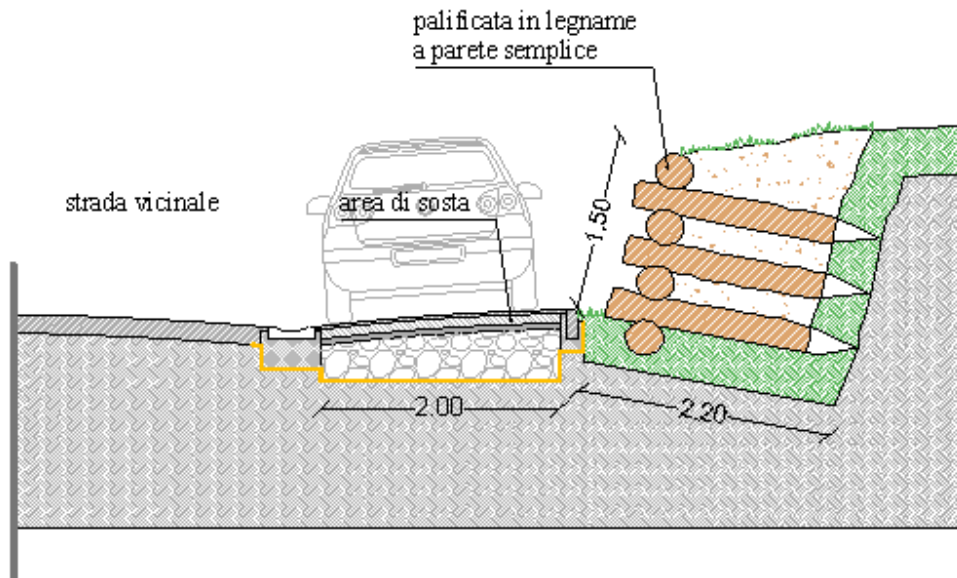
Particelle n. 257 e n. 259



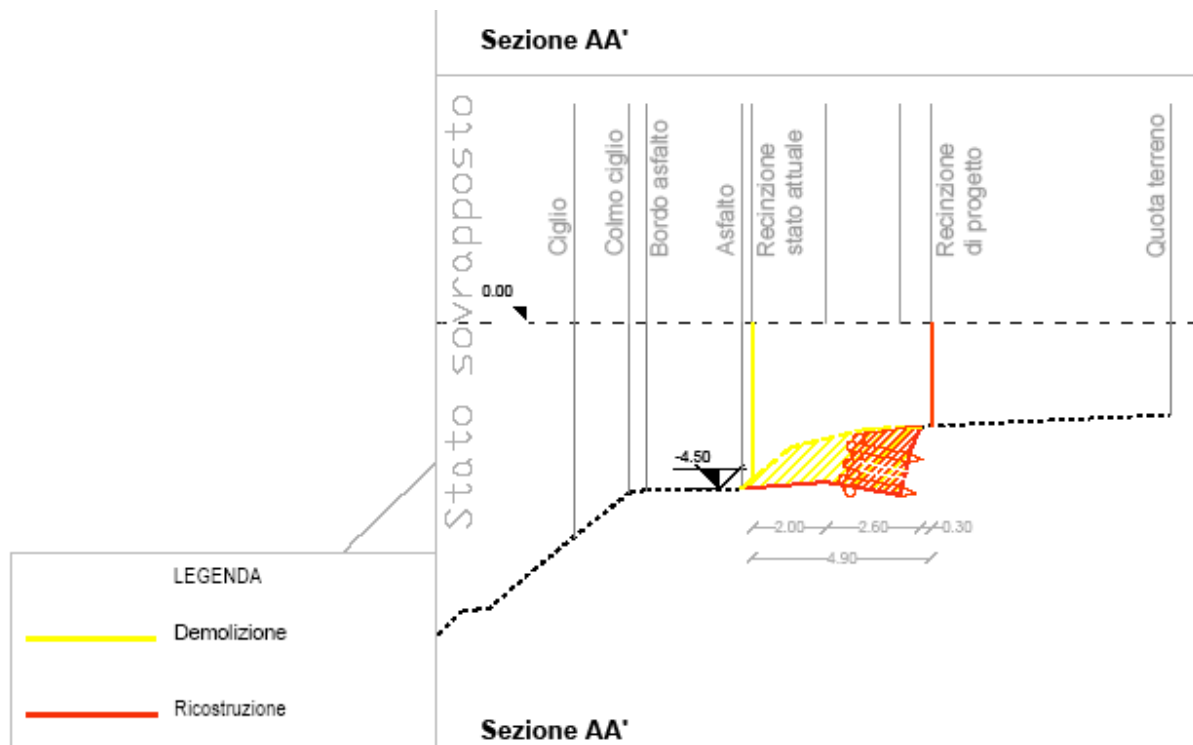
*Stralcio di inquadramento catastale*

***Oggetto della Variante al vigente S.U.***

La presente proposta progettuale, finalizzata all'adeguamento di un breve tratto di viabilità esistente con creazione di 6 stalli di sosta in linea in corrispondenza del margine di monte dell'attuale carreggiata, prevede la realizzazione di scavi nel settore di monte per la realizzazione degli stessi spazi di sosta in fregio alla "strada vicinale" e la materializzazione di un'opera di ingegneria naturalistica costituita da una palificata in legname.



Sezione schematica esemplificativa dell'intervento in previsione



Sezione schematica esemplificativa dell'intervento in previsione in "stato sovrapposto" con evidenziati gli scavi nell'area di monte per l'adeguamento della tratta viaria



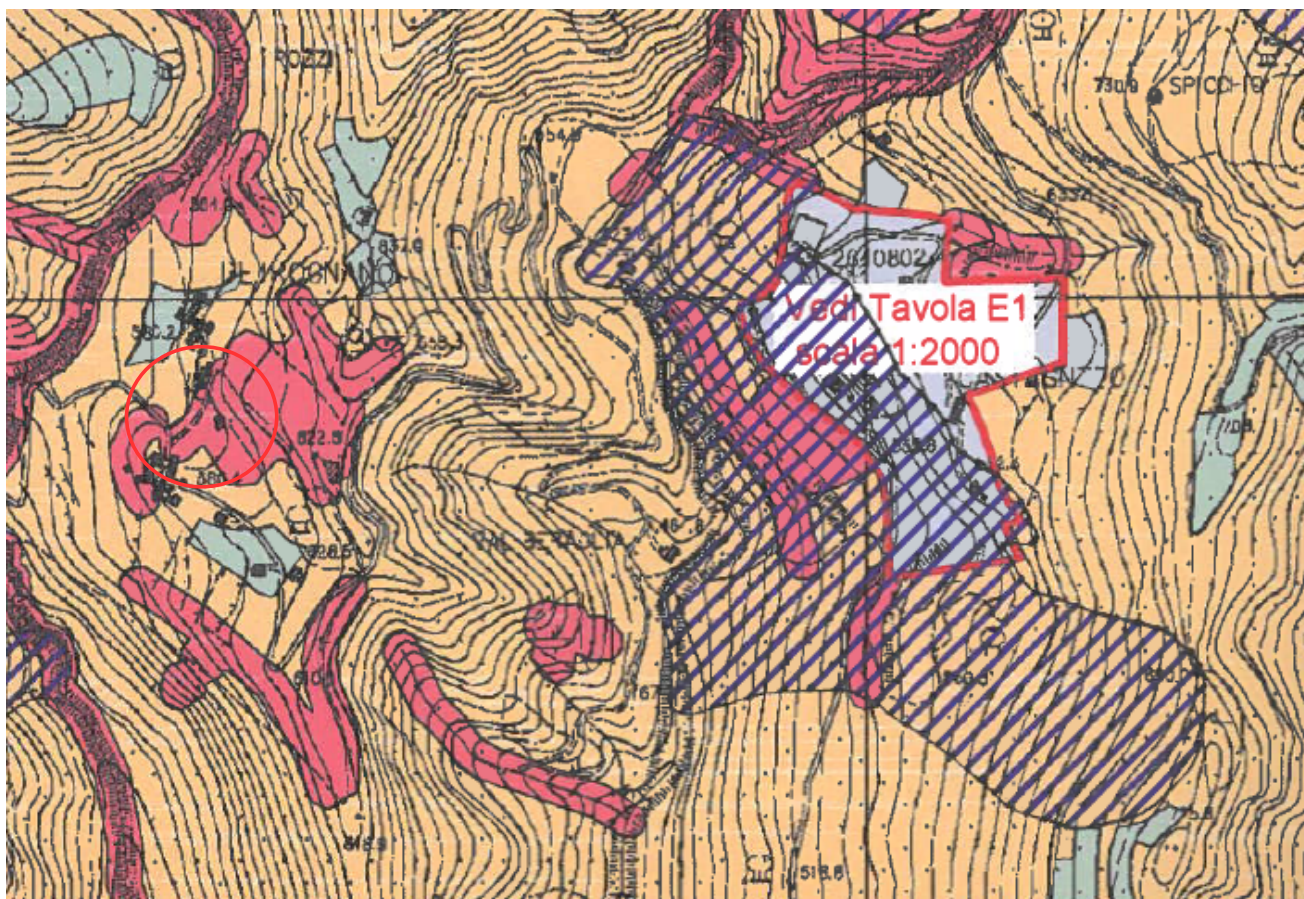
## 1. INTRODUZIONE AL SUPPORTO GEOLOGICO e SALVAGUARDIE di cui al VIGENTE S.U.

Col presente studio si vogliono analizzare in via preliminare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche ed idrauliche dei terreni costituenti l'area oggetto di variante urbanistica al vigente S.U. del comune di San Godenzo di cui al dettaglio descritto in premessa.


Per lo sviluppo delle considerazioni che seguono si fa pertanto riferimento ai tematismi cartografici del vigente "quadro conoscitivo" (supporto geologico tecnico al Regolamento Urbanistico con aggiornamento del quadro conoscitivo del Piano Strutturale – Geo Eco Engineering, gennaio 2009 / agosto 2010), elaborato secondo i criteri dell'allora vigente Reg. Reg. n. 26/R/2007, integrandoli in parte con aggiornamenti dello stesso desumibili dalle elaborazioni allestite per il quadro conoscitivo del nuovo Piano Strutturale Intercomunale della Valdisevie per i Comuni di Pontassieve, Pelago, Rufina, Londa e San Godenzo (Geo Eco Progetti, 2022) secondo le indicazioni tecniche del Reg. Reg. n. 5/R/2020.


Nel supporto geologico tecnico al vigente S.U. del Comune di San Godenzo Firenze (Regolamento Urbanistico), al comparto in esame, è stata attribuita classe di pericolosità G.4 (molto elevata), pericolosità idraulica I.1 (irrilevante) per la totalità del comparto posto in ambito collinare/montano non prossimo e non interferente concorsi d'acqua ed esente da notizie storiche di precedenti inondazioni. In relazione all'aspetto sismico si segnala che nella cartografia ZMPSL (Geo Eco Progetti, maggio2002)l'area è segnalata a potenziale instabilità dinamica in caso di sisma per giacitura degli strati con assetto a franapoggio meno inclinata del pendio.

Per immediatezza di comprensione e facilità di consultazione si riportano appresso stralci cartografici desunti dal quadro conoscitivo del vigente S.U. Comunale.

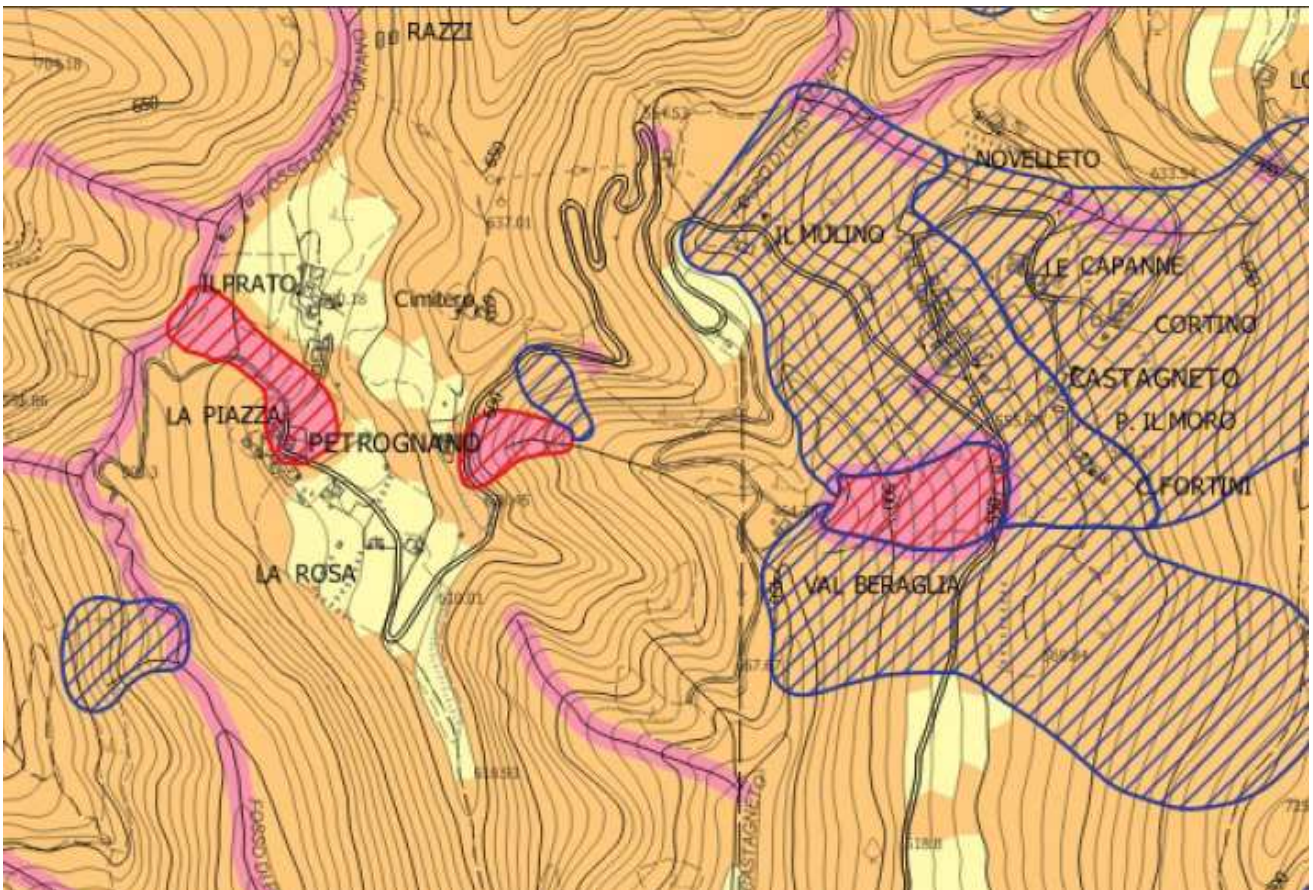



*Estratto cartografia di pericolosità geologica dal vigente S.U. (Geo Eco Engineering 2009-2010)*

 G4 - Pericolosità geomorfologica molto elevata

 G3 - Pericolosità geomorfologica elevata


Estratto cartografia di pericolosità geologica dal vigente S.U. (Geo Eco Engineering 2009-2010)



 Pericolosità geologica elevata (G.3)

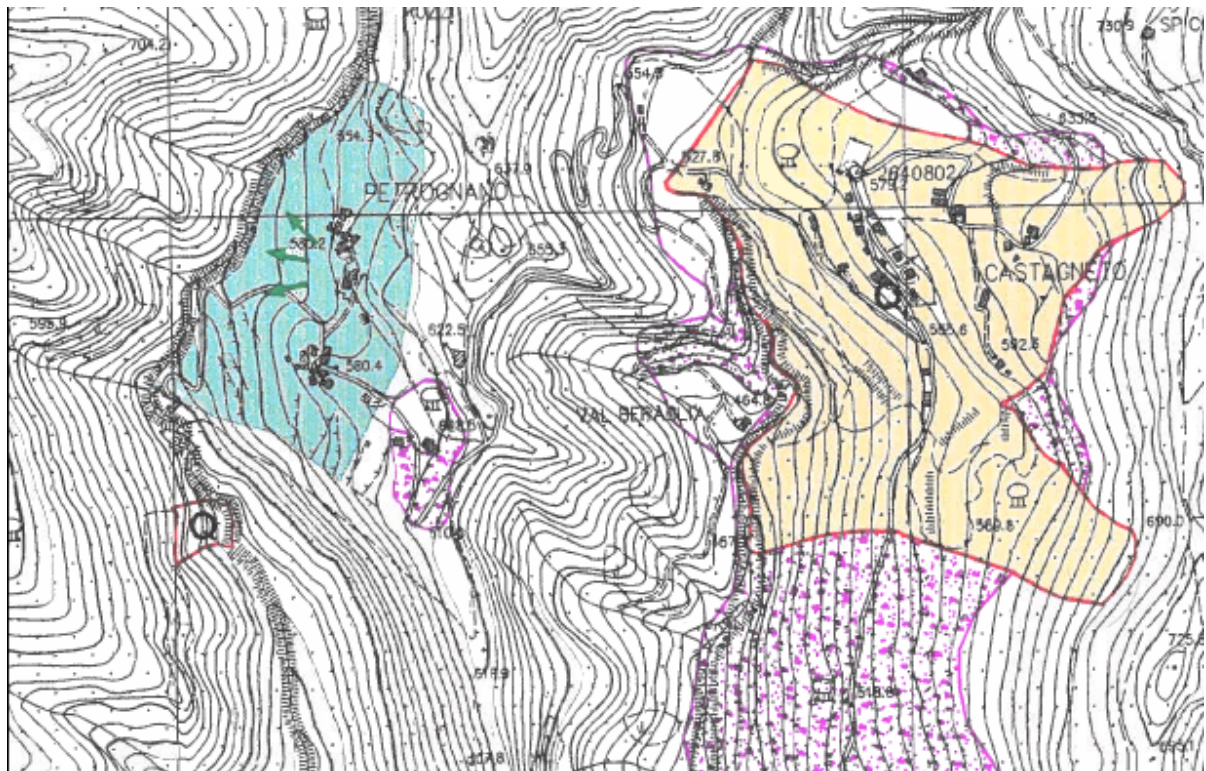
 Pericolosità geologica molto elevata (G.4)

Pericolosità da dissesti di natura geomorfologica da Piano Assetto Idrogeologico (PAI)  
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale




 Aree a pericolosità da dissesti di natura geomorfologica molto elevata (aree P4)

*Nuova pericolosità geologica del PSI (Geo Eco Progetti, 2022)  
già validata da AdB Distrettuale con Decreto n. 58 del 5.7.2021*





#### INSTABILITA' DINAMICA PER FENOMENI FRANOSI

-  Frane quiescenti
-  Pendii con presenza di depositi detritici con pendenza media superiore al 25%
-  Pendii con giacitura a franapoggio meno inclinata del pendio

*Estratto da cartografia ZMPSL (Geo Eco Progetti, maggio 2022)*

In particolare per ciascuno dei tre aspetti correlati ai rischi territoriali geologico, sismico ed idraulico si dettaglia, per estratto dai contenuti delle NTA del RUC, quanto segue in merito alla futura attribuzione delle classi di fattibilità in relazione a quelli che saranno i tipi di intervento prescelti sulle varie porzioni del comparto specificando e riportando le eventuali prescrizioni e/o salvaguardie:

#### **fattibilità geologica e sismica**

In relazione alle codifiche della **disciplina del vigente strumento urbanistico**, dall'apposito abaco pericolosità geologica e sismica / tipologia di intervento, si ricava per la previsione in oggetto (adeguamento di esistente viabilità da realizzarsi mediante modesto sbancamento) classe di fattibilità geologica e sismica F3 (in relazione ai criteri definiti nel Reg. Reg. n. 26/R/2007 ancorchè abrogato e sostituito dal recente Reg. Reg. n. 5/R/2020). In relazione ai recenti criteri di cui al Reg. Reg. n. 5/R si espongono nel proseguo della presente trattazione i criteri di fattibilità relativi alla previsione stessa oggetto della presente variante alla S.U..

**CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE DELLA CLASSE DI FATTIBILITA' IN FUNZIONE DEL TIPO DI INTERVENTO EDILIZIO O URBANISTICO E DEL GRADO DI PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA e SISMICA DELL'AREA**

TIPO DI INTERVENTO: EDILIZIO/URBANISTICO	GRADO DI PERICOLOSITA' GEOMORFOLOGICA - SISMICA			
	G1 - S1	G2 - S2	G3 - S3	G4 - S4
Scavi e rinterrati di qualsiasi genere connessi alle opere di cui al presente abaco. a) di altezza modesta (°) b) di altezza non modesta	F1 F1	F1 F2	F2 F3	<b>F3</b> F4 (*)
Aree destinate all'ampliamento di sede stradale esistente o alla realizzazione di nuovi brevi tratti di viabilità di ingresso, servizio o per il miglioramento dell'attuale viabilità, nuova viabilità forestale e antincendio.	F1	F1	F2	<b>F3</b>
Aree destinate a parcheggi pubblici e/o privati: - a raso (realizzate con mantenimento delle attuali quote e/o morfologia); - con modesti sbancamenti e riporti (°); - con sbancamenti o riporti non modesti o in sotterraneo.	F1 F1 F1	F1 F2 F2	F2 F2 F3	F3 <b>F3</b> F4(*)

(°) Sarà cura del progettista valutare quali sono gli scavi o riporti di altezza "modesta", cioè quelli che non comportano problematiche di instabilità.

**fattibilità idraulica**

In relazione alle codifiche della **disciplina del vigente strumento urbanistico**, dall'apposito abaco pericolosità idraulica / tipologia di intervento, si ricava per la previsione in oggetto (adeguamento di esistente viabilità da realizzarsi mediante modesto sbancamento) classe di fattibilità idraulica F1 non soggetta a prescrizioni e/o particolari criteri per l'attuazione.

**CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE DELLA CLASSE DI FATTIBILITA' IN FUNZIONE DEL TIPO DI INTERVENTO EDILIZIO O URBANISTICO E DEL GRADO DI PERICOLOSITA' IDRAULICA (ex Regolamento Regionale n. 26/R) DELL'AREA INTERESSATA**

TIPO DI INTERVENTO: EDILIZIO/URBANISTICO	GRADO DI PERICOLOSITA' IDRAULICA			
	I.1	I.2	I.3	I.4
<b>NUOVI INTERVENTI</b>				
Nuovi edifici, ampliamenti di esistenti edifici che prevedano nuova occupazione di suolo , parcheggi e viabilità con dimensioni <50 mq.	<b>F1</b>	F1	F2	F3
Nuovi edifici, ampliamenti di esistenti edifici che prevedano nuova occupazione di suolo , parcheggi e viabilità con dimensioni > 50 mq.	<b>F1</b>	F1	F3(°)	F4(°)
Scavi e sbancamenti	<b>F1</b>	F1	F1	F1

**SALVAGUARDIE SOVRACCOMUNALI**

**AREE A PERICOLOSITA' da DISSESTI di NATURA GEOMORFOLOGICA nel P.A.I. della A.d.B. DISTRETTUALE dell'APPENNINO SETTENTRIONALE**

Il "Piano di Bacino del Fiume Arno, stralcio Assetto Idrogeologico (PAI Arno)" e le relative misure di salvaguardia fu approvato con D.P.C.M. del 6.5.2005. Ad oggi, gli elaborati che lo costituivano hanno perso vigenza ad eccezione delle "Norme di Attuazione ed Allegati" nella consistenza degli artt. 10, 11 e 12 il cui normato si applica ai perimetri classificati rispettivamente in classe P4, P3 e P2/P1 delle "mappe di pericolosità da dissesti di natura geomorfologica" del PAI Distrettuale dell'Appennino Settentrionale "dissesti geomorfologici", fino al momento della sua definitiva approvazione.

Nella [Gazzetta Ufficiale n. 9 del 13.01.2020](#) è stato pubblicato il comunicato dell'adozione del "Progetto di Piano di bacino del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale, stralcio Assetto Idrogeologico per la gestione del

rischio da dissesti di natura geomorfologica” relativo al territorio dei bacini del fiume Arno, del fiume Serchio e dei bacini della Toscana.

Il progetto di Piano (PAI distrettuale Appennino Settentrionale) è stato adottato con [delibera della Conferenza Istituzionale Permanente n.20 del 20 dicembre 2019](#).

Una volta completato l'iter di approvazione, il PAI “dissesti geomorfologici” sostituirà interamente i singoli PAI vigenti per il bacino del fiume Arno, bacino del fiume Serchio ( pericolosità da frana) e bacini regionali toscani (Toscana Nord, Toscana Costa e Ombrone).

Con la pubblicazione in Gazzetta Ufficiale del comunicato di adozione del Progetto di Piano ha avuto inizio l'iter che porterà all'approvazione del Piano. Particolare importanza riveste la fase di consultazione e osservazione, aperta a tutti i soggetti pubblici e privati interessati dagli effetti del Piano.

Di tale procedura si riporta lo schema esemplificativo riassuntivo pubblicato dalla stessa Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale.

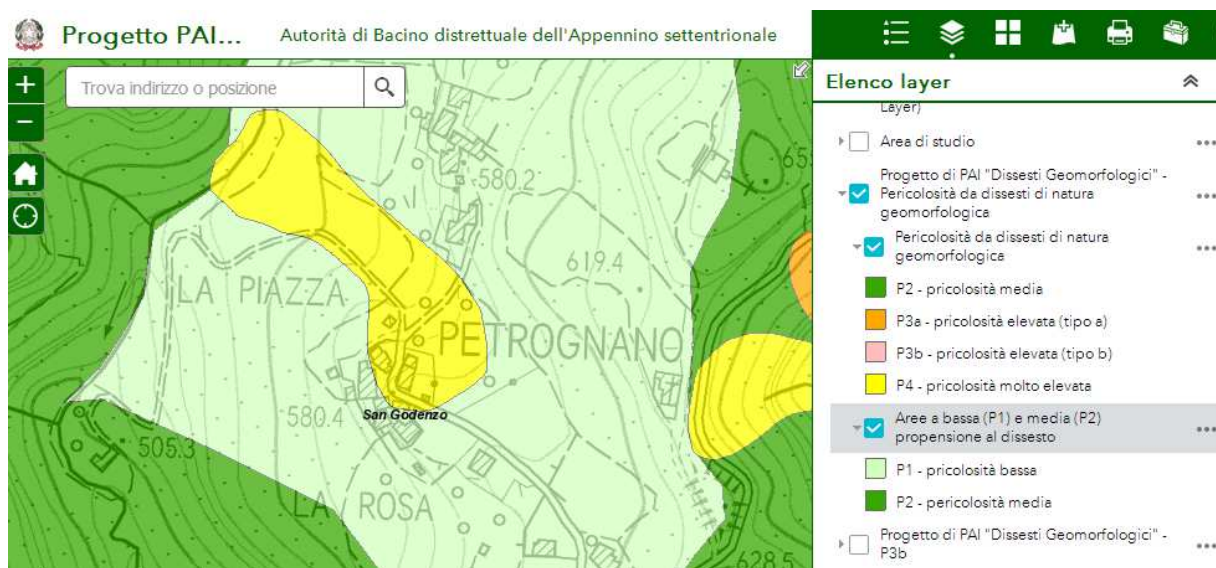
Nella adozione della “proposta di piano” non sono state previste misure di salvaguardia con effetti immediatamente efficaci per i privati. Solo con l'adozione definitiva del Piano, e la sua approvazione finale, saranno applicate le norme d'uso indicate nella disciplina di piano. **Sino a quel momento si continuano, comunque, ad applicare le norme dei PAI vigenti (nel caso specifico PAI A.d.B. Fiume Arno) a meno di aver proceduto a quanto disposto ai comma 4 e 5 dell'art. 15 della stessa Disciplina di Piano Distrettuale.**

**A tal proposito si riporta che l'Amministrazione comunale di San Godenzo ha già provveduto alle attività del caso ed ottenuto dalla Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale emissione del Decreto del Segretario Generale A.d.B. Distretto Appennino Settentrionale n. 58 del 05.07.2021 con oggetto:**

**Decreto del Segretario Generale n..... del ..... recanti “Piano di bacino del fiume Arno, stralcio “Assetto Idrogeologico” (PAI Arno) – Articolo 68 comma 4bis e 4ter del d.lgs. 152/2006 e artt. 27 e 32 delle norme di attuazione “Adeguamento degli strumenti di governo del territorio”. Approvazione modifiche della perimetrazione delle aree a pericolosità da frana e da processi geomorfologici di versante della cartografia del PAI relativa ai Comuni di Londa, Pelago, Pontassieve, Rufina e San Godenzo.**

**Progetto di Piano di bacino del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale, stralcio “Assetto Idrogeologico per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica relativo al territorio dei bacini del fiume Arno, del fiume Serchio e dei bacini della Toscana” (PAI dissesti geomorfologici) - Art. 15 della disciplina del progetto di PAI. Esame e accoglimento osservazione al progetto di Piano e aggiornamento del quadro conoscitivo della pericolosità”.**

**Il quadro conoscitivo relativo all'aspetto “dissesti geomorfologici” allestito per la presente variante urbanistica risulta pertanto conforme e coerente, a scala territoriale, con il quadro conoscitivo del PAI Distrettuale (vedi stralcio cartografico sotto riportato)**



Per quanto concerne le salvaguardie sovracomunali di cui al D.P.C.M. del 6.5.2005 "Approvazione del Piano di Bacino del Fiume Arno, stralcio Assetto Idrogeologico" e delle relative misure di salvaguardia circa le aree ricadenti nelle perimetrazioni di cui alle classi P.F.4 / P4 gli interventi di trasformazione urbanistica e/o edilizia saranno subordinati al rispetto ed all'osservanza delle disposizioni a carattere prescrittivo di cui all'art. 10 delle NTA del PAI Arno:

Art. 10 - Aree a pericolosità molto elevata (P.F.4) da processi geomorfologici di versante e da frana.

*Nelle aree P.F.4, sono consentiti, purché nel rispetto del buon regime delle acque:*

- a. *interventi di consolidamento, sistemazione e mitigazione dei fenomeni franosi, nonché quelli atti a indagare e monitorare i processi geomorfologici che determinano le condizioni di pericolosità molto elevata, previo parere favorevole dell'Autorità di Bacino sulla conformità degli interventi con gli indirizzi dalla stessa fissati;*
- b. *interventi necessari per la manutenzione di opere pubbliche o di interesse pubblico;*
- c. **interventi di ristrutturazione (L.R. 1/2005) delle opere e infrastrutture pubbliche nonché della viabilità e della rete dei servizi privati esistenti non delocalizzabili, purché siano realizzati senza aggravare le condizioni di instabilità e non compromettano la possibilità di realizzare il consolidamento dell'area e la manutenzione delle opere di consolidamento;**
- d. *interventi di demolizione senza ricostruzione, di manutenzione ordinaria e straordinaria, di restauro, di risanamento conservativo, così come definiti alle lettere a), b) e c) dell'art. 3 del D.P.R. n.380/2001 e successive modifiche e integrazioni e nelle leggi regionali vigenti in materia;*
- e. *adeguamenti necessari alla messa a norma delle strutture, degli edifici e degli impianti relativamente a quanto previsto dalle norme in materia igienico-sanitaria, sismica, di sicurezza ed igiene sul lavoro, di superamento delle barriere architettoniche;*
- f. *interventi di ristrutturazione edilizia (L.R. 1/2005), così come definiti alla lettera d) dell'art. 3 del D.P.R. n.380/2001 e successive modifiche e integrazioni e nelle leggi regionali vigenti in materia, che non comportino aumento di superficie o di volume né aumento del carico urbanistico, purché siano realizzati senza aggravare le condizioni di instabilità e non compromettano la possibilità di realizzare il consolidamento del movimento franoso e la manutenzione delle opere di consolidamento;*
- g. *interventi sugli edifici esistenti, finalizzati a ridurre la vulnerabilità, a migliorare la tutela della pubblica incolumità, che non comportino aumenti di superficie, di volume e di carico urbanistico.*
- h. *nuovi interventi relativi a opere pubbliche o di interesse pubblico, non diversamente localizzabili, a condizione che siano preventivamente realizzate le opere funzionali al consolidamento e alla bonifica del movimento franoso previo parere favorevole dell'Autorità di Bacino sulla conformità di tali interventi con gli indirizzi dalla stessa fissati.*

*Nelle aree P.F.4 non è consentito aumento del carico urbanistico.*

## VINCOLO IDROGEOLOGICO



### Vincolo idrogeologico


#### Regio Decreto 3267/1923 (Fonte Amministrazioni Provinciali)

Regio Decreto 3267/1923 (Fonte Amministrazioni Provinciali)

 R.D. n.3267/1923

#### Perimetrazione meramente ricognitiva delle aree boscate

Aree boscate (Fonte Uso del suolo 2016\_RT)

 Zone boscate: Zone con vegetazione arbustiva e/o erbacea;  
Strade in aree boscate

*Perimetrazione da fonte provinciale del Regio Decreto 3267/1923 e aree boscate dalla banca dati dell'Uso del Suolo della Regione Toscana anno 2016 - Scala 1:5.000 - Rid. da GEOscopio - Regione Toscana*

L'area in esame risulta tutelata da Vincolo Idrogeologico ai sensi del R.D. n. 3267 del 30.12.1923.

## 2. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE

### 2.1 Inquadramento geologico regionale, caratteri tettonici e strutturali

Da un punto di vista geologico appartiene alla fascia centrale della catena orogenetica dell'Appennino settentrionale, parte integrante della fascia di deformazione perimediterranea sviluppatasi prevalentemente in tempi neogenici e costituita da una struttura complessa di falde e thrust formatasi in relazione a più fasi tettoniche. Queste sono legate agli eventi verificatisi a partire dal Cretaceo superiore in seguito alla completa chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese ed alla successiva collisione continentale tra la placca europea e quella adriatica.

In tale contesto si distinguono una fase oceanica ed una fase ensialica. La fase oceanica inizia al limite tra il Cretaceo inferiore ed il Cretaceo superiore, e termina nell'Eocene medio con la completa chiusura dell'Oceano Ligure-Piemontese. Durante questa fase si forma un prisma d'accrezione costruito dall'impilamento per sottoscorrimento verso W delle coperture oceaniche e di parte del loro basamento, che andranno così a costituire le cosiddette Unità Liguri. Segue, nell'Eocene medio-superiore la collisione tra il margine continentale europeo (Sardo-corso) e quello adriatico che dà inizio alla fase intracontinentale dell'orogenesi appenninica. In questa fase si ha lo sviluppo di una tettonica a thrust e falde con sottoscorrimento verso W dell'Unità Toscana, prima, e di quelle Umbro-marchigiane poi, sotto le unità precedentemente impilate. Fenomeni gravitativi e di retroscorrimento, anche importanti, accompagnano in superficie questa strutturazione crostale. In questa fase il fronte compressivo, che migra verso E, è seguito, a partire dal Miocene medio, da un fronte distensivo, legato alla distensione crostale che ha portato all'apertura del Bacino Tirrenico. Attualmente i due regimi tettonici diversi coesistono in due fasce contigue della catena: nel versante tirrenico è attivo il regime distensivo, in quello adriatico quello compressivo.

Da un punto di vista regionale questa complessa storia tettonica ha portato prima (Cretaceo superiore-Eocene) allo sradicamento delle Unità Liguri dal loro substrato oceanico e al loro appilamento su se stesse secondo un ordine tettonico-geometrico che vede in alto le unità più interne e in basso le più esterne, tra cui ricordiamo l'Unità della Calvana. Tutto questo complesso di Unità Liguri sovrasta tettonicamente l'Unità di Canetolo (Eocene-Oligocene) attribuita a una zona di transizione con il margine continentale adriatico. Successivamente, dopo la messa in posto della Falda Toscana (Dominio Toscano interno), avvenuta nel Miocene medio-superiore, sopra la più esterna Unità Cervarola-Falterona, le Unità Liguri si sono rimosse, per mettersi in posto prima sopra la Falda Toscana, e poi sopra l'Unità di M. Cervarola già sovrascorsa verso E (Tortoniano) sulla Marnoso arenacea del Dominio Umbro-Marchigiano.

Successivamente alla loro prima messa in posto, i principali accavallamenti sono stati rimobilizzati e riattivati secondo sovrascorrimenti minori interni alle varie unità, dando localmente geometrie molto complesse con sovrascorrimenti precedentemente tagliati e ripiegati da quelli successivi. Tali fasi compressive sono riferibili principalmente al Messiniano, al Pliocene inferiore e nei settori più esterni al Pliocene superiore.

Nel frattempo erano cominciati nelle aree più occidentali i movimenti disgiuntivi che hanno portato, attraverso una serie di faglie normali principali immergenti verso W, allo smembramento della catena a falde, precedentemente costituita, con lo sviluppo di depressioni tettoniche a semi graben (bacini intermontani) sempre più giovani da W verso E, tra cui ricordiamo il bacino del Valdarno superiore, sviluppatosi a partire dal Pliocene superiore, e i bacini di Firenze-Pistoia, del Mugello e del Casentino, attivi dal Pleistocene inferiore.

Infatti, alla fine del Miocene, dopo che le spinte orogenetiche che avevano costituito la catena appenninica si erano attenuate o spente, si instaurò una tettonica distensiva caratterizzata da grandi faglie normali orientate in direzione NW-SE e NNW-SSE, che crearono numerosi bacini strutturali, allungati appunto in tali direzioni.

In alcuni di tali bacini si crearono degli ambienti fluvio-lacustri, con deposizione dei relativi sedimenti.

Questi bacini estensionali sono stati interessati anche da vari eventi compressivi, che si sarebbero alternati alla prevalente tettonica estensionale. Vi sono ancora indeterminazioni nel definire queste pulsazioni, se siano da mettere in relazione con generali shock compressivi dell'intera catena appenninica, oppure se siano legate a costipamento laterale causato da repentini approfondimenti dei bacini in concomitanza con pulsazioni estensive maggiormente pronunciate legate alle maggiori compressioni nella zona esterna della catena.

Dal punto di vista geologico, stratigrafico e strutturale il territorio si può dividere quindi, in maniera schematica, in due zone, una centrale e meridionale caratterizzata dalla presenza di terreni flyschoidi da calcareo marnosi ad argillitico marnosi e arenaceo siltitici appartenenti al Dominio Ligure (Unità di Monte Morello) e Subligure (Unità di Canetolo), e l'altra settentrionale con presenza di terreni appartenenti alle formazioni torbiditiche arenacee del

Dominio Toscano (Unità di M. Cervarola, Unità dell'Acquerino e Unità di M. Castel Guerrino) e del Dominio Umbro-Marchigiano.

Le rocce più antiche affioranti nell'area in esame sono quelle appartenenti alle unità del Dominio Ligure, in particolare alle formazioni cretacico-eoceniche del Dominio Ligure Esterno (Unità di Monte Morello) che giacciono in discordanza sui depositi torbiditici oligo-miocenici del Dominio Toscano (Unità di M. Cervarola, Unità dell'Acquerino e Unità di M. Castel Guerrino), a seguito del sovrascorrimento e sovrapposizione in età miocenica (medio-superiore) delle Unità Liguri e Sub-Liguri sui terreni appartenenti al Dominio Toscano.

In particolare, nel settore di interesse le formazioni cretacico-eoceniche dell'Unità di Monte Morello sono composte principalmente dalla Formazione di Sillano, costituita dall'alternanza di prevalenti argilliti, calcilutiti, marne calcaree e argillitiche e livelli arenacei e calcarenitici, dalla Pietraforte costituita da arenarie e siltiti e dalla Formazione di Monte Morello, flysch carbonatico costituito da prevalenti calcari marnosi, calcari micritici, marne e subordinati livelli argillitici. Le formazioni paleocenico-oligoceniche del Dominio Subligure sono costituite da formazioni prevalentemente argillitico-calcaree (Argille e Calcari di Canetolo) e da depositi torbiditici arenacei (Arenarie di Monte Senario) con associati depositi calcareo marnosi e arenaceo calcarei (Brecce di Monte Senario).

Nell'area di studio vi sono, inoltre, litologie riferibili alla Successione Epiligure, caratterizzate da litotipi sedimentatisi sulle coltri liguridi contemporaneamente al carreggiamento di queste ultime verso il Dominio Toscano e poi verso l'area padana in movimento e traslate insieme ad esse verso oriente.

Per quanto riguarda le formazioni torbiditiche oligo-mioceniche del Dominio Toscano, affiorano le litologie appartenenti alla formazione delle Arenarie del M. Falterona, alla Formazione dell'Acquerino e alla Formazione del Torrente Carigiola nelle loro varietà di litofacies, da quella arenaceo torbiditica con intercalazioni pelitico siltitiche, a quella prevalentemente pelitico siltitica a quella olistostromica caratterizzata da brecce argillose e calcaree in matrice argillitica.

La sequenza stratigrafica torbiditica del Dominio Toscano presenta l'alternarsi di depositi torbiditici prevalentemente arenaceo pelitici e di depositi emipelagici formati da marne e peliti talora silicizzate alternate a sottili livelli arenitici.

In particolare i rapporti stratigrafici di queste formazioni sono definiti dalla sequenza basale marnoso-argilloso-calcareo, essenzialmente paleogenica, alla quale fa seguito una formazione torbiditica, prevalentemente arenacea grossolana che passa verso l'alto con gradualità ad un'altra formazione torbiditica caratterizzata da strati arenaceo-siltitici sottili con abbondante porzione siltoso-marnosa. La successione è chiusa da sedimenti essenzialmente marnosi.

Nel complesso le Unità del Dominio Toscano sono riconducibili ad una sequenza completa di cuneo clastico di avanfossa, poi tettonicamente sradicata a livello delle argilliti basali.

I depositi del Dominio Umbro-Marchigiano, sovrastati tettonicamente da quelli del Dominio Toscano, sono in questo settore rappresentati dai depositi arenacei di origine torbiditica della Marnoso-arenacea (Langhiano-Serravalliano), che costituiscono il riempimento di un bacino di avanfossa appenninico (migrante verso NE), sviluppato tra il Langhiano e il Tortonian.

In vari settori alle suddette formazioni si sovrappongono i terreni recenti di copertura costituiti dai depositi eluvio-colluviali, dai depositi detritici di versante, dalle alluvioni recenti e dai depositi alluvionali attuali.

In particolare il settore in esame è caratterizzato principalmente dalla presenza di depositi eluvio-colluviali, costituiti da materiale con elementi eterometrici prevalentemente fini in abbondante matrice sabbioso-limosa, derivanti da trasporto per ruscellamento e di depositi detritici di versante e di frana, costituiti da accumuli di materiale litoide eterometrico.

Inoltre nei settori vallivi si riscontrano i depositi alluvionali recenti e attuali, costituiti da ciottolami in matrice limoso-sabbiosa con tessitura da clasto a matrice sostenuta, ghiaie, sabbie e limi talora variamente pedogenizzati.

I depositi alluvionali sono presenti in maniera diffusa lungo i corsi d'acqua principali (Fiume Arno e Fiume Sieve) e dei loro affluenti.

In corrispondenza dei settori urbanizzati si ha la presenza di terreni antropici di riporto.

Strutturalmente, il motivo dominante dell'area è quindi l'accavallamento tra le due serie (Unità Tettoniche Toscane e le Unità Tettoniche Liguri), che si esplica attraverso una linea di sovrascorrimento, con direzione appenninica, ben seguibile dai settori di SE fino ai settori di NO: questa linea è evidenziata da due motivi geologici fondamentali, e cioè la presenza quasi costante di formazioni a prevalente litologia pelitico marnosa e la presenza di vaste aree coperte da detriti di falda e paleofrane.

Spesso gli orizzonti pelitico marnosi hanno agito come superficie di scollamento e di scorrimento tra le due serie.

Naturalmente l'accavallamento tra le due serie non si esplica solamente in un piano di sovrascorrimento ma attraverso una serie di faglie, più o meno parallele tra loro, che presentano medesime caratteristiche.

Tra le strutture principali si annoverano anche quelle legate al thrust dell'Unità di M. Cervarola sulla parte più interna della Marnoso arenacea, ed anche le strutture legate al thrust interno alla Marnoso arenacea stessa.

Sovente il thrust del Cervarola sulla Marnosa Arenacea vede l'interposizione di una terza scaglia tettonica. Questa ulteriore scaglia prende il nome di Unità di Castel Guerrino, che è nella sua interezza rappresentata da depositi torbiditici che, verosimilmente, dovevano rappresentare i sedimenti depositi sulla scarpata esterna dell'avanfossa delle Arenarie del Falterona.

Da un punto di vista tettonico-strutturale, il quadro che caratterizza quest'area mostra una storia complessa e coerente con gli eventi tettonici che hanno strutturato l'edificio a falde dell'Appennino Settentrionale.

Infatti le formazioni affioranti nel territorio in esame appartengono a diverse Unità tettoniche giustapposte o sovrapposte secondo una dinamica orientata principalmente E-NE.

Nel complesso, tettonicamente la zona ha subito due fasi tettoniche distinte, una compressiva, più antica, che ha prodotto numerose faglie inverse, compreso il sovrascorrimento precedentemente descritto, ed una fase più recente, a carattere distensivo, che ha creato nuovi elementi strutturali, talora ad andamento anti-appenninico ed ha riattivato come normali alcune delle precedenti strutture a carattere inverso.

Per quanto riguarda le strutture compressive che hanno strutturato la catena appenninica nel territorio intercomunale, si ricordano gli importanti sovrascorrimenti che giustappongono i litotipi attribuibili alle unità liguri con i termini flyschoidi arenaceo-marnosi dell'unità toscana del M. Cervarola e quest'ultimi sui termini della Formazione Marnoso-arenacea.

Per quanto riguarda la tettonica rigida sono presenti strutture di taglio ad andamento sia appenninico che antiappenninico.

Si nota la prevalenza di due principali famiglie di lineazioni orientate rispettivamente WNW-ESE e SSW-NNE.

Le strutture appartenenti alla prima famiglia sono di direzione appenninica e sono riconducibili ad eventi tettonici sia in regime compressivo (faglie inverse e sovrascorrimenti), che a successivi regimi distensivi che hanno portato alla formazione di nuove strutture a carattere normale e la riattivazione in senso diretto di precedenti strutture inverse. A tale famiglia appartiene anche il corso del Fiume Arno da Rosano alla confluenza col Borro delle Sieci.

Per quanto riguarda le strutture appartenenti alla seconda famiglia queste sono definite di tipo antiappenninico e sono rappresentate principalmente da faglie normali che risultano geneticamente legate alle vicende distensive neogeniche. Tra queste seconde strutture si segnala l'importante dislocazione tettonica che determina il corso del Fiume Sieve fino a Dicomano.

## 2.2 Carta geologica

La carta geologica è stata redatta, in scala 1:10.000 (su base cartografica C.T.R.) e rappresenta la sintesi delle conoscenze geologiche dell'area. La sua redazione deriva dall'analisi della ricca documentazione cartografica disponibile in letteratura, verificata attraverso specifici sopralluoghi su affioramenti rappresentativi, effettuati anche allo scopo di documentare le scelte e le classificazioni adottate.

I dati geologici e geomorfologici sono stati estrapolati, come indicato nelle specifiche tecniche regionali e nazionali, sia da precedenti studi già eseguiti nei comprensori comunali, che da nuovi originali rilevamenti di dettaglio appositamente eseguiti nel corso del presente studio.

Per quanto riguarda il reperimento bibliografico di studi geologici e geomorfologici pregressi, ci si è riferiti alle seguenti indagini:

- Cartografia C.A.R.G. Regione Toscana (compresi originali d'Autore)
- Continuum Territoriale Geologico della Regione Toscana;
- Carte geologiche e geomorfologiche di supporto agli Strumenti Urbanistici Comunali;
- Studi geologici e geomorfologici di dettaglio di supporto alla progettazione di opere pubbliche e private;
- Progetto IFFI (ISPRA);
- Banca dati regionale S.I.R.A. e Provincia di Firenze Servizio Acque (Mappa pozzi e derivazioni) e ISPRA per i pozzi idrici.

Tutti i dati reperiti sono stati fra loro confrontati e "validati" mediante mirati percorsi di sopralluogo e rilevamenti originali, anche mirati alla realizzazione delle necessarie interpolazioni e interpretazioni geologiche, specialmente in corrispondenza delle aree coperte da terreno agrario, da boschi e da insediamenti urbani.

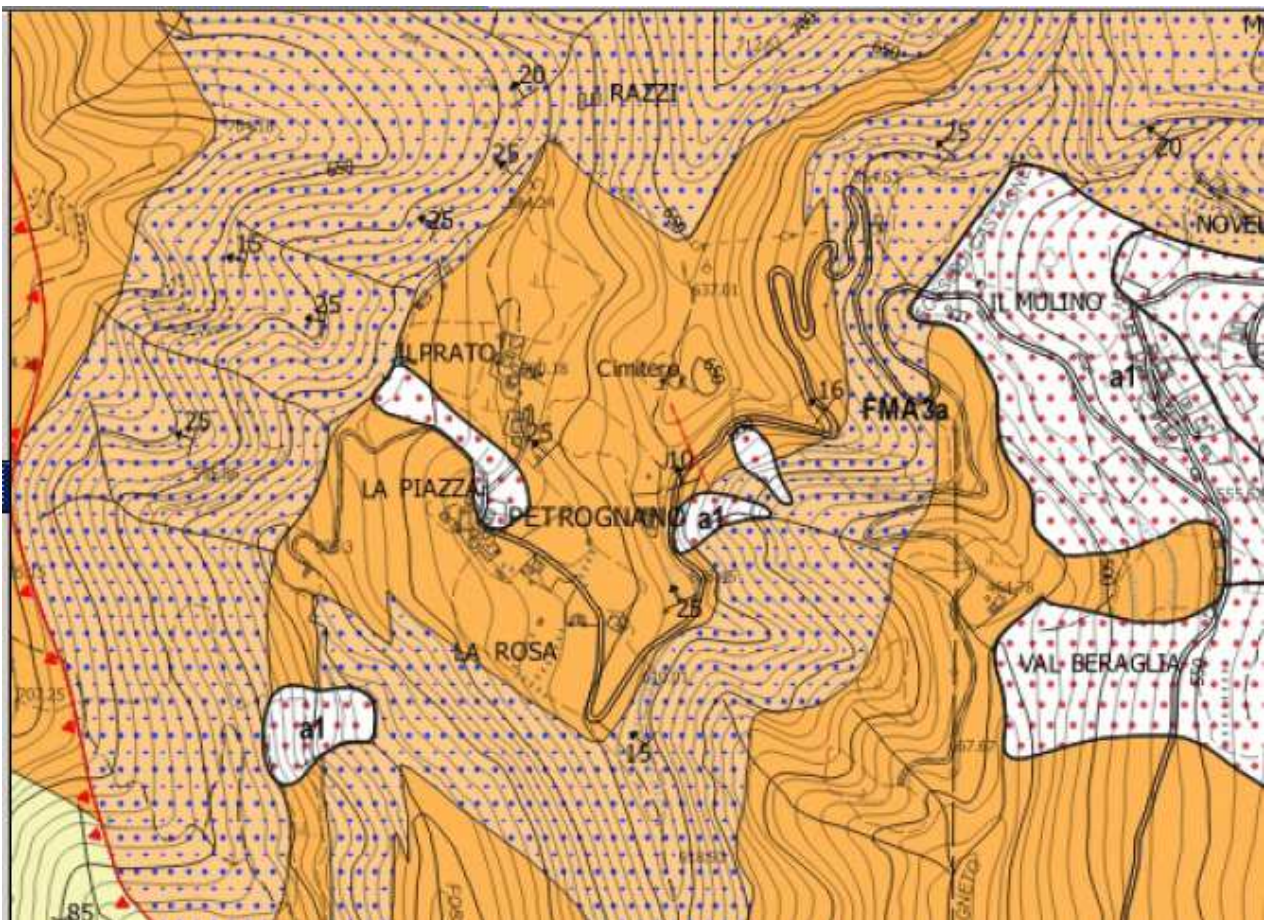



I terreni oggetto di studio appartengono per la quasi totalità, ad eccezione dei depositi di copertura, alle formazioni del substrato cretaceo-cenozoico e le suddivisioni litostratigrafiche o allostratigrafiche che sono proposte in letteratura permettono di avere un quadro completo ed esaustivo dei caratteri litologici e sedimentologici, nonché del significato paleo-ambientale della successione in esame.

Nel presente lavoro si è adottata una rappresentazione cartografica basata sulle simbologie proposte dal progetto regionale VEL-DOCUP (Valutazione Effetti Locali) in ottemperanza alle indicazioni delle ICMS 2012.






Per quanto riguarda le sigle ed i cromatismi delle unità geologiche, in assenza di riferimenti specifici del suddetto progetto, si è fatto riferimento alle indicazioni del Servizio Geologico – ISPRA, che adotta una classificazione in unità litostratigrafiche per le rocce del substrato litoide ed un criterio genetico per la suddivisione dei depositi quaternari definiti ubiquitari (frane, depositi di versante, coltri detritiche ecc.).

La legenda delle unità geologiche proposta si basa, pertanto, sulle sigle ed i criteri CARG mantenendo i tradizionali riferimenti alla nomenclatura classica, ormai consolidata nella letteratura e nella cultura geologica dell'area in esame.



 a1 - Corpo di frana

## DOMINIO UMBRO-MARCHIGIANO

	FMA1 - Formazione Mamoso-arenacea: Membro di Biserno - Burdigaliano - Messiniano
	FMA2 - Formazione Mamoso-arenacea: Membro di Corniolo - Burdigaliano - Messiniano
	FMA3 - Formazione Mamoso-arenacea: Membro di Premilcuore - Burdigaliano - Messiniano
	FMA3a - Formazione Marnoso-arenacea/Membro di Premilcuore: Litofacies arenacea di Campigna - Burdigaliano - Messiniano
	FMA4 - Formazione Mamoso-arenacea: Membro di Galeata - Burdigaliano - Messiniano

Estratto carta geologica dal PSI dei Comuni della Val di Sieve (Geo Eco Progetti, 2022)

Si descrivono brevemente le formazioni.

### DEPOSITI QUATERNARI

Sono costituiti da sedimenti olocenici riconducibili a:

- corpi di frana (a1) (Olocene)

I corpi di frana (a1) sono costituiti da elementi eterometrici prevalentemente grossolani, dispersi in matrice sabbiosa e sabbioso limosa e si trovano accumulati per gravità lungo i versanti o ai piedi di scarpate. Vi si inseriscono tutte quelle masse detritiche che presentano caratteristiche di caoticità e disarticolazione, ancora ben riconoscibili sul terreno e dove gli accumuli dovuti a frane recenti interessano aree sulle quali è possibile una ripresa del movimento per la presenza di materiali sciolti, per l'assenza della vegetazione e per la sovente presenza di pendenze elevate. La presenza di tale deposito si rinviene nell'area di previsione.

### DOMINIO UMBRO-MARCHIGIANO

- Formazione Marnoso-arenacea: Membro di Premilcuore (FMA3) (Burdigaliano – Messiniano)

Torbiditi arenaceo pelitiche generalmente caratterizzate da un rapporto arenite/pelite da poco inferiore a 1 a circa 2, talora con presenza di orizzonti con rapporto arenite/pelite fino a 6 e strati amalgamati.

Si osserva una cementazione differenziale nei letti arenitici, generalmente da media a buona alla base e debole al tetto.

- Formazione Marnoso-arenacea: Membro di Premilcuore – Litofacies arenacea di Campigna (FMA3a) (Burdigaliano – Messiniano)

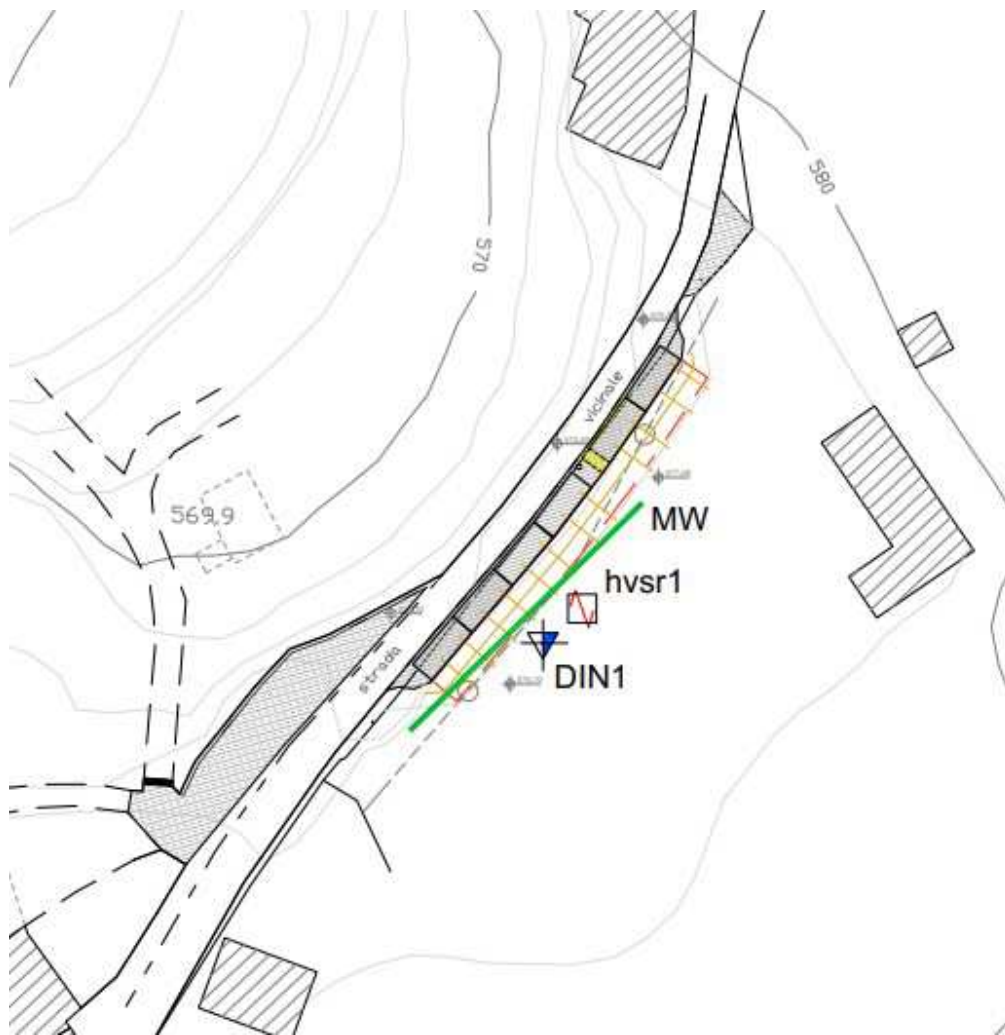
Nei settori a ridosso dei termini dell'Unità di Castel Guerrino si riconosce una litofacies interna al Membro di Premilcuore costituita da strati arenacei amalgamati con rapporto arenite/pelite anche maggiore di 6, spessa da alcune decine di metri fino a circa 200 metri. Presente nell'immediato intorno della zona di intervento con affioramenti lapidei che presentano giacitura a franapoggio meno inclinata del pendio.

### 2.3 Successione stratigrafia locale e Modello Geologico di Riferimento (MGR)

#### Dati geognostici e stratigrafici desunti dalle indagini svolte in sito a supporto della presente procedura

Per supportare la presente trattazione, per la definizione della sequenza stratigrafica (Modello Geologico di Riferimento: MGR) e per la determinazione del Modello Geotecnico riguardante il volume significativo delle opere di progetto, nonché per la caratterizzazione e la modellazione sismica delle unità geotecniche rilevate sono stati considerati i risultati geognostici, geotecnici e sismici derivanti dalle seguenti indagini:

- una prova penetrometrica statica strumentata con canna micropiezometrica;
- prelievo di campione indisturbato in fase di avanzamento penetrometrico, sottoposto ad analisi geotecniche di laboratorio;
- prova sismica attiva congiunta Masw/Remi;
- indagine di sismica passiva tipo Hvsr.



Planimetria di ubicazione delle indagini

Come in precedenza accennato le certificazioni di tutte le prove eseguite sono collazionate in allegato A e di seguito se ne fornisce una breve descrizione.

#### Prova penetrometrica dinamica

Il giorno 16 settembre 2022, la ditta Tecna s.r.l. di Arezzo ha eseguito, utilizzando un Penetrometro Statico-Dinamico "Mod. PAGANI TG63-100/200", una campagna di indagine che ha visto l'esecuzione di n. 1 prova penetrometrica dinamica, denominata DIN1.

L'indagine DIN1, che ha raggiunto la profondità di 9,2 m da p.c., ha rilevato nel sottosuolo la presenza di tre "strati" geotecnici:

- strato n. 1	profondità (m)	0,0-7,6	VCA (n. colpi) 5	Nspt (n. colpi) 8
- strato n. 2	profondità (m)	7,6-9,0	VCA (n. colpi) 12	Nspt (n. colpi) 18
- strato n. 3	profondità (m)	9,0-9,2	VCA (n. colpi) 50	Nspt (n. colpi) 76

Durante lo svolgimento della prova penetrometrica è stato prelevato n. 1 campione di terreno per l'esecuzione di specifiche analisi di laboratorio.

Il campione è stato prelevato alla quota compresa tra 1,0 e 1,5 m dal p.c.

#### Analisi fisico-meccaniche dei terreni

Durante l'esecuzione della prova penetrometrica è stato prelevato con specifico campionatore n. 1 campione di terreno.

Il campione è stato sottoposto a specifiche analisi di laboratorio comprensive delle caratteristiche indice del campione e di quelle di resistenza e deformabilità.

Le analisi sono state svolte presso il Laboratorio Laboter srl di Pistoia (FI).

Un riassunto delle prove eseguite e dei parametri geotecnici che sono stati determinati nel corso delle analisi di laboratorio è riportato nella seguente tabella:

Indagine	DIN1
Campione	C1
Profondità	1,0-1,5 m
□	19,2
W	16,4
A	25,6
L	65,3
S	9,0
G	0,1
LL	37,1
LP	23,7
IP	13,4
IC	1,54
□ CD	28,3
c CD	31,0
□ res	19,4
c res	5,8
Cu	251,0

Legenda:

$\gamma$ (kN/mc) = peso di volume; w (%) = umidità naturale;

A (%) = argilla; L (%) = limo; S (%) = sabbia; G (%) = ghiaia

LL (%) = limite liquido; LP (%) = limite plastico; IP (%) = indice di plasticità; IC = indice di consistenza

$\phi$ CD (°) = angolo di attrito da prove di taglio diretto consolidato lento drenato; cCD (kPa) = coesione da prove di taglio diretto consolidato lento drenato;

$\phi$ res (°) = angolo di attrito residuo da prove di taglio anulare; cres (kPa) = coesione residua da prove di taglio anulare;

Cu (kPa) = pressione a rottura da prova di compressione semplice

#### Indagine di sismica a rifrazione attiva congiunta di tipo Masw/Remi in onde Sh

L'indagine di sismica a rifrazione attiva congiunta Masw/Remi in onde Sh, eseguita dal Dott. Pieroni, ha permesso di determinare in modo dettagliato l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio (o onde Sh) in funzione della profondità attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali o di Rayleigh.

L'indagine congiunta Masw/Remi ha registrato nel sottosuolo la presenza di sismostrati aventi velocità delle onde sismiche di taglio (Vs) inferiori a 200 m/s, per uno spessore complessivo di 1,7 m, a cui segue uno spessore complessivo di 7,9 m costituito da sismostrati aventi velocità delle Vs comprese tra 200 e 370 m/s, con inversione di velocità a partire da 4,4 m dal p.c. dove si passa da sismostrati con velocità Vs comprese tra 300 e 370 m/s a sismostrati con velocità Vs comprese tra 330 e 255 m/s.

A partire da 9,6 m dal p.c., e fino alla profondità investigata di 30,0 m dal p.c., le velocità divengono sempre più crescenti scendendo in profondità sino a raggiungere velocità di ca. 630 m/s.

Dall'indagine è stato, quindi ricavato un valore di  $V_{s,eq}$  pari a 368,4 m/s, riferibile ad una categoria di suolo di fondazione di tipo 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*.

Indagine di sismica passiva a stazione singola (tipo Hvsr)

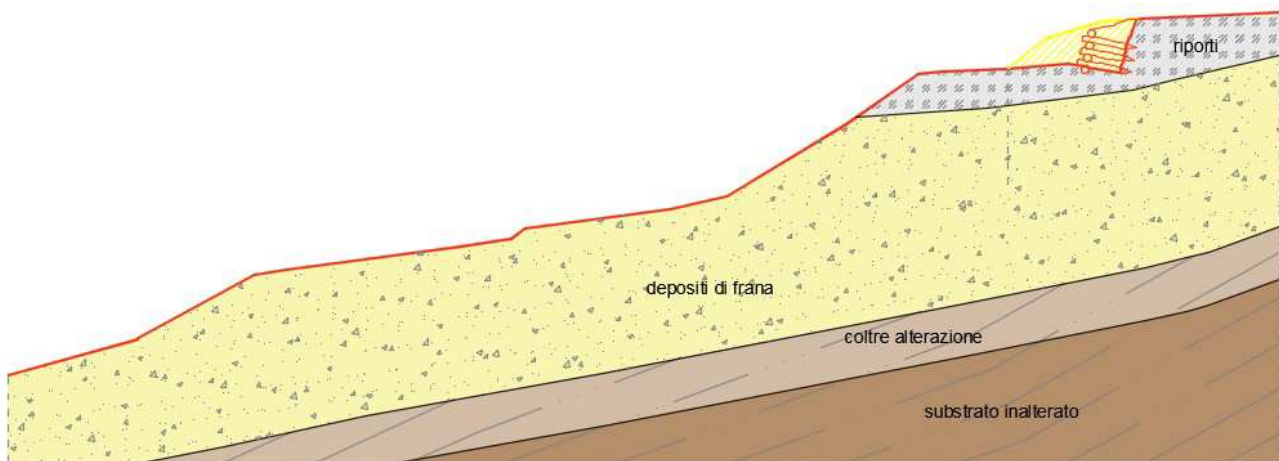
Il Dott. Pieroni nell'area di interesse ha, inoltre, eseguito n. 1 misura di sismica passiva con tecnica a "stazione singola" (HVSR) al fine di determinare la frequenza di risonanza del sito.

La prova ha riscontrato la presenza di un picco significativo del rapporto H/V alla frequenza di 4,51 Hz con ampiezza pari a 3,75, imputabile a un contrasto (alto) di impedenza presente a profondità di circa 10,0 - 15,0 m da p.c., da correlarsi col passaggio tra depositi di copertura (coltre di frana e coltre di alterazione del substrato) e substrato litoide inalterato o scarsamente alterato.

In relazione agli accertamenti svolti si può ricostruire la seguente successione litostratigrafica che va a definire il Modello Geologico di Riferimento (MGR) del sito di interesse:

Dal punto di vista geologico in corrispondenza del settore di interesse si evidenzia, in sintesi, la seguente configurazione lito-stratigrafica rappresentata, partendo dall'alto verso il basso, dalla seguente successione di terreni:

0,0 – 1,5 / 2,5 m da p.c.	Riperti antropici costituiti da materiale prevalentemente fine
1,5 / 2,5 – 9,5 m da p.c.	Terreni detritici di frana costituiti da prevalenti materiali limoso argillosi e limoso sabbiosi con pezzame lapideo sparso
9,5 – 12,0 m da p.c.	Coltre di alterazione del substrato litoide (Formazione Marnoso Arenacea – Membro di Premilcuore) costituito da livelli arenacei e pelitici fortemente alterati e fratturati
12,0 – 30,0 m da p.c.	Formazione Marnoso Arenacea – Membro di Premilcuore costituita dall'alternanza di prevalenti livelli arenacei e siltitici e di subordinati livelli pelitici



Sezioni geologico tecnica interpretativa

### 3. MODELLO GEOTECNICO

Dalla campagna geognostica eseguita si sono ricavati i parametri geotecnici dei terreni compresi nel volume significativo (verifiche SLE), con particolare riguardo per le resistenze a taglio interessanti il presumibile cuneo di rottura (verifiche SLU).

Sulla scorta del Modello Geologico di Riferimento (MGR), si sono evidenziate le diverse unità geotecniche che vanno a costituire il modello geotecnico di base per la progettazione strutturale.

Unità A	tra 0,0 e 1,5 / 2,5 m da p.c. Riporti antropici costituiti da materiale prevalentemente fine
Unità B	tra 1,5 / 2,5 e 9,5 m da p.c. Terreni detritici di frana costituiti da prevalenti materiali limoso argillosi e limoso sabbiosi con pezzame lapideo sparso
Unità C	tra 9,5 e 12,0 m da p.c. Coltre di alterazione del substrato litoide costituito da livelli arenacei e pelitici fortemente alterati e fratturati
Unità D	tra 12,0 e 30,0 m da p.c. Substrato lioide costituito dall'alternanza di prevalenti livelli arenacei e siltitici e di subordinati livelli pelitici

#### ***Parametri nominali e caratteristici k***

##### - Unità A: Riporti antropici costituiti da materiale prevalentemente fine

Peso di volume o densità umida	$\gamma = 19,2 \text{ kN/mc}$
Resistenza in tensioni efficaci	$\phi' = 28,3^\circ; \square'k = 23,6^\circ$ $c' = 31,0 \text{ kPa}; c'k = 20,06 \text{ kPa}$
Resistenza residua	$\phi'_{\text{res}} = 19,4^\circ; \square'_{\text{resk}} = 16,2^\circ$ $c'_{\text{res}} = 0,0 \text{ kPa}$
Resistenza non drenata	$c_u = 251,0 \text{ kPa}; c_{uk} = 148,34 \text{ kPa}$

##### - Unità B: Terreni detritici di frana costituiti da prevalenti materiali limoso argillosi e limoso sabbiosi con pezzame lapideo sparso

Peso di volume o densità umida	$\gamma = 19,0 \text{ kN/mc}$
Resistenza in tensioni efficaci	$\phi' = 24,5^\circ; \square'k = 20,5^\circ$ $c' = 19,0 \text{ kPa}; c'k = 12,29 \text{ kPa}$
Resistenza residua	$\phi'_{\text{res}} = 18,0^\circ; \square'_{\text{resk}} = 15,0^\circ$ $c'_{\text{res}} = 0,0 \text{ kPa}$
Resistenza non drenata	$c_u = 37,5 \text{ kPa}; c_{uk} = 22,16 \text{ kPa}$

##### - Unità C: Coltre di alterazione del substrato litoide costituito da livelli arenacei e pelitici fortemente alterati e fratturati

Peso di volume o densità umida	$\gamma = 19,65 \text{ kN/mc}$
Resistenza in tensioni efficaci	$\phi' = 25,0^\circ; \square'k = 20,9^\circ$ $c' = 24,0 \text{ kPa}; c'k = 15,53 \text{ kPa}$
Resistenza non drenata	$c_u = 57,5 \text{ kPa}; c_{uk} = 33,98 \text{ kPa}$

##### - Unità D: Substrato lioide costituito dall'alternanza di prevalenti livelli arenacei e siltitici e di subordinati livelli pelitici

Peso di volume o densità umida	$\gamma = 21,25 \text{ kN/mc}$
Resistenza in tensioni efficaci	$\phi' = 29,5^\circ; \square'k = 24,6^\circ$ $c' = 60,5 \text{ kPa}; c'k = 39,15 \text{ kPa}$
Resistenza non drenata	$c_u = 337,5 \text{ kPa}; c_{uk} = 199,16 \text{ kPa}$

Nella suddetta successione non è stata rilevata la presenza di falda fino a profondità di 7,0 ml dal piano campagna.

#### 4. CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE e GEOMORFOLOGICHE

L'area in esame è posta in prossimità della porzione cacuminale di un versante collinare/montuoso esposto ad ovest e drenato dal Fosso di Petrognano, tributario del Torrente Godenzo, che rappresenta la principale asta drenante in tale porzione di territorio con il suo andamento allineato in direzione nord-sud. Il settore di viabilità di interesse che congiunge i due aggregati rurali costituenti l'abitato di Petrognano si imposta a quota altimetrica di circa 570/580 m.s.l.m. su un versante mediamente acclive che proprio nel tratto di interesse risulta essere stato, nel trascorso oggetti di rinterro e riporto di materiale di provenienza diversa e dissimile dalle coltri detritiche soventemente presenti e rinvenibili su tali pendii.

La geomorfologia è la disciplina delle Scienze della Terra che studia le forme attuali e del passato della superficie della crosta terrestre, nelle loro caratteristiche fisiche e nei rapporti con le strutture geologiche e con i processi superficiali che hanno agito nel tempo. La carta geomorfologica rappresenta quindi le forme del rilievo terrestre, ne rappresenta i caratteri morfografici (forma e dimensioni) e morfogenetici (i processi responsabili del modellamento del paesaggio).

Il criterio principale di classificazione è quello morfogenetico, cioè quello basato sull'individuazione dell'origine delle forme, che quindi sono classificate in funzione dei processi endogeni (legati a dinamiche interne della litosfera) ed esogeni (es. acque correnti superficiali, gravità, ecc., legati a dinamiche esterne alla litosfera) con associata l'indicazione della sequenza cronologica e morfodinamica con particolare distinzione relativa allo stato di attività delle forme stesse tra forme attive, forme non attive ma potenzialmente instabili ("quiescenti") e non attive.

Per la scelta dei criteri di classificazione utilizzati per la redazione del presente supporto si è fatto riferimento ai contenuti del Regolamento Regionale n. 7/R del 6 marzo 2017 "Specifiche tecniche per la strutturazione, la codifica e l'acquisizione in formato digitale delle cartografie della banca dati geomorfologica della Regione Toscana", i cui concetti ispiratori si basano sui principi contenuti nei Quaderni e Manuali ISPRA (1994; 2006; 2007; reperibili su <http://www.isprambiente.gov.it/it/servizi-per-lambiente/pubblicazioni/periodici-tecnici/i-quaderni-serie-iii-del-sgi>) e loro aggiornamenti relativi alle Linee Guida per il rilevamento e la rappresentazione della Carta Geomorfologica d'Italia alla scala 1:50.000, criteri comunemente adottati nella letteratura scientifica e tecnica internazionale.

Tali criteri ed indirizzi tecnici sono stati integrati ed omogeneizzati con le indicazioni tecniche inerenti l'aspetto geomorfologico (e relativo "data base") codificati dalla Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale (ex Autorità di Bacino del Fiume Arno) con l'adozione del "*Progetto di Piano di bacino del distretto idrografico dell'Appennino Settentrionale, stralcio Assetto Idrogeologico per la gestione del rischio da dissesti di natura geomorfologica relativo al territorio dei bacini del fiume Arno, del fiume Serchio e dei bacini della Toscana*" di cui alla Delibera n. 20 della Conferenza Istituzionale Permanente in data 20 dicembre 2019 (pubblicata sulla G.U. n. 9 del 13.01.2020) con particolare riferimento ai dettagli di cui alle Tabelle A e C ed ai paragrafi 2.1, 2.2, 2.3 di cui all'allegato 3 della Disciplina di Piano (PAI frane del Distretto Appennino Settentrionale).

L'attività di revisione del quadro geomorfologico qui proposta (rispetto a quella del vigente S.U.) risulta per stralcio anticipatorio della proposizione delle perimetrazioni confermate e/o modificate in sede di elaborazione della carta geomorfologica del PS Intercomunale dei Comune della Val di Sieve.

Tale attività è stata condotta al fine di:

- definire norme univoche di semplice dettaglio in maniera da poterle uniformare alle normative sovracomunali;
- stabilire regole in linea con l'evoluzione del quadro giuridico regionale e nazionale;

Nel corso dei rilievi e delle elaborazioni si è proceduto con l'analisi delle evidenze superficiali, sul terreno e sui manufatti, e dei movimenti del terreno correlati. In generale si è fatto riferimento a:

- l'evidenza superficiale di macro e micro-forme morfologiche, proprie dei dissesti gravitativi;
- il confronto multi-temporale dell'evoluzione delle forme.

Nello specifico si è proceduto attraverso gli approcci metodologici sotto dettagliati e descritti, fra loro correlati e sovrapposti per poter giungere a definizioni quanto più possibile oggettive, cogenti e rispondenti all'intrinseca consistenza delle forme geomorfologiche e del precipuo stato di attività dei fenomeni stessi:

- evidenze da analisi stereoscopica diacronica nel tempo degli effetti del movimento del terreno (macro-forme) rilevate da foto aeree o analisi di ortofoto multitemporali, in abbinamento a modelli digitali del terreno (*dtm*) derivati da dati LIDAR (per le zone di disponibilità);
- evidenze rilevate da analisi di ortofoto su riprese multi-temporali degli effetti del movimento del terreno (macro forme), ove possibile a grande scala (archivio fototeca regionale, riprese *Google Earth*, *Bing* e simili);
- movimenti su target naturali o artificiali ottenuti da elaborazioni interferometriche multi-temporali di dati radar satellitari (*Permanent Scatters* o assimilabili) resi disponibili attraverso il [geoportale.lamma.rete.toscana.it](http://geoportale.lamma.rete.toscana.it).
- evidenze rilevate durante l'esecuzione di mirati percorsi di sopralluogo in campagna svolti, su tutte le percorribilità presenti, finalizzati alla corretta perimetrazione dei morfemi ed alla registrazione di quelli non desumibili e riscontrabili dalle attività sopra dettagliate (sono mantenute agli atti le cartografie di rilevazione geomorfologica di campagna con le relative annotazioni a testimonianza degli itinerari percorsi inviate per il dettaglio istruttorio anche agli Enti sovracomunali preposti – AdB Distrettuale e Regione Toscana Ufficio del Genio Civile di competenza territoriale);
- si è inoltre tenuto conto delle rilevazioni inerenti la presenza di quadro fessurativo sugli edifici, dell'orientazione delle stesse lesioni osservate e dello stato di attività e/o possibilità di evoluzione rilevabili in occasione dei sopra citati sopralluoghi.

L'indagine geomorfologica si propone quindi, attraverso un'analisi delle forme del paesaggio, di individuare i processi morfogenetici che agiscono nell'area e che nel loro insieme costituiscono la dinamica morfologica.

Sulla base delle informazioni geomorfologiche come sopra definite ed elaborate, sono analizzate le forme ed i processi geomorfologici legati, in particolare, alla dinamica di versante, e alla dinamica fluviale, valutandone il relativo stato di attività, nel rispetto dei seguenti criteri:

- forme attive o in evoluzione per processi in atto, attivati recentemente o riattivabili nel breve periodo o non in equilibrio con il regime morfogenetico attuale;
- forme quiescenti e/o potenzialmente instabili il cui modellamento non è in atto ma di cui non si può escludere la riattivazione;
- forme stabilizzate, artificialmente o naturalmente, forme relitte ed inattive.

La classificazione morfoevolutiva delle forme riguarda in senso più ampio il loro stato di attività. L'evoluzione delle morfologie è legata a numerosi fattori e la classificazione è stata effettuata in base ai seguenti criteri:

**Forme attive o in evoluzione** per processi in atto, attivati recentemente o riattivabili nel breve periodo o non in equilibrio con il regime morfogenetico attuale; per lo più forme interessate da movimenti "attivi" con ricorrenza pluriennale e/o pluridecennale. Sono fenomeni in continua evoluzione, le cui dinamiche e modificazioni possono essere registrate in breve intervallo temporale; risultano pertanto fenomeni che non hanno raggiunto condizioni di equilibrio.

**Forme quiescenti e/o inattive potenzialmente instabili** per cui non si può escludere la possibilità di riattivazione. Vi sono riconducibili aree non interessate da fenomeni di dissesto attivi ma in cui sono presenti indicatori geomorfologici diretti, quali aree interessate da instabilità in passato e/o segni precursori o premonitori di movimenti gravitativi, sulla base dei quali non è possibile escludere la riattivazione dei dissesti; e/o aree interessate da possibili instabilità di tipo gravitativo, erosivo e/o dovuti all'azione delle acque incanalate negli alvei naturali /artificiali o lungo le pendici, per effetto di condizioni geomorfologiche e fisiche sfavorevoli che determinano elevata propensione al dissesto.

Si tratta delle forme la cui evoluzione non è legata al ciclo stagionale, ma si sviluppa secondo tempi di ricorrenza più lunghi. Infatti tali fenomenologie, pur non avendo raggiunto una situazione di equilibrio o stabilità, possono rimanere temporaneamente inattive anche per lunghi periodi. Gran parte di tali fenomeni non ha subito sostanziali evoluzioni negli ultimi anni, ma è facilmente prevedibile che riverificandosi eventi meteorici con precipitazioni superiori alla media, si possa assistere a riprese nell'attività dinamica di tali morfemi. Tali forme, durante il periodo di inattività, mostrano comunque indicatori tali da far ritenere una più o meno prossima ripresa del movimento.

Si procede ad una breve descrizione sistematica delle forme individuate nello stralcio cartografico allegato al presente supporto.



## **Forme e processi dovuti a gravità**

### **Frane attive**

Frane con indizi di movimento in atto o recenti. Si manifestano solitamente con rotture della superficie topografica per nulla o poco rimodellate ad opera di agenti naturali o antropici, deformazioni della vegetazione copertura vegetale (strappi nella copertura erbacea, rotazione o caduta di alberi, ecc.), danni a strutture o infrastrutture (muri, drenaggi, tubature, manto stradale, ecc.).

Vi si comprendono: le frane di scivolamento rotazionale, scivolamento traslativo, espansione, e colamento lento, con evidenze dello stato attivo (S3 AdB Distrettuale) **come nel caso in esame per il morfema interessante il tratto stradale oggetti di intervento di adeguamento.**

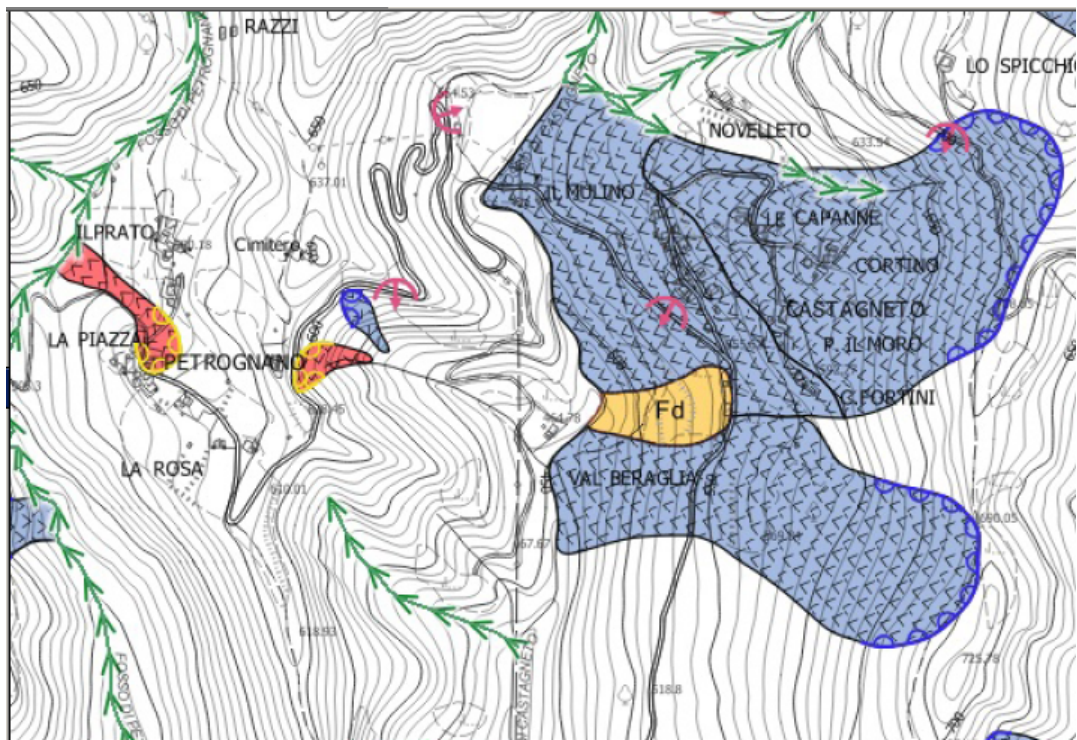
### **Frane quiescenti – inattive potenzialmente instabili**

Frane con indizi di movimento antichi, non recenti o relativamente recenti. Sono normalmente presenti chiari indizi di movimento avvenuto in tempi relativamente recenti. Le morfologie relative al movimento (corona di frana, contropendenze, gradini, ecc.) sono normalmente ancora riconoscibili pur se rimodellati ad opera di agenti naturali o antropici, mentre possono risultare assenti evidenze di rottura della superficie topografica. L'area in frana presenta evidenze geomorfologiche o esistono testimonianze che indicano, o comunque non escludono, una possibile o potenziale riattivazione, anche parziale, del processo nell'attuale sistema morfodinamico e morfoclimatico, ma non è possibile fare alcuna ulteriore verifica multitemporale. Persistono le principali cause predisponenti il dissesto con possibile riattivazione di tutta o parte della frana in seguito ad eventi scatenanti di carattere eccezionale ma ripetibili nelle attuali condizioni morfoclimatiche.


Vi si comprendono: le frane di scivolamento rotazionale, scivolamento traslativo, espansione, e colamento lento, con evidenze di potenziale instabilità (S2 A.d.B. Distrettuale).


### **Frane non cartografabili**


Sono stati individuati con tale classificazioni morfemi gravitativi in stato di attività la cui rappresentazione in forma areale (di poligono) risulti non mappabile in cartografia in scala 1:10.000. Al fine di garantirne la corretta leggibilità, in via indicativa sono da considerarsi non cartografabili le frane ove la rappresentazione cartografica in scala 1:10.000 comporta una superficie inferiore ai 15 mmq.





**Fd** Area a franosità diffusa


 Frana non cartografabile attiva


 Corona di frana di scorrimento attiva


 Corona di frana di colamento attiva

 Corona di frana di crollo attiva

 Corona di frana di colamento quiescente

 Corona di frana di scorrimento quiescente

 Corona di frana di crollo quiescente


 Corona di frana di scorrimento inattiva

 Corona di frana di colamento inattiva


 Corona di frana di crollo inattiva

### Forme, processi e depositi gravitativi di versante

Forme, processi e depositi di accumulo e relativi depositi

 Corpo di frana attiva di scorrimento a velocità indeterminata

 Corpo di frana attiva di crollo

 Corpo di frana quiescente di scorrimento a velocità indeterminata

*Estratto carta geomorfologica dal PSI dei Comuni della Val di Sieve (Geo Eco Progetti, 2022)*

## 5. PERICOLOSITA' GEOLOGICA

La carta della pericolosità geologica rappresenta la sintesi degli elaborati a tematica geologica, geomorfologica, clivometria e litologico-geotecnica redatti ed illustrati nei precedenti paragrafi per descrivere le caratteristiche del territorio investigato.

Il suo scopo fondamentale è di indicare:

- l'ubicazione e l'intensità dei fenomeni geomorfologici s.l. che interessano determinate porzioni di territorio;
- il livello di indagine di approfondimento da attuare nel caso di interventi in aree da essi interessate.

E' chiaro che il grado di pericolosità geologica attribuito ad ogni porzione territoriale deriva dalla interazione di numerosi fattori ambientali. Tali fattori, che dipendono essenzialmente dai caratteri geologici, geomorfologici, geotecnici, geomeccanici e clivometrici del territorio, possono causare sia un diretto dissesto del suolo, che una potenziale minaccia ad intere aree.

Di conseguenza nella carta della pericolosità geologica si prevede non solo l'individuazione dei settori interessati da dissesti attivi, ma anche la delimitazione di aree potenzialmente vulnerabili al verificarsi di elementi critici.

Andando ad una descrizione sistematica delle singole classi di pericolosità geomorfologica e dei criteri di attribuzione alle stesse, elenchiamo in ordine decrescente:

**Pericolosità geologica molto elevata (G.4):** aree in cui sono presenti fenomeni franosi attivi e relative aree di evoluzione, aree interessate a fenomeni di soliflusso e relative aree di evoluzione, ed aree in cui sono presenti intensi fenomeni geomorfologici attivi di tipo erosivo.

Vi si includono le aree ricadenti in classe di pericolosità da frana molto elevata di cui alla perimetrazione P4 del P.A.I. (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale)

In queste zone dovranno privilegiarsi interventi tesi alla bonifica e al recupero ambientale dei luoghi stessi.

**Pericolosità geologica elevata (G.3):** aree in cui sono presenti fenomeni franosi quiescenti e relative aree di evoluzione; aree con potenziale instabilità connessa a giacitura, ad acclività, a litologia, alla presenza di acque superficiali e sotterranee e relativi processi di morfodinamica fluviale, nonché a processi di degrado di carattere antropico; aree interessate da fenomeni erosivi; aree caratterizzate da terreni con scadenti caratteristiche geomeccaniche; corpi detritici su versanti con pendenze superiori a 15 gradi.

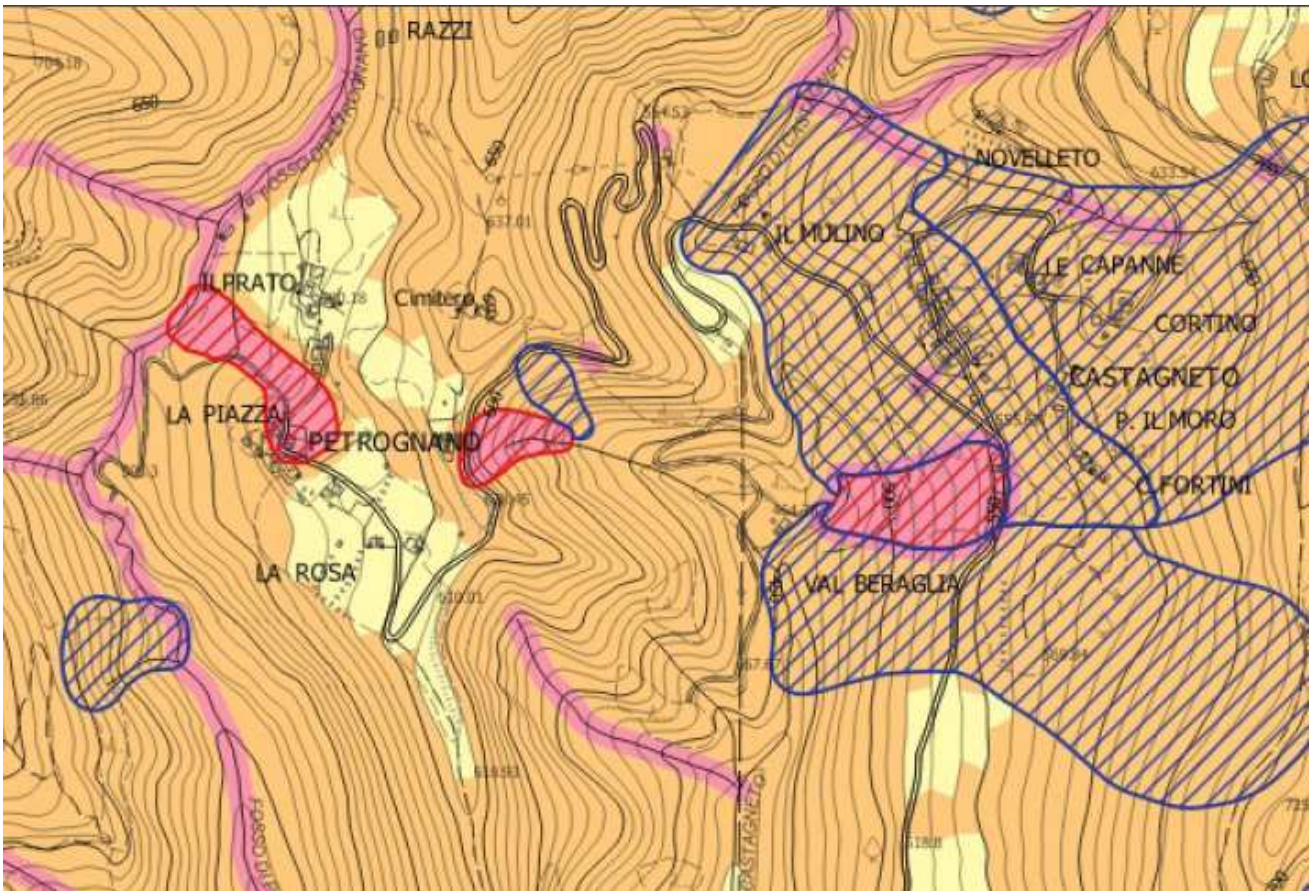
Vi si includono le aree ricadenti in classe di pericolosità da frana elevata di cui alla perimetrazione P3 del P.A.I. (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale).

**Pericolosità geologica media (G.2):** aree in cui sono presenti fenomeni geomorfologici inattivi; aree con elementi geomorfologici, litologici e giaciture dalla cui valutazione risulta una bassa propensione al dissesto; corpi detritici su versanti con pendenze inferiori a 15 gradi;

**Pericolosità geomorfologica bassa (G.1):** aree pianeggianti e sub-pianeggianti in cui i processi geomorfologici, le caratteristiche litologiche e/o giaciture non costituiscono fattori predisponenti al verificarsi di processi morfoevolutivi.

Nelle aree caratterizzate da pericolosità geologica bassa (G1), non è necessario dettare condizioni di attuazione dovute a limitazioni di carattere geomorfologico.


Nel dettaglio si riporta stralcio della cartografia di pericolosità geologica, derivato dal quadro conoscitivo allestito per il PSI dei Comuni della Val di Sieve (Geo Eco Progetti, 2022).



 Pericolosità geologica elevata (G.3)

 Pericolosità geologica molto elevata (G.4)

**Pericolosità da dissesti di natura geomorfologica da Piano Assetto Idrogeologico (PAI)  
Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale**

 **Aree a pericolosità da dissesti di natura geomorfologica molto elevata (aree P4)**

*Nuova pericolosità geologica del PSI (Geo Eco Progetti, 2022)  
già validata da AdB Distrettuale con Decreto n. 58 del 5.7.2021*

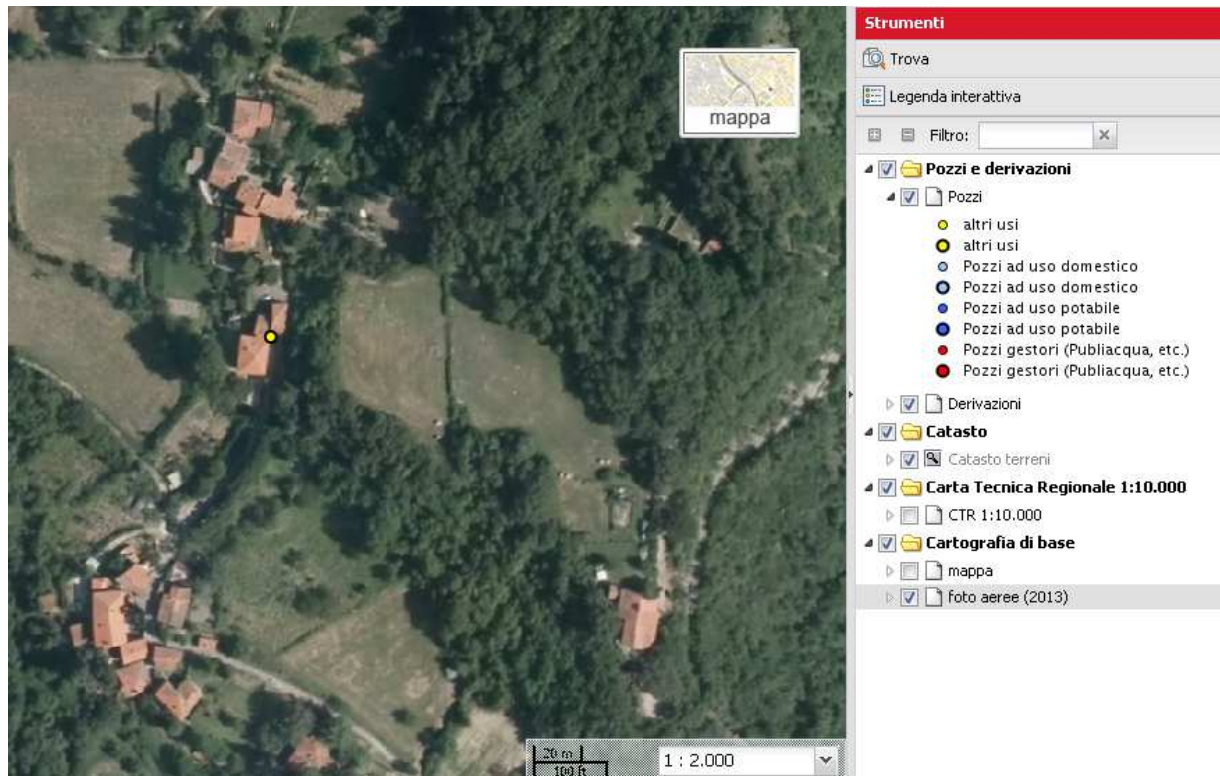
L'area oggetto della presente proposta di variante con oggetto adeguamento di viabilità esistente ricade in classe di pericolosità geologica molto elevata G.4 (area interessata da dissesto gravitativo attivo) ancorché l'area in esame sia collocata in prossimità della porzione di monte ossia prossima alla testa/coronamento del corpo di frana stesso.

Si riporteranno nel seguito della trattazione le argomentazioni del caso.

## 6. CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

Nell'area di interesse in fase di strumentazione della prova penetrometrica eseguita con micropiezometro non è stata rilevata presenza di falda fino a profondità di 7,0 ml dal piano campagna.

Dal catasto "censimento pozzi" della Provincia di Firenze si desume la presenza di un pozzo (come mostrato in immagine che segue) ubicato a nord dell'area di intervento per l'adeguamento della viabilità esistente. Tale pozzo risulta nel censimento relativo in stato "non attivo" ; è comunque desumibile in funzione della litologia e di consimili situazioni che per affinità litologica e caratteristiche intrinseche della formazione presente il tetto dell'orizzonte acquifero di riferimento risulti a di diverse decine di metri di profondità dal piano campagna.



### Informazioni Pozzo:

N° captazione	11903
Indirizzo	VIA DELLE PORTE N° 89
Comune	San Godenzo
F.Catast.	35
P.Catast.	26
Tipo Captazione	Pozzo
Stato	inattivo
Pratiche:	<u>DENUNCE</u>

Si ritiene pertanto che in virtù delle condizioni litologiche e strutturali dell'ammasso, l'intervento in previsione non costituisca condizione che porti ad incrementare condizioni di squilibrio per la risorsa idrica profonda o che possa determinare condizioni di rischio di inquinamento della risorsa stessa.

## **7. CONSIDERAZIONI SUL RISCHIO IDRAULICO**

Il settore oggetto di studio in posizione di alto morfologico non presenta interferenze con corsi d'acqua facenti parte del reticolo idrografico regionale.

Per quanto sopra per lo stesso settore non risultano obblighi di provvedere a modellazioni idrologico idrauliche quantitative per prefissati tempi di ritorno.

Si ritiene pertanto l'area possa essere considerata a classe di pericolosità idraulica I.1 bassa (ex Reg. Reg. n. 26/R/2007) e/o a pericolosità idraulica da alluvioni rare e/o di estrema intensità P1 (di cui al Reg. Reg. n. 5/R/2020).

Il settore oggetto di previsione non risulta pertanto soggetto a prescrizioni di cui all'art. 13 della L.R. n. 41/2018 per aree a possibilità di esondazione frequente o poco frequente.

## 8. ASPETTI E MODELLAZIONE SISMICA

Il quadro conoscitivo del vigente S.U. tratta questo particolare aspetto in termini di ZMPSL di cui al superato Regolamento Regionale n. 26/R/2077.

L'aggregato rurale di Petrognano non risulta inoltre fra i centri urbani per cui sia stato allestito studio di Microzonazione Sismica di livello 2/3 da parte del Settore Sismico della Regione Toscana.

In relazione alle considerazioni di carattere geomorfologico, in precedenza svolte, con individuazione della coltre detritica di copertura afferente al corpo di frana e della loro valenza relativamente all'aspetto sismico con definizione di modello di sottosuolo di coltre detritica di frana attiva su substrato lapideo ed in relazione alle indicazioni contenute nel Reg. Reg. n. 5/R/2020 (Allegato A, par 2.1) in merito alla assegnazione di pericolosità sismica secondo le indicazioni che seguono:

### **Pericolosità sismica locale molto elevata (S.4):**

- aree interessate da deformazioni legate alla presenza di faglie attive e capaci, in grado di creare deformazione in superficie;
- terreni suscettibili di liquefazione dinamica accertati mediante indagini geognostiche oppure notizie storiche o studi preesistenti;
- aree interessate da instabilità di versante attive e relativa area di evoluzione, tali da subire un'accentuazione del movimento in occasione di eventi sismici;

### **Pericolosità sismica locale elevata (S.3):**

- aree con terreni di fondazione particolarmente scadenti che possono dar luogo a cedimenti rilevanti;
- aree potenzialmente suscettibili di liquefazione dinamica, caratterizzate da terreni per i quali, sulla base delle informazioni disponibili, non è possibile escludere a priori il rischio di liquefazione;
- zone di contatto tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche significativamente diverse;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, connesse con un alto contrasto di impedenza sismica atteso entro alcune decine di metri dal piano di campagna;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali con fattore di amplificazione ( $F_x$ )  $> 1.4$ ;
- aree interessate da instabilità di versante quiescente, relative aree di evoluzione, nonché aree potenzialmente franose, di seguito, denominate "APF", e, come tali, suscettibili di riattivazione del movimento in occasione di eventi sismici;

### **Pericolosità sismica locale media (S.2):**

- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali connessi con contrasti di impedenza sismica attesa oltre alcune decine di metri dal piano campagna e con frequenza fondamentale del terreno indicativamente inferiore a 1hz;
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali con fattore di amplificazione ( $F_x$ )  $< 1.4$ ;
- zone stabili suscettibili di amplificazione topografica (pendii con inclinazione superiore a 15 gradi);
- zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, non rientranti tra quelli previsti nelle classi di pericolosità sismica S.3;

### **Pericolosità sismica locale bassa (S.1):**

- zone stabili caratterizzate dalla presenza di litotipi assimilabili al substrato rigido in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata (pendii con inclinazione inferiore a 15 gradi), dove non si ritengono probabili fenomeni di amplificazione o instabilità indotta dalla sollecitazione sismica.

si può attribuire all'area oggetto di variante urbanistica classe di pericolosità sismica S.4 (molto elevata).

### 8.1 Classificazione sismica

Nell'ambito dell'Ordinanza P.C.M. n. 3274/03 si sono individuate 4 zone, delle quali le prime tre coincidono con quelle (Categorie) individuate dalla L.n. 64/74 e successivi D.M. ad essa collegati, mentre la quarta è di nuova costituzione. In quest'ultima zona le regioni possono imporre l'obbligo della progettazione antisismica e stabilire norme e criteri specifici.

Sulla scorta di questa nuova classificazione il territorio del Comune di San Godenzo è inserito in Zona 2.

La OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006 disciplina i criteri alla base degli studi per la definizione della pericolosità sismica utili alla riclassificazione sismica del territorio nazionale, ma definisce anche con:

- la lett. g) la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle zone sismiche che dovranno prevedere:

- la discretizzazione dell'elaborato di riferimento rispetto ai confini dei comuni. E' opportuno a tale proposito che il passaggio fra zone sismiche territorialmente contigue sia definito in termini graduali, sia all'interno di ciascuna regione che al confine di regioni diverse.
  - la definizione di eventuali sottozone nell'ambito di uno stesso comune e secondo quanto previsto alla lett. a) per descrivere meglio l'azione sismica, soprattutto in relazione alle esigenze di valutazione e di recupero degli edifici esistenti.
- la lett. c) - sulla base della valutazione di  $a_g$  l'assegnazione di un territorio ad una delle zone sismiche potrà avvenire, secondo la tab. di cui alla lett. a), con la tolleranza di 0,025  $a_g$ .

La Regione Toscana con D.G.R. n. 431 del 19.06.2006 ha proposto la riclassificazione sismica regionale, mantenendo in via preliminare un atteggiamento di cautela soprattutto nelle situazioni che potevano comportare una declassificazione dei comuni dalla zona a media sismicità alla zona a bassa sismica (da zona 2 a zona 3).

A tal proposito ha ritenuto opportuno, nel processo di declassificazione dei comuni, mantenere lo stesso livello di protezione assicurato dalle azioni sismiche della zona 2, provvedendo di conseguenza all'individuazione di una zona 3S. Il territorio comunale di San Godenzo rimane comunque inserito in zona 2.

A distanza di sei anni dall'entrata in vigore della precedente classificazione sismica, la Regione Toscana ha provveduto all'aggiornamento della classificazione sismica del proprio territorio. La nuova mappa sismica è stata approvata con la delibera n. 878 dell'8 ottobre 2012. L'aggiornamento della classificazione sismica, redatto ai sensi dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3519/2006, si è reso necessario al fine di recepire le novità introdotte dall'entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2008) e di rendere la classificazione sismica (riferimento per la disciplina dei controlli sui progetti depositati presso gli Uffici tecnici regionali preposti), maggiormente aderente all'approccio *sito-dipendente* introdotto dalle vigenti Norme.

Il territorio comunale di Chiusi della Verna rimane in zona 2 nella più recente classificazione regionale.

Zona sismica	Descrizione	accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni [ $a_g$ ]	accelerazione orizzontale massima convenzionale (Norme Tecniche) [ $a_g$ ]	numero comuni con territori ricadenti nella zona (*)
1	Indica la zona più pericolosa, dove possono verificarsi fortissimi terremoti.	$a_g > 0,25$ g	0,35 g	703
2	Zona dove possono verificarsi forti terremoti.	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g	2.224
3	Zona che può essere soggetta a forti terremoti ma rari.	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g	3.002
4	E' la zona meno pericolosa, dove i terremoti sono rari ed è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica.	$a_g \leq 0,05$ g	0,05 g	1.982

## 8.2 Verifiche di pericolosità sismica di base e di sito

### PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Vita nominale (Vn):	50	[anni]
Classe d'uso:	II	
Coefficiente d'uso (Cu):	1	
Periodo di riferimento (Vr):	50	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLO:	30	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLD:	50	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLV:	475	[anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLC:	975	[anni]



Tipo di interpolazione: Media ponderata

Coordinate geografiche del punto

Latitudine (WGS84): 43.9428711 [°]  
 Longitudine (WGS84): 11.6066694 [°]  
 Latitudine (ED50): 43.9438210 [°]  
 Longitudine (ED50): 11.6076469 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]	Distanza [m]
1	19397	43.918820	11.546910	5602.15
2	19398	43.919930	11.616330	2745.98
3	19176	43.969920	11.614750	2957.32
4	19175	43.968800	11.545330	5709.39

Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC08, per i nodi della maglia elementare del reticolo di riferimento

#### Punto 1

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.065	2.437	0.260
SLD	50	0.083	2.425	0.265
	72	0.098	2.423	0.270
	101	0.113	2.413	0.275
	140	0.131	2.385	0.278
SLV	201	0.149	2.400	0.283
	475	0.205	2.366	0.289
SLC	975	0.261	2.390	0.290
	2475	0.344	2.413	0.316

#### Punto 2

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.067	2.424	0.260
SLD	50	0.086	2.402	0.267
	72	0.100	2.422	0.270
	101	0.116	2.408	0.276
	140	0.133	2.391	0.280
SLV	201	0.152	2.394	0.285
	475	0.210	2.352	0.291
SLC	975	0.264	2.380	0.294
	2475	0.347	2.432	0.318

#### Punto 3

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.069	2.413	0.260
SLD	50	0.087	2.407	0.268
	72	0.102	2.412	0.273
	101	0.119	2.413	0.276
	140	0.136	2.381	0.280
SLV	201	0.157	2.367	0.287
	475	0.208	2.404	0.295
SLC	975	0.258	2.455	0.311
	2475	0.337	2.550	0.322

Punto 4

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.068	2.420	0.259
SLD	50	0.086	2.413	0.268
	72	0.101	2.419	0.270
	101	0.117	2.406	0.276
	140	0.134	2.388	0.280
	201	0.154	2.384	0.285
SLV	475	0.208	2.384	0.291
SLC	975	0.263	2.403	0.295
	2475	0.347	2.446	0.319

Punto d'indagine

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0.067	2.422	0.260
SLD	50	0.086	2.409	0.267
SLV	475	0.208	2.376	0.292
SLC	975	0.262	2.409	0.299

PERICOLOSITÀ SISMICA DI SITO

Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico  $\eta=[10/(5+\xi)]^{1/2}$ : 1.000

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T2: Pendii con inclinazione media maggiore di 15°

Stabilità di pendii e fondazioni

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.019	0.025	0.084	0.101
kv	0.010	0.012	0.042	0.051
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.952	1.214	2.939	3.539
Beta	0.200	0.200	0.280	0.280

Muri di sostegno NTC 2018

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	--	0.058	0.114	--
kv	--	0.029	0.057	--
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.952	1.214	2.939	3.539
Beta	--	0.470	0.380	--

Fronti di scavo e rilevati

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	--	0.058	0.114	--
kv	--	0.029	0.057	--
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.952	1.214	2.939	3.539
Beta	--	0.470	0.380	--

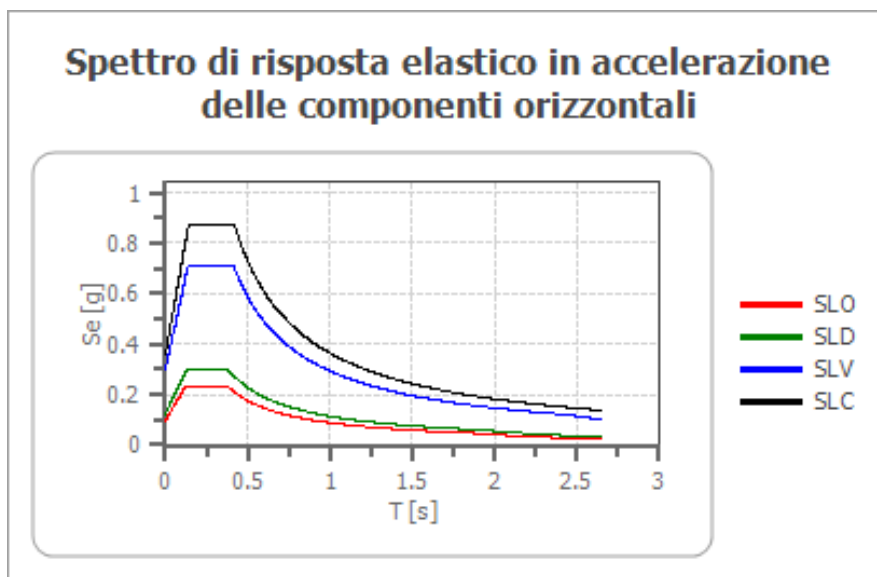
Paratie NTC 2018

Altezza paratia (H): 3.0 [m]

Spostamento ammissibile us: 0.015 [m]

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.075	0.096	0.233	0.280
kv	--	--	--	--
amax [m/s <sup>2</sup> ]	0.952	1.214	2.939	3.539
Beta	0.776	0.776	0.776	0.776

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

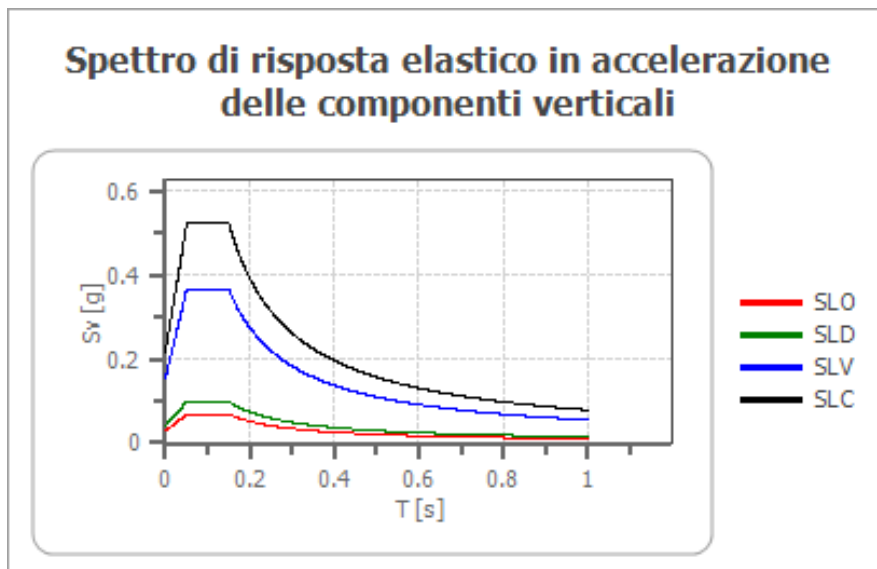


	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	$\eta$ [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.0	0.067	2.422	0.260	1.200	1.440	1.200	1.440	1.000	0.125	0.374	1.870	0.097	0.235
SLD	1.0	0.086	2.409	0.267	1.200	1.430	1.200	1.440	1.000	0.127	0.382	1.944	0.124	0.298
SLV	1.0	0.208	2.376	0.292	1.200	1.410	1.200	1.440	1.000	0.137	0.412	2.432	0.300	0.712
SLC	1.0	0.262	2.409	0.299	1.150	1.400	1.200	1.380	1.000	0.140	0.419	2.646	0.361	0.870

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

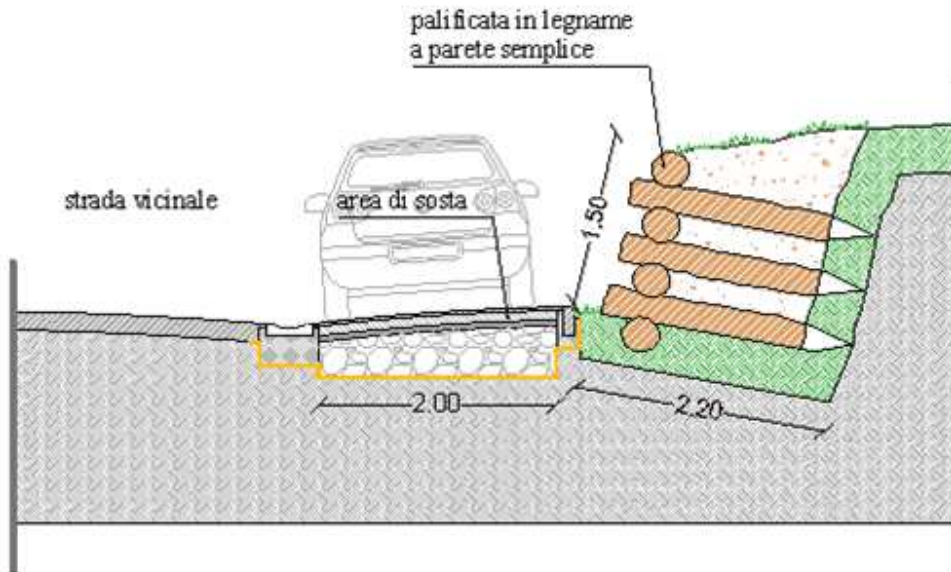
Coefficiente di smorzamento viscoso  $\xi$ : 5%

Fattore di alterazione dello spettro elastico  $\eta = [10/(5+\xi)]^{1/2}$ : 1,000



	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	$\eta$ [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.0	0.067	2.422	0.260	1	1.440	1.200	1.200	1.000	0.050	0.150	1.000	0.028	0.069
SLD	1.0	0.086	2.409	0.267	1	1.430	1.200	1.200	1.000	0.050	0.150	1.000	0.041	0.098
SLV	1.0	0.208	2.376	0.292	1	1.410	1.200	1.200	1.000	0.050	0.150	1.000	0.154	0.365
SLC	1.0	0.262	2.409	0.299	1	1.400	1.200	1.200	1.000	0.050	0.150	1.000	0.217	0.522

## 9. ARGOMENTAZIONI GEOTECNICHE CON VERIFICA DI STABILITA'



### PORTANZA DEL TERRENO

Si considera una piattaforma larga 2 m e lunga 5 m. Si assegna il carico di un autocarro fino 3.5 t.

#### DATI GENERALI

Normativa	NTC_2018
Larghezza fondazione	2.0 m
Lunghezza fondazione	5.0 m
Profondità piano di posa	0.7 m

#### STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore strato [m]	Peso unità di volume [kN/m³]	Peso unità di volume saturo [kN/m³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m²]	Coesione non drenata [kN/m²]	Modulo Elastico [kN/m²]	Modulo Edometrico [kN/m²]
2.5	19.2	20.0	24.0	20.0	10.0	0.0	4300.0
7.0	19.0	19.9	21.0	12.0	12.0	0.0	6000.0
2.5	19.65	20.0	15.5	15.0	15.0	0.0	6000.0
20.0	21.25	22.0	24.6	39.0	39.0	0.0	12000.0

#### Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A1+M1+R3	0.00	34.32	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
2	S.L.E.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Servizio
3	S.L.D.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Servizio

#### Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione	Tangente	Coesione	Coesione	Peso Unità	Peso unità	Coef. Rid.	Coef.Rid.Ca
----	------------	----------	----------	----------	------------	------------	------------	-------------

	Sismica	angolo di resistenza al taglio	efficace	non drenata	volume in fondazione	volume copertura	Capacità portante verticale	pacità portante orizzontale
1	No	1	1	1	1	1	2.3	1.1
2	No	1	1	1	1	1	1	1
3	No	1	1	1	1	1	1	1

#### CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A1+M1+R3 -CONDIZIONI STATICHE

Autore: HANSEN (1970)

Carico limite [Qult]	789.56 kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto[Rd]	343.29 kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	3.43 kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	230.06
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

#### COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler	31582.48 kN/m <sup>3</sup>
---------------------	----------------------------

A1+M1+R3

Autore: HANSEN (1970) (Condizione drenata)

#### PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

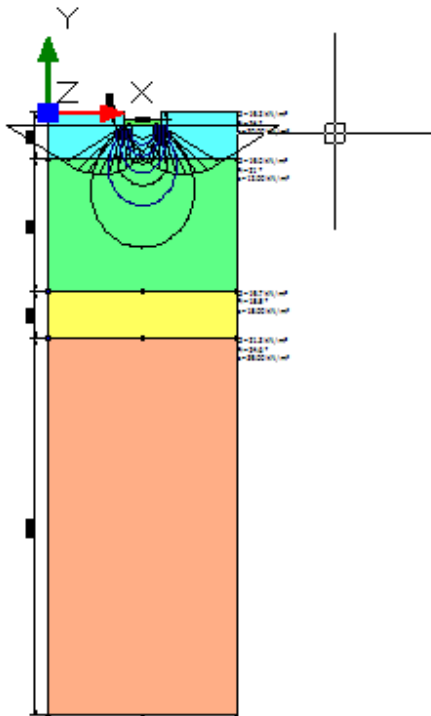
Peso unità di volume	19.2 kN/m <sup>3</sup>
Peso unità di volume saturo	20.0 kN/m <sup>3</sup>
Angolo di attrito	24.0 °
Coesione	20.0 kN/m <sup>2</sup>

Fattore [Nq]	9.6
Fattore [Nc]	19.32
Fattore [Ng]	5.75
Fattore forma [Sc]	1.2
Fattore profondità [Dc]	1.14
Fattore inclinazione carichi [Ic]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gc]	1.0
Fattore inclinazione base [Bc]	1.0
Fattore forma [Sq]	1.18
Fattore profondità [Dq]	1.11
Fattore inclinazione carichi [Iq]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gq]	1.0
Fattore inclinazione base [Bq]	1.0
Fattore forma [Sg]	0.84
Fattore profondità [Dg]	1.0
Fattore inclinazione carichi [Ig]	1.0
Fattore inclinazione pendio [Gg]	1.0
Fattore inclinazione base [Bg]	1.0
Fattore correzione sismico inerziale [zq]	1.0

Fattore correzione sismico inerziale [zg] 1.0  
 Fattore correzione sismico inerziale [zc] 1.0

Carico limite 789.56 kN/m<sup>2</sup>  
 Resistenza di progetto 343.29 kN/m<sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata



**CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A1+M1+R3 -CONDIZIONI SISMICHE**  
 Autore: HANSEN (1970)

Carico limite [Qult] 535.34 kN/m<sup>2</sup>  
 Resistenza di progetto[Rd] 232.76 kN/m<sup>2</sup>  
 Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed] --

**COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)**  
 Costante di Winkler 21413.56 kN/m<sup>3</sup>

**CEDIMENTI PER OGNI STRATO**

\*Cedimento edometrico calcolato con: Metodo consolidazione monodimensionale di Terzaghi

Pressione normale di progetto 34.0 kN/m<sup>2</sup>  
 Cedimento dopo T anni 7.0  
 Distanza 0.00 m

Angolo 0.00 °  
 Cedimento totale 1.137 cm

Z: Profondità media dello strato; Dp: Incremento di tensione; Wc: Cedimento consolidazione;  
 Ws: Cedimento secondario; Wt: Cedimento totale.

Strato	Z (m)	Tensione (kN/m <sup>2</sup> )	Dp (kN/m <sup>2</sup> )	Metodo	Wc (cm)	Ws (cm)	Wt (cm)
1	1.6	30.72	17.338	Edometrico	0.7258	--	0.7258
2	6	114.5	2.889	Edometrico	0.337	--	0.337
3	10.75	205.563	0.917	Edometrico	0.0382	--	0.0382
4	22	442.625	0.214	Edometrico	0.0356	--	0.0356

## ANALISI DI STABILITA'

### Pendio naturale in condizioni statiche

Si utilizzano i parametri caratteristici e di progetto di picco.

Analisi di stabilità dei pendii con : MORGENSTERN-PRICE (1965)

```

=====
Calcolo eseguito secondo NTC 2018
Numero di strati 4.0
Numero dei conci 10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile 1.1
Coefficiente parziale resistenza 1.0
Analisi Condizione drenata
Superficie di forma circolare
=====
  
```

### Maglia dei Centri

```

=====
Ascissa vertice sinistro inferiore xi 250.0 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi 940.0 m
Ascissa vertice destro superiore xs 1250.0 m
Ordinata vertice destro superiore ys 1380.0 m
Passo di ricerca 10.0
Numero di celle lungo x 10.0
Numero di celle lungo y 10.0
=====
  
```

### Coefficienti sismici [N.T.C.]

#### Dati generali

Tipo opera:

Classe d'uso:  
 Vita nominale: 0.0 [anni]  
 Vita di riferimento: 0.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:  
 Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera:

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	276.11	604.52
2	369.75	628.43
3	407.61	648.35
4	463.39	680.23
5	660.63	712.11
6	672.58	720.08
7	806.07	740.0
8	839.94	747.97
9	863.84	761.91
10	907.67	783.83
11	977.41	843.6
12	1062.8	843.76
13	1153.17	882.49
14	1266.13	890.56

**Vertici strato .....1**

N	X (m)	y (m)
1	276.11	604.52



	2	369.75	628.43
	3	407.61	648.35
	4	463.39	680.23
	5	660.63	712.11
	6	672.58	720.08
	7	806.07	740.0
	8	839.94	747.97
	9	863.84	761.91
	10	907.67	783.83
	11	922.36	796.41
	12	1050.36	791.49
	13	1171.97	799.6
	14	1266.13	838.12

Vertici strato .....2  
N

	X (m)	y (m)
1	276.11	512.84
2	635.73	591.3
3	894.24	671.94
4	1261.86	769.18
5	1266.13	754.84

Vertici strato .....3  
N

	X (m)	y (m)
1	276.11	456.43
2	347.65	456.43
3	732.97	560.47
4	989.11	626.88
5	1119.56	662.45
6	1266.13	718.64

#### Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

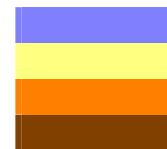
#### Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

#### Stratigrafia

Strato	Coesione (kN/m2)	Coesione non drenata (kN/m2)	Angolo resistenza al taglio	Peso unità di volume (kN/m3)	Peso saturo (kN/m3)	Litologia
--------	---------------------	------------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------	-----------

		(°)			
1	20	24	19.2	20	
2	12	21	19	19.9	
3	15	15.5	19.65	21	
4	39	24.6	21.25	22	



### Risultati analisi pendio

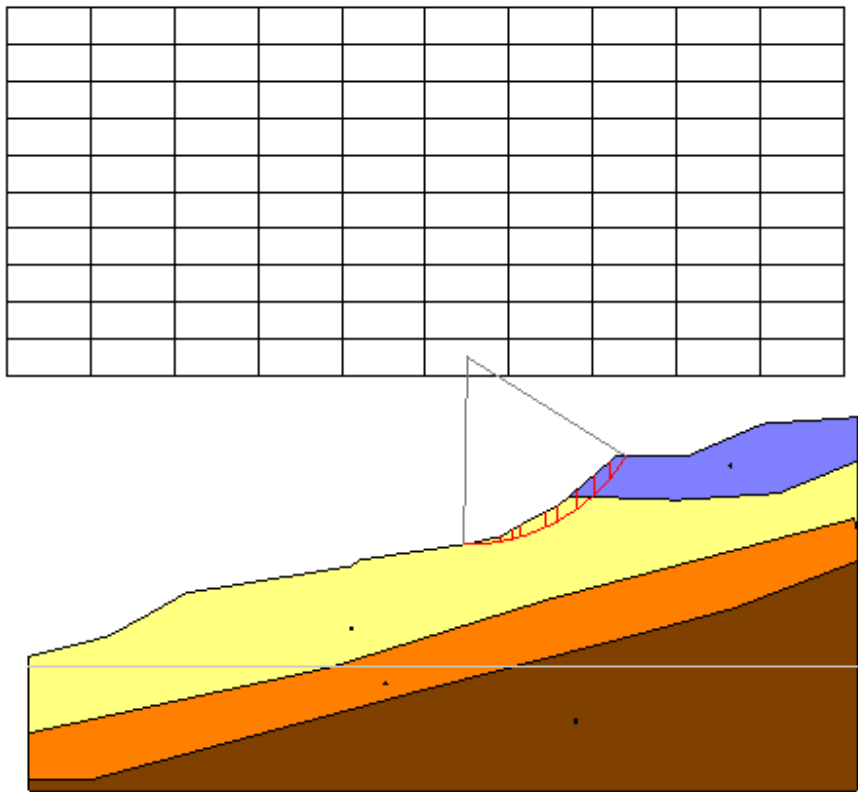
Fs minimo individuato	0.79
Ascissa centro superficie	800.0 m
Ordinata centro superficie	962.0 m
Raggio superficie	223.56 m

$x_c = 800.00$   $y_c = 962.00$   $R_c = 223.559$   $F_s = 0.793$   
 Lambda = 0.00

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (kN)
1	10.19	0.25	10.19	154.01
2	33.87	5.92	34.05	2803.24
3	14.07	12.14	14.4	2310.91
4	9.83	15.29	10.19	2372.57
5	28.92	20.55	30.89	9088.99
6	14.91	26.65	16.68	5082.25
7	23.84	32.41	28.24	9479.85
8	19.38	39.24	25.02	8860.49
9	19.38	46.03	27.91	8451.37
10	19.38	53.82	32.82	5300.05

### Sforzi sui conci

Nr.	Xi (kN)	Ei (kN)	Xi-1 (kN)	Ei-1 (kN)	N'i (kN)	Ti (kN)	Ui (kN)
1	260.52	490.98	0.0	0.0	-104.37	103.59	0.0
2	1112.53	2096.67	260.52	490.98	2106.5	1534.77	0.0
3	1624.9	3062.28	1112.53	2096.67	1961.36	1167.13	0.0
4	2048.65	3860.88	1624.9	3062.28	2090.42	1166.01	0.0
5	2674.55	5040.46	2048.65	3860.88	8338.45	4503.19	0.0
6	2791.45	5260.76	2674.55	5040.46	4536.53	2448.15	0.0
7	2401.49	4525.84	2791.45	5260.76	7938.13	4269.42	0.0
8	1571.06	2960.82	2401.49	4525.84	6515.3	3532.0	0.0
9	702.39	1323.72	1571.06	2960.82	5292.56	3674.92	0.0
10	8.9	16.78	702.39	1323.72	2483.46	2221.84	0.0



$x_c=800$   $y_c=962.0$   $R_c=223.56$   $F=0.7931$

**Pendio naturale con sisma**

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.3
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	No

**Stratigrafia**

Strato	Coesione (kN/m <sup>2</sup> )	Coesione non drenata (kN/m <sup>2</sup> )	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> )	Peso saturo (kN/m <sup>3</sup> )	Litologia
1	20		24	19.2	20	

2	12	21	19	19.9
3	15	15.5	19.65	21
4	39	24.6	21.25	22



### Risultati analisi pendio

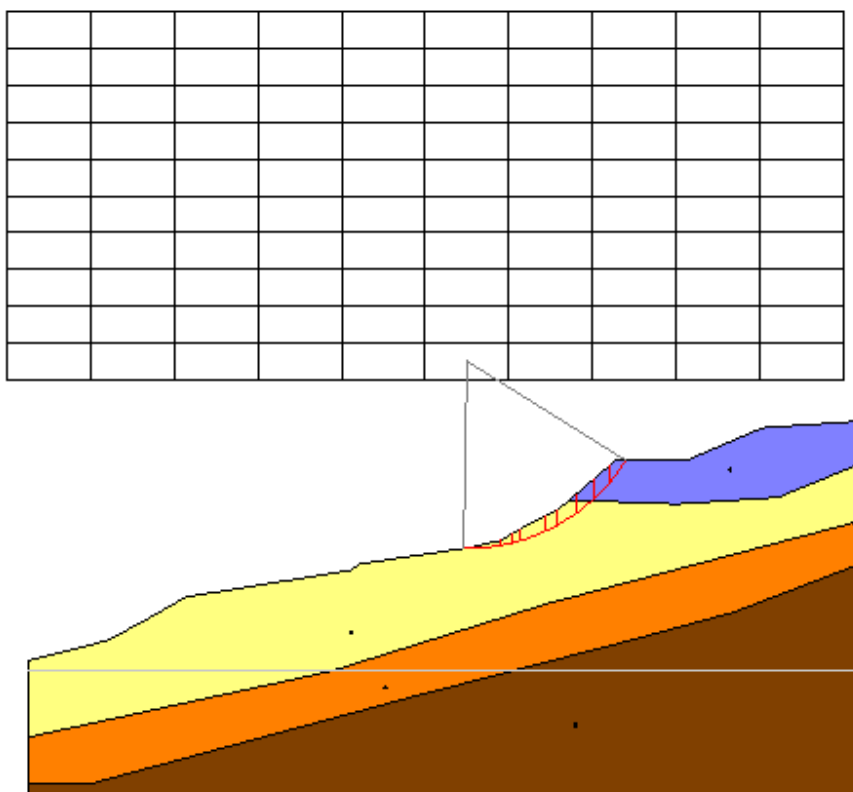
Fs minimo individuato	0.68
Ascissa centro superficie	800.0 m
Ordinata centro superficie	962.0 m
Raggio superficie	223.56 m

$x_c = 800.00$   $y_c = 962.00$   $R_c = 223.559$   $F_s = 0.679$   
 Lambda = 0.00

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (kN)
1	10.19	0.25	10.19	154.01
2	33.87	5.92	34.05	2803.24
3	14.07	12.14	14.4	2310.91
4	9.83	15.29	10.19	2372.57
5	28.92	20.55	30.89	9088.99
6	14.91	26.65	16.68	5082.25
7	23.84	32.41	28.24	9479.85
8	19.38	39.24	25.02	8860.49
9	19.38	46.03	27.91	8451.37
10	19.38	53.82	32.82	5300.05

### Sforzi sui conci

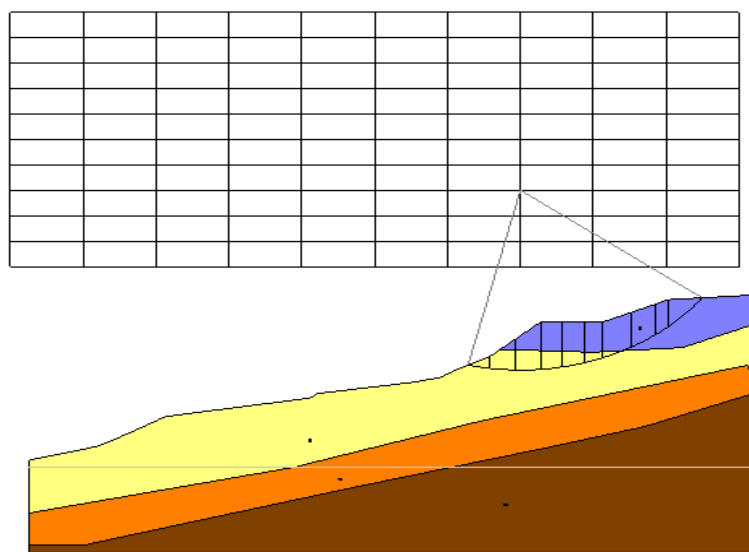
Nr.	Xi (kN)	Ei (kN)	Xi-1 (kN)	Ei-1 (kN)	N'i (kN)	Ti (kN)	Ui (kN)
1	365.26	623.16	0.0	0.0	-202.11	65.74	0.0
2	1444.44	2464.34	365.26	623.16	1998.23	1731.35	0.0
3	2077.22	3543.91	1444.44	2464.34	1922.64	1341.29	0.0
4	2592.97	4423.82	2077.22	3543.91	2067.94	1349.16	0.0
5	3280.02	5595.98	2592.97	4423.82	8374.36	5279.86	0.0
6	3387.81	5779.89	3280.02	5595.98	4532.16	2856.88	0.0
7	2858.54	4876.91	3387.81	5779.89	7885.09	4956.55	0.0
8	1833.79	3128.59	2858.54	4876.91	6378.43	4047.87	0.0
9	806.66	1376.24	1833.79	3128.59	5067.3	4144.48	0.0
10	17.16	29.27	806.66	1376.24	2288.48	2467.18	0.0



**xc=800 yc=962.0 Rc=223.56 F=0.6790**

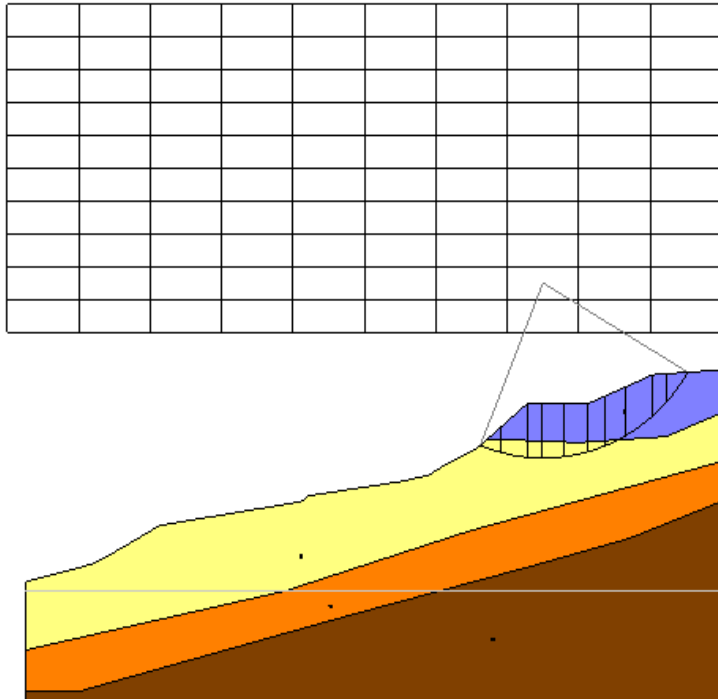
Dalle analisi effettuate emerge che solo una parte epidermica della sottoscarpa (spessore 1 – 1.5 m) è instabile, mentre come si rileva dalle immagini successive l'appiccio, utilizzando parametri di picco, è stabile.

**Condizioni statiche**



**xc=950 yc=1072.0 Rc=311.34 F=1.4239**

**Condizioni sismiche**



**xc=1000 yc=1006.0 Rc=235.4 F=1.3781 xc=1000 yc=1006.0 Rc=235.4 F=1.3781**

**Pendio artificiale – Condizioni statiche**

Analisi di stabilità dei pendii con : MORGENSTERN-PRICE (1965)

Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	4.0
Numero dei conci	10.0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1.1
Coefficiente parziale resistenza	1.1
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

**Maglia dei Centri**

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	250.0 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	940.0 m
Ascissa vertice destro superiore xs	1250.0 m
Ordinata vertice destro superiore ys	1380.0 m
Passo di ricerca	10.0
Numero di celle lungo x	10.0

Numero di celle lungo y

10.0

=====  
**Coefficienti sismici [N.T.C.]**  
=====

**Dati generali**

Tipo opera:

Classe d'uso:

Vita nominale: 0.0 [anni]

Vita di riferimento: 0.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:

Categoria topografica:

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

**Coefficienti sismici orizzontali e verticali**

Opera:

S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.D.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.V.	0.0	0.0	0.0	0.0
S.L.C.	0.0	0.0	0.0	0.0

**Vertici profilo**

Nr	X (m)	y (m)
1	276.11	604.52
2	369.75	628.43
3	407.61	648.35
4	463.39	680.23
5	660.63	712.11
6	672.58	720.08
7	806.07	740.0
8	839.94	747.97
9	863.84	761.91
10	907.67	783.83

	11		977.41	843.6
	12		1062.8	843.76
	13		1114.89	844.25
	14		1153.17	882.49
	15		1266.13	890.56

Vertici strato .....1  
N

		X (m)	y (m)
	1	276.11	604.52
	2	369.75	628.43
	3	407.61	648.35
	4	463.39	680.23
	5	660.63	712.11
	6	672.58	720.08
	7	806.07	740.0
	8	839.94	747.97
	9	863.84	761.91
	10	907.67	783.83
	11	922.36	796.41
	12	1050.36	791.49
	13	1171.97	799.6
	14	1266.13	838.12

Vertici strato .....2  
N

		X (m)	y (m)
	1	276.11	512.84
	2	635.73	591.3
	3	894.24	671.94
	4	1261.86	769.18
	5	1266.13	754.84

Vertici strato .....3  
N

		X (m)	y (m)
	1	276.11	456.43
	2	347.65	456.43
	3	732.97	560.47
	4	989.11	626.88
	5	1119.56	662.45
	6	1266.13	718.64

Coefficienti parziali azioni





Sfavorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0
Favorevoli: Permanenti, variabili	1.0	1.0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno



Tangente angolo di resistenza al taglio	1.25
Coesione efficace	1.25
Coesione non drenata	1.4
Riduzione parametri geotecnici terreno	Si

Stratigrafia

Strato	Coesione (kN/m2)	Coesione non drenata (kN/m2)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (kN/m3)	Peso saturo (kN/m3)	Litologia
1	20		24	19.2	20	
2	12		21	19	19.9	
3	15		15.5	19.65	21	
4	39		24.6	21.25	22	

Risultati analisi pendio [A2+M2+R2]

Fs minimo individuato	0.58
Ascissa centro superficie	800.0 m
Ordinata centro superficie	962.0 m
Raggio superficie	223.56 m

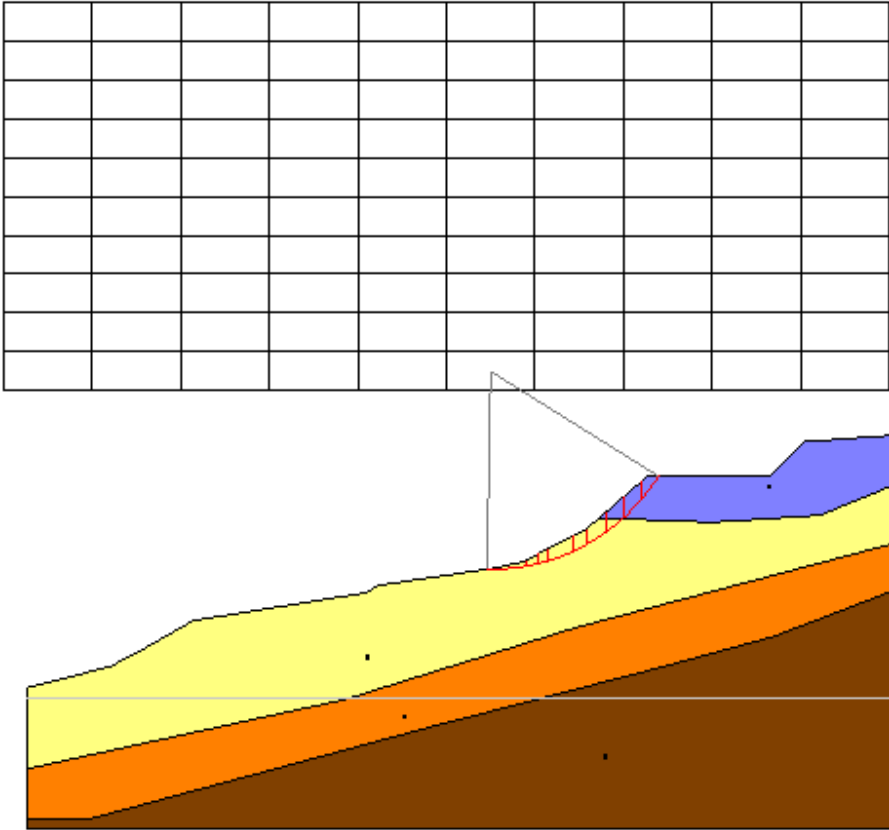
$x_c = 800.00$   $y_c = 962.00$   $R_c = 223.559$   $F_s = 0.577$   
 $\lambda = 0.00$

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (kN)
1	10.19	0.25	10.19	154.01
2	33.87	5.92	34.05	2803.24
3	14.07	12.14	14.4	2310.91
4	9.83	15.29	10.19	2372.57
5	28.92	20.55	30.89	9088.99
6	14.91	26.65	16.68	5082.25
7	23.84	32.41	28.24	9479.85
8	19.38	39.24	25.02	8860.49
9	19.38	46.03	27.91	8451.37
10	19.38	53.82	32.82	5300.05

Sforzi sui conci

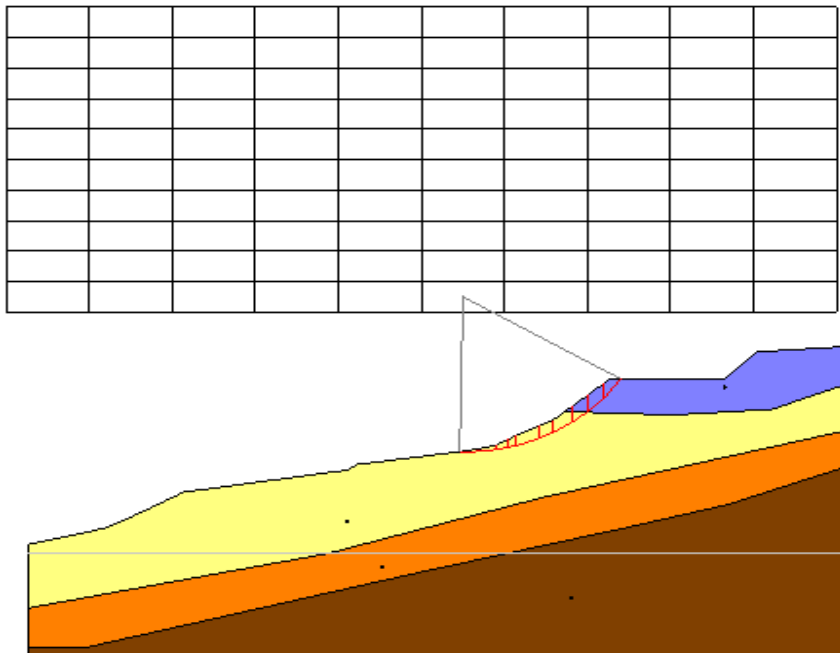
Nr.	Xi (kN)	Ei (kN)	Xi-1 (kN)	Ei-1 (kN)	N'i (kN)	Ti (kN)	Ui (kN)
1	260.52	490.98	0.0	0.0	-104.37	103.59	0.0
2	1112.53	2096.67	260.52	490.98	2106.5	1534.77	0.0
3	1624.9	3062.28	1112.53	2096.67	1961.36	1167.13	0.0

4	2048.65	3860.88	1624.9	3062.28	2090.42	1166.01	0.0
5	2674.55	5040.46	2048.65	3860.88	8338.45	4503.19	0.0
6	2791.44	5260.76	2674.55	5040.46	4536.53	2448.15	0.0
7	2401.49	4525.84	2791.44	5260.76	7938.13	4269.42	0.0
8	1571.06	2960.82	2401.49	4525.84	6515.3	3532.0	0.0
9	702.39	1323.72	1571.06	2960.82	5292.56	3674.92	0.0
10	8.9	16.78	702.39	1323.72	2483.46	2221.84	0.0



**xc=800 yc=962.0 Rc=223.56 F=0.5768**

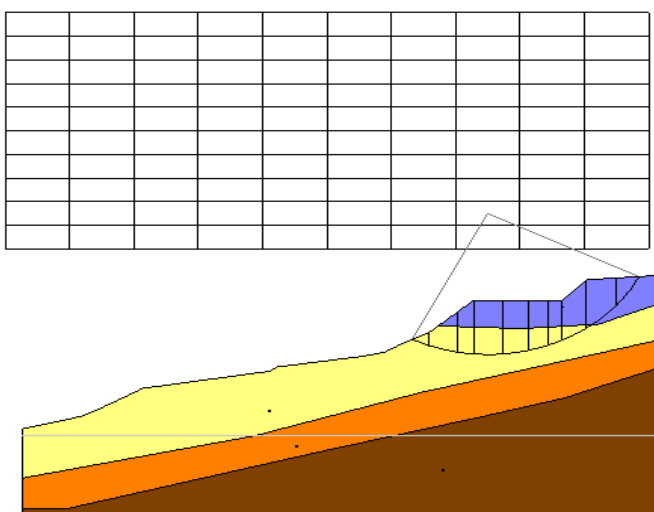
### Condizioni sismiche



$x_c=800$   $y_c=962.0$   $R_c=223.56$   $F=0.6173$

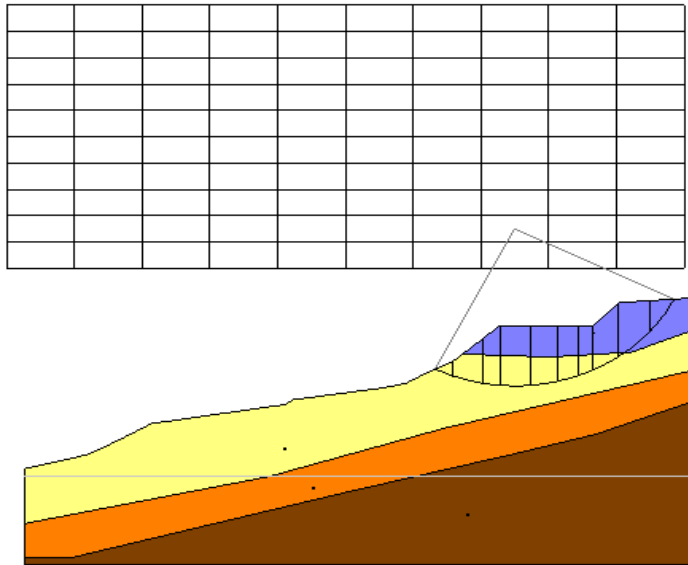
Dalle analisi effettuate emerge che solo una parte epidermica della sottoscarpa (spessore 1 – 1.5 m) è instabile, mentre come si rileva dalle immagini successive l'appiccio, utilizzando parametri di picco, è stabile.

### Pendio artificiale – condizioni statiche



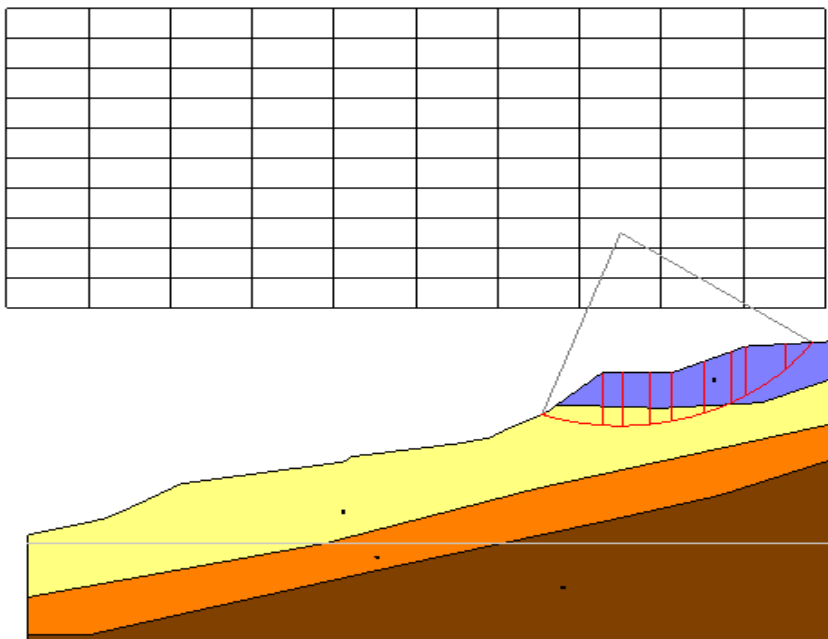
$x_c=1000$   $y_c=1006.0$   $R_c=262.74$   $F=1.3097$

**Pendio artificiale – condizioni sismiche**



$x_c=1000$   $y_c=1006.0$   $R_c=262.74$   $F=1.2841$

**Se si utilizzano i parametri residui il versante in tutte le condizioni mostra valori leggermente inferiori a 1.0.**



$x_c=1000$   $y_c=1050.0$   $R_c=284.7$   $F=0.9600$

Tuttavia, i dissesti attivi non riguardano l'appiccico e la sede del parcheggio. Pertanto, appare razionale utilizzare i parametri di picco.

Si prescrive, in conclusione, di fare ricorso all'ingegneria naturalistica (messa in opera di un sistema del tipo "palizzata" con ritti verticali di lunghezza 2,50/3,00 ml infissi per non meno di due terzi della loro lunghezza completati da fustame di opportuno diametro disposto a tergo degli infissi verticali) per consolidare la parte epidermica instabile della sottoscarpa, diminuirne la pendenza e contrastare efficacemente le erosioni superficiali che possano evolvere in piccoli dissesti gravitativi interessanti la coltre superficiale, intercettando le acque di dilavamento superficiale non permettendogli di acquisire l'energia necessaria per innescare processi erosivi e/o di movimentazione del livello superficiale dalle scarse caratteristiche geotecniche e nel contempo favoriscano la ritenzione idrica ed il deflusso controllato.

## 10. INDICAZIONI di FATTIBILITA' PER LA VARIANTE AL RUC

Sulla base del quadro conoscitivo come sopra definito e dettagliato ed in relazione alle indicazioni progettuali per l'adeguamento dell'esistente viabilità per la realizzazione di stalli di parcheggio in fregio alla viabilità si definiscono i seguenti criteri di fattibilità dell'intervento da attuarsi mediante approvazione di progetto di opera pubblica.

Si provvede pertanto alla indicazione dei criteri di fattibilità (ai sensi del R.R. n. 5/R di recente promulgazione) nell'intento di attuare e predisporre indicazioni e prescrizioni tali da costituire una sorta di **"doppia conformità"** (vedi fattibilità espressa nel paragrafo 1) nel rispetto degli strumenti normativi comunali, regionali e sovracomunali succedutisi nel tempo in quanto:

- risultano in corso di validità quelli riferibili ai comma 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 dell'allegato A al R.R. n. 26/R (sebbene decaduto) in quanto le disposizioni e prescrizioni dello stesso regolamento regionale costituiscono parte fondante dell'articolato in materia geologica, sismica ed idraulica delle Norme Tecniche di Attuazione del RUC vigente del Comune di San Godenzo fino alla sua permanenza in vigore in virtù della scelta dello SU comunale di demandare le prescrizioni di "scheda progetto" alla presente progettazione urbanistica;
- si verifica la necessità di allinearsi ai nuovi criteri di cui ai comma 3.2, 3.3, 3.5, 3.6 e 3.7 di cui all'allegato A del R.R. n. 5/R in vigore dal 30.01.2020 e alla L.R. n.41/2018 in quanto in base a tali istruzioni tecniche verrà effettuato il deposito per la fase istruttoria al competente Ufficio del Genio Civile di Firenze.

Si attribuiscono, pertanto nel proseguo della presente trattazione, le classi di fattibilità (numeriche) ai sensi del Reg. Reg. n. 26/R e si dettagliano i "criteri di fattibilità" in relazione alle problematiche geologiche, sismiche ed idrauliche in linea con i disposti di cui al Reg. Reg n. 5/R e L.R. n. 41/2018 di recente promulgazione.

### FATTIBILITA' GEOLOGICA – SISMICA ed IDRAULICA

In relazione alla vigente disciplina del RUC (che articola definizioni di fattibilità in relazione ai criteri del Reg. Reg. n. 26/R)

#### EDILIZIO O URBANISTICO E DEL GRADO DI PERICOLOSITÀ' GEOMORFOLOGICA e SISMICA DELL'AREA

TIPO DI INTERVENTO: EDILIZIO/URBANISTICO	GRADO DI PERICOLOSITÀ' GEOMORFOLOGICA - SISMICA			
	G1 - S1	G2 - S2	G3 - S3	G4 - S4
Scavi e rinterri di qualsiasi genere connessi alle opere di cui al presente abaco. a) di altezza modesta (°) b) di altezza non modesta	F1 F1	F1 F2	F2 F3	F3 F4 (*)
Aree destinate all'ampliamento di sede stradale esistente o alla realizzazione di nuovi brevi tratti di viabilità di ingresso, servizio o per il miglioramento dell'attuale viabilità, nuova viabilità forestale e antincendio.	F1	F1	F2	F3
Aree destinate a parcheggi pubblici e/o privati: - a raso (realizzate con mantenimento delle attuali quote e/o morfologia); - con modesti sbancamenti e riporti (°); - con sbancamenti o riporti non modesti o in sotterraneo.	F1 F1 F1	F1 F2 F2	F2 F2 F3	F3 F3 F4(*)

(°) Sarà cura del progettista valutare quali sono gli scavi o riporti di altezza "modesta", cioè quelli che non comportano problematiche di instabilità.

**CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE DELLA CLASSE DI FATTIBILITA' IN FUNZIONE DEL TIPO DI INTERVENTO  
EDILIZIO O URBANISTICO E DEL GRADO DI PERICOLOSITA' IDRAULICA  
(ex Regolamento Regionale n. 26/R) DELL'AREA INTERESSATA**

TIPO DI INTERVENTO: EDILIZIO/URBANISTICO	GRADO DI PERICOLOSITA' IDRAULICA			
	I.1	I.2	I.3	I.4
<b>NUOVI INTERVENTI</b>				
Nuovi edifici, ampliamenti di esistenti edifici che prevedano nuova occupazione di suolo , parcheggi e viabilità con dimensioni <50 mq.	<b>F1</b>	F1	F2	F3
Nuovi edifici, ampliamenti di esistenti edifici che prevedano nuova occupazione di suolo , parcheggi e viabilità con dimensioni > 50 mq.	<b>F1</b>	F1	F3(°)	F4(°)
Scavi e sbancamenti	<b>F1</b>	F1	F1	F1

si attribuiscono le seguenti classi di fattibilità per la previsione in oggetto (adeguamento di esistente viabilità da realizzarsi mediante modesto sbancamento sulla scarpatina di monte del tracciato stradale):

- Fattibilità geologica F.3
- Fattibilità sismica F.3
- Fattibilità idraulica F.1

In relazione alle indicazioni tecniche di cui al recente Reg. Reg. n. 5/R (attualmente in vigore) che supera, integra e sostituisce in toto i precedenti Reg. Reg. n. 26/R e 53/R si definiscono le seguenti indicazioni e criteri di fattibilità:

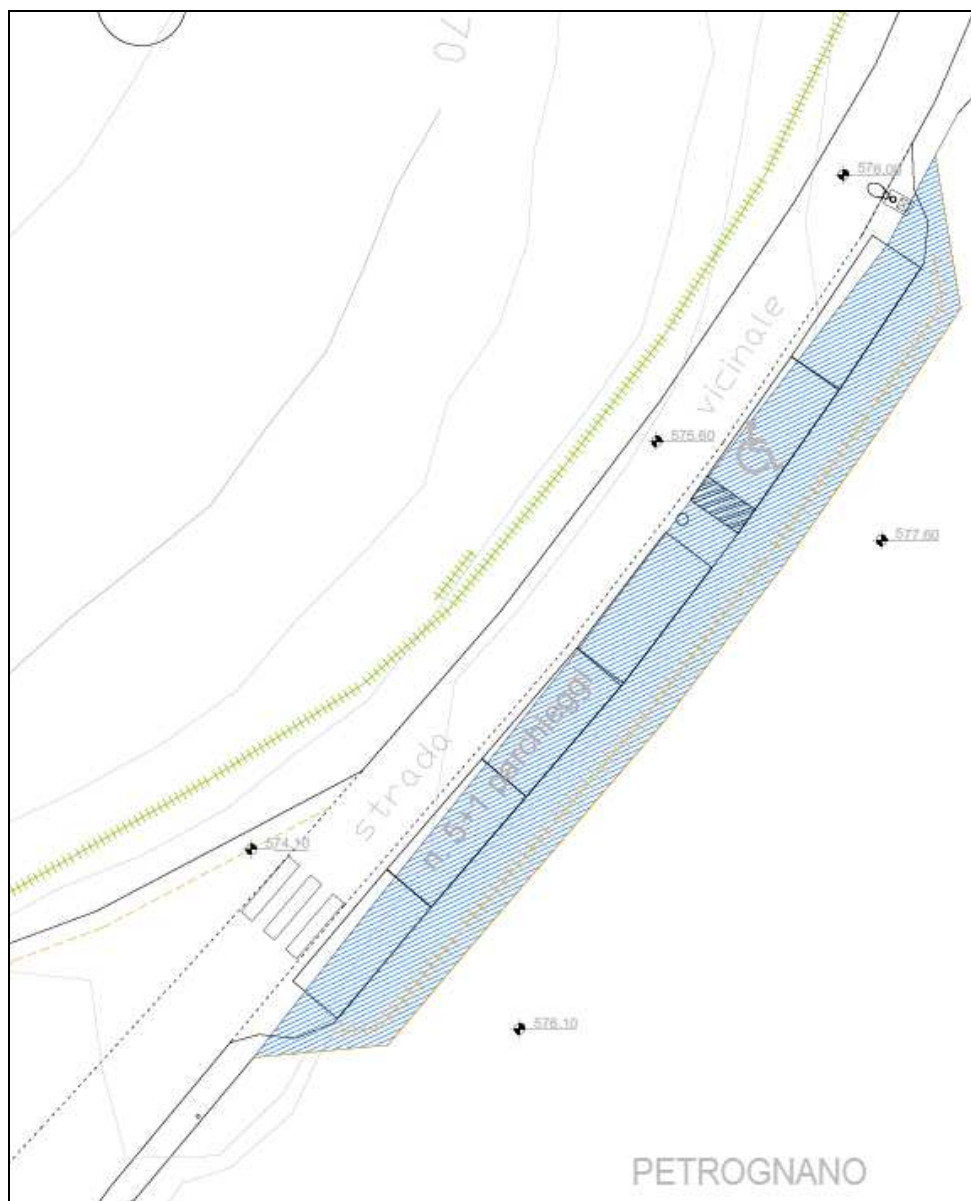
- per gli aspetti geologico e sismico si ritiene che l'indagine svolta, su cui si fondano le argomentazioni sopra svolte, rientri, in relazione alla consistenza della previsione oggetto di variante con realizzazione di scavi nel settore prossimo al coronamento del corpo di frana con alleggerimento dei carichi in testa al dissesto stesso, ottemperi alle indicazioni tecniche di cui al comma a) del paragrafo 3.2.1 e al terzo capoverso del paragrafo 3.6.1 dell'allegato A del R.R. n. 5/R.
- gli accorgimenti progettuali postulati, peraltro, risultano tali da:
  - a1) non pregiudicare le condizioni di stabilità nelle aree adiacenti,
  - a2) non limitare la possibilità di realizzare interventi definitivi di stabilizzazione del versante sottostante;
  - a3) consentire la manutenzione delle opere di messa in sicurezza previste nella proposta progettuale stessa.

A corredo dell'intervento si consiglia la predisposizione di opere di ingegneria naturalistica a presidio della coltre superficiale alteritica presente nell'area di sottoscarpa (di valle) dell'esistente tracciato viario, ancorchè in questo settore non si intervenga a livello di variante urbanistica e di adeguamento dell'infrastruttura viaria.

Tale intervento potrebbe consistere nella realizzazione di un sistema di "palificata" con infissione di pali in legno (tondame di diametro 15/20 cm e lunghezza 2,5-3,0 ml con interasse 100 cm) completati in testa da elementi di paleria (5/6 elementi sovrapposti l'un l'altro) di diametro 10 cm e lunghezza 3,00 ml la per stabilizzare la coltre superficiale e di materiale alteritico e difenderla da processi erosivi innescabili dalle acque superficiali.

In relazione all'aspetto idraulico non si dettano condizioni/prescrizioni inerenti rischio di inondazione.

Si ritengono gli accorgimenti progettuali di regimazione delle acque superficiali con la loro raccolta e collettazione in allontanamento con ripristino delle tombature e ripristino di efficienza di tratti fognari significativamente esaustivi per la realizzazione dell'opera proposta in variante urbanistica.



-  Area oggetto di Variante
-  Palificata in legname a parete semplice
-  Palizzata in legname

*Rappresentazione planimetrica del settore oggetto di variante al vigente Strumento Urbanistico*

Firenze li, 23.11.2022

Prof. Geol. Eros Aiello  
Dott. Geol. Gabriele Grandini



## **ALLEGATI**

Contiene:

Certificazione prova penetrometrica dinamica  
Indagini sismiche (Masw-Remy e HVSR)

**PROVINCIA DI FIRENZE**  
**COMUNE DI SAN GODENZO**



**Indagini Geofisiche sismiche attive e passive MASW-REMI e misura di microtremore ambientale HVSRR , a supporto del progetto “REALIZZAZIONE ADEGUAMENTO VIABILITA’ COMUNALE IN LOCALITA’ PETROGNANO CON REALIZZAZIONE DI STALLI PER LA SOSTA” Loc.Petrognano, San Godenzo, Firenze.**

**Data:** 16 Novembre 2022

**Geologo Incaricato:**

Dott. Geologo Cristian Pieroni  
n. 1766 Ord.Reg. Toscano



Dott. Geol. Cristian Pieroni

---

## **INDICE RELAZIONE**

<b>1 – PREMESSA</b>	<b>3</b>
1.1 UBICAZIONE AREA DI STUDIO	3
1.2 INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE	3
1.3 STRUTTURA DELLA RELAZIONE	3
<b>2 – LE ONDE DI SUPERFICIE</b>	<b>4</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE	4
2.2 CENNI TEORICI	5
2.3 PROPRIETA' RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI	8
<b>3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE</b>	<b>10</b>
3.1 PROCEDURE DI CAMPAGNA	10
3.2 METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE	11
<b>4 – INDAGINE SISMICA MASW-REMI (Multichannel Analysis of Surface Waves)</b>	<b>13</b>
4.1 ACQUISIZIONE DEI DATI MASW	15
4.1.1 PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI	16
4.1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	19
4.1.3 ESECUZIONE INDAGINE MASW	19
4.2 ELABORAZIONE (PROCESSING) ED INVERSIONE DEI DATI MASW	21
<b>5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)</b>	<b>25</b>
5.1 ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA	26
5.2 ANALISI DEI DATI	27
5.3 IL PROGETTO SESAME	27
5.3.1 CRITERI DI AFFIDABILITA' DEL PICCO	27
5.3.2 CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO	29
5.3.3 INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME	30
5.4 VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLE MISURE HVSR	32
5.5 CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	34
<b>8 – BIBLIOGRAFIA</b>	

---

---

## **ALLEGATI**

- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA MASW/REMI
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE SISMICA PASSIVA MICROTREMORE HVSR
- ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI

---

## **1 – PREMESSA**

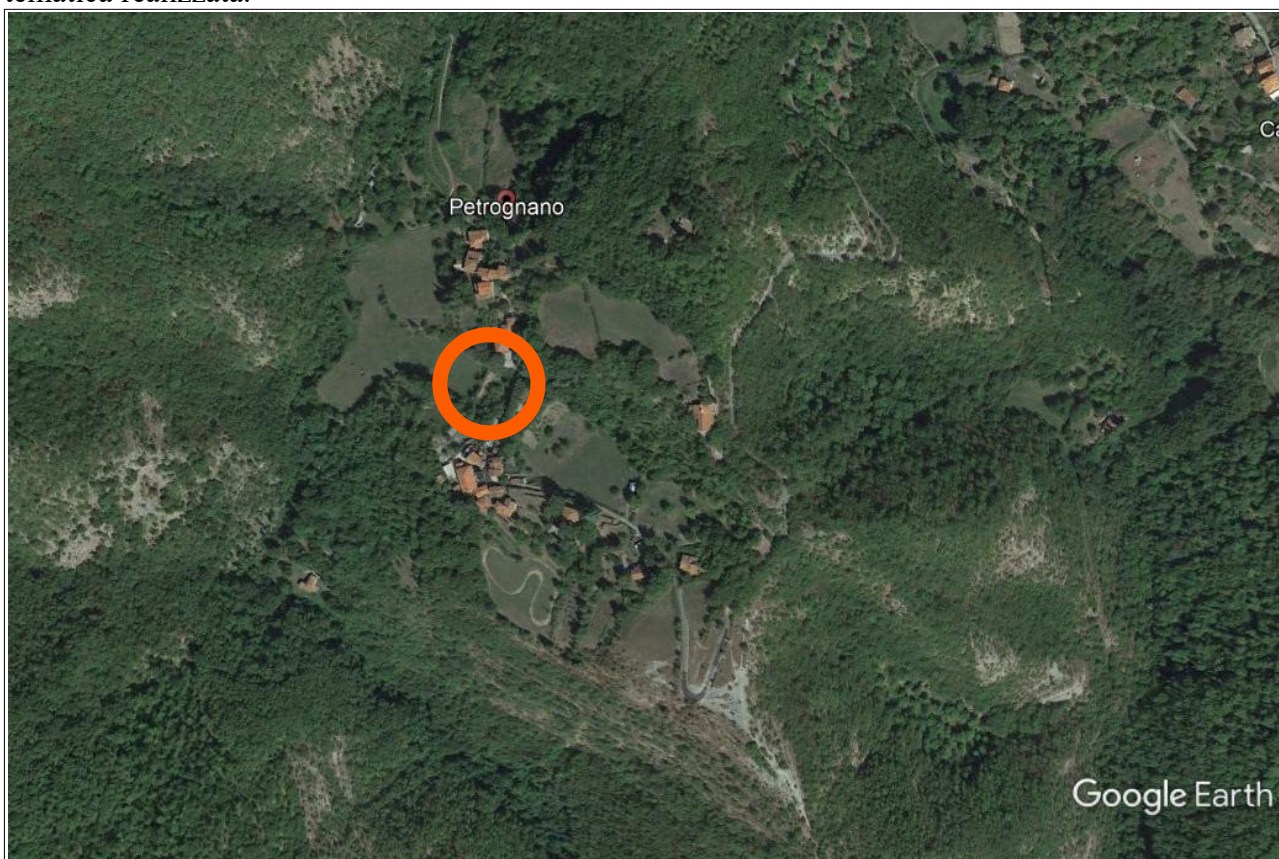
Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geofisiche, di tipo sismico attivo-passivo, condotte a supporto degli studi per “REALIZZAZIONE ADEGUAMENTO VIABILITA' COMUNALE IN LOCALITA' PETROGNANO CON REALIZZAZIONE DI STALLI PER LA SOSTA”, in Loc. Petrognano, nel comune di San Godenzo, Firenze.

Lo studio cerca un maggior dettaglio per la ricostruzione della stratigrafia del sottosuolo, incrociando i dati delle indagini geognostiche dirette pregresse (Carotaggio) e delle indagini geofisiche inderette (Punto Sismico MASW- REMI- HVSR).

### **1.1 – UBICAZIONE AREA DI STUDIO**

Le indagini geofisiche integrate, sono state eseguite all'interno del territorio del Comune di San Godenzo in Localita' Petrognano, Firenze..

Per la visualizzazione dell'ubicazione di ciascuna indagine svolta si rimanda alla cartografia tematica realizzata.



Inquadramento area di Studio.

---

## **1.2 – INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE**

La caratterizzazione dal punto vista sismico del terreno è stata condotta mediante la realizzazione delle seguenti tipologie di prove geofisiche sia attive che passive:

**n. 1 indagine sismica attiva congiunta MASW-REMI** (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità Vs nel sottosuolo;

**n. 1 indagini sismiche passive HVSR** per determinare la frequenza di risonanza di sito.

## **1.3 – STRUTTURA DELLA RELAZIONE**

La presente relazione descriverà i metodi di indagine utilizzati, illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione, e verranno mostrati, in allegato, i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica sismica ed elettrica integrata, a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo relativamente alle diverse aree di indagine.

Verranno quindi in un primo momento illustrate e descritte le varie tecniche di acquisizione dei dati geofisiche, successivamente verranno riportate le modalità di elaborazione dei dati ed infine mostrati i risultati ottenuti.

---

## **2 – LE ONDE DI SUPERFICIE**

### **2.1 – DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE**

Le onde superficiali si generano ogni qual volta esiste una superficie libera.

Vengono a crearsi quindi a causa dell'interazione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica, la più studiata delle quali è la superficie libera della Terra.

Queste onde si propagano solo lungo la superficie o nell'interfaccia tra due strati con proprietà fisiche diverse.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di volume, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

Esistono due tipi di onde di superficie, chiamate coi nomi dei due fisici che per primi le studiarono: Onde di Rayleigh e Onde di Love.

#### **- Onde di Rayleigh**

Quando un'onda S (componente SV) assieme ad un'onda P incide sulla superficie libera dalla componente vettoriale delle due si generano onde superficiali che si propagano lungo la superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la loro velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, ossia la sua velocità è anche funzione della sua frequenza).

Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Si dimostra che una particella investita da questo tipo di onda vicina alla superficie, percorre un moto ellittico retrogrado lungo la direzione di propagazione (Fig. 1).

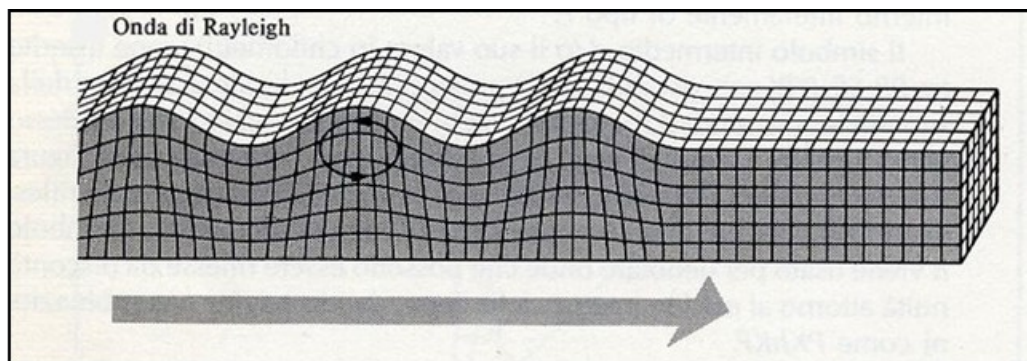


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

---

- Onde di Love

Le onde di Love sono onde superficiali, anch'esse generate dall'incontro delle Onde S (componente SH) con la superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (un mezzo quindi disomogeneo) di conseguenza sono onde sempre disperse.

Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 2).

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

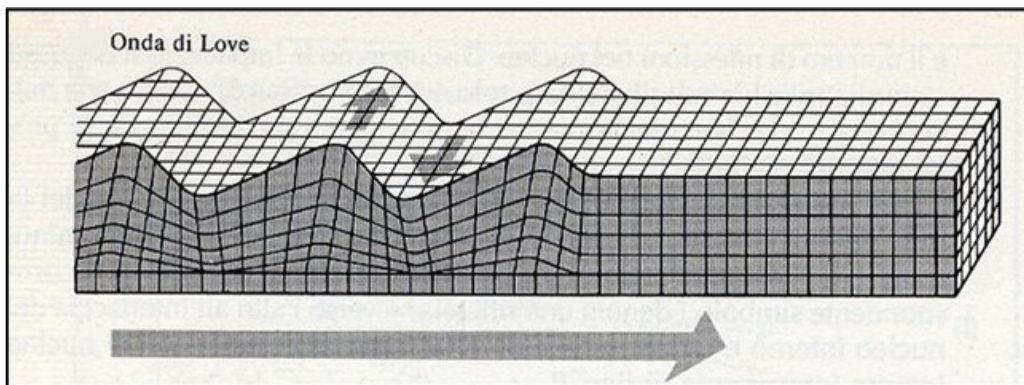


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

## 2.2 – CENNI TEORICI

Nella maggior parte delle indagini sismiche di superficie, quando viene utilizzata una sorgente di onde di compressione, oltre due terzi del totale di energia sismica complessivamente generata è trasmessa mediante onde di Rayleigh.

Se consideriamo la variazione di velocità verticale in mezzi eterogenei noteremo che le onde di Rayleigh hanno un comportamento dispersivo, vale a dire che la velocità di gruppo non coincide con la velocità di fase di ciascuna frequenza.

Detto questo all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$  aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione.

Sapendo che la lunghezza d'onda è legata al periodo  $T$  dell'onda mediante la relazione:

$$\lambda = V \cdot T$$

se ne deduce che, a parità di velocità ( $V$ ), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza (si ricorda che  $T = 1/f$  dove  $f$  è la frequenza).



---

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.

Il terreno inoltre agisce da filtro passa basso quindi le frequenze più alte possono essere indicative soltanto per gli strati più superficiali.

Nel caso delle onde Rayleigh, lo strato coinvolto nella perturbazione ha uno spessore dell'ordine di circa  $0.5 \lambda$  (Choon B.Park et al., 1997).

L'immagine sottostante (Fig. 3) riassume il concetto per cui considerando due componenti una ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (a sinistra) e una a bassa frequenza e quindi grande lunghezza d'onda (a destra), la velocità di propagazione della prima dipende dal materiale più superficiale (quindi dalle caratteristiche ad esempio del primo strato) mentre la seconda viaggerà ad una velocità che dipende da tutto il materiale fino in profondità (quindi dalle caratteristiche di tutti gli strati che compongono questo ipotetico modello).

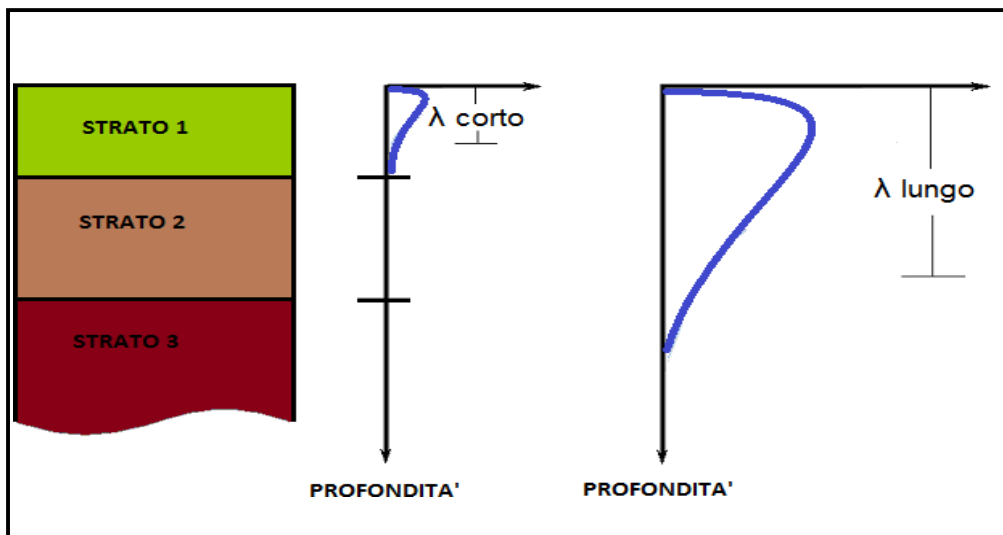


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

La distribuzione della velocità di fase in funzione della frequenza prende il nome di curva di dispersione.

E' chiaro quindi che più un modello di terreno è eterogeneo e maggiore sarà il grado di dispersione delle onde superficiali (Fig. 4).

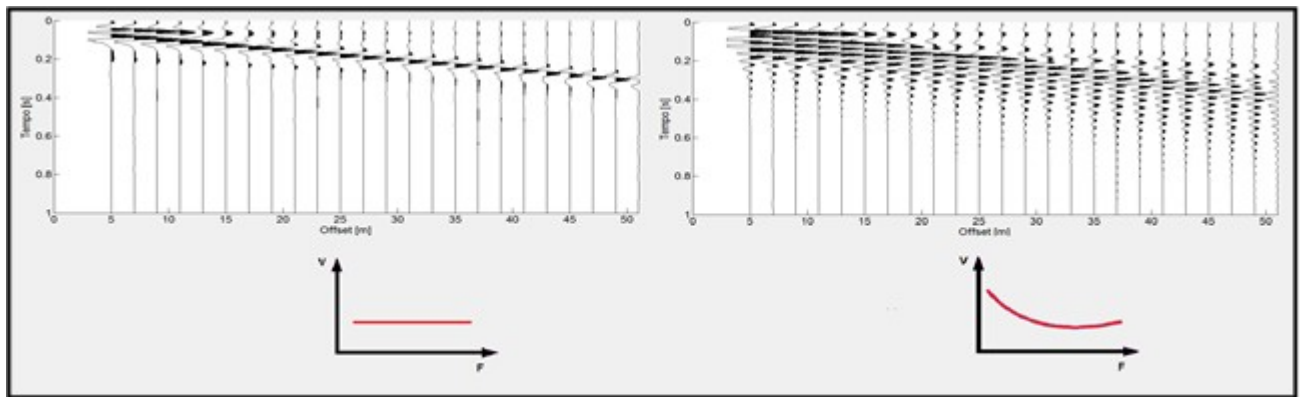


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

Un altro importante aspetto è connesso con la possibilità che questo tipo di onde, in presenza di eterogeneità verticali, manifestino anche una natura multimodale, vale a dire che la loro propagazione può avvenire, per una data frequenza, solo a determinate velocità (modi di propagazione).

Il modo che presenta la velocità di propagazione più bassa è detto modo fondamentale, mentre i restanti costituiscono i modi superiori.

In caso di strati eterogenei e con velocità crescenti il modo fondamentale è quello più energetico.

E' stato osservato che i modi superiori hanno origine in presenza di inversioni di velocità (Fig. 5) o di contrasti di velocità molto forti tra due strati (Cercato, 2008).

In questo caso i modi superiori sono caratterizzati da energia superiore rispetto al modo fondamentale.

Molto spesso può accadere che ci siano dei "salti di modo" tra il fondamentale e i superiori e viceversa quindi il solo basarsi sul modo fondamentale implica in alcuni casi una scorretta inversione dei dati.

I modi superiori vengono sempre più usati infatti il loro utilizzo nelle elaborazioni unitamente al modo fondamentale, può aiutare a vincolare meglio il modello Vs del sottosuolo, soprattutto in profondità. I più comuni software in commercio ne prevedono l'uso.

La dispersione delle onde superficiali quindi, elemento di disturbo negli altri tipi di indagini (sismica a rifrazione e a riflessione), risulta invece, grazie a questa sua proprietà, estremamente utile per calcolare le proprietà elastiche dei mezzi presenti in superficie.

Dalla curva di dispersione, in particolare dallo studio del modo fondamentale, infatti si può ricavare, attraverso l'operazione di inversione dei dati, il profilo di Velocità Vs e gli spessori degli strati indagati, parametri fondamentali sia in ingegneria sia in geofisica di esplorazione.

La stessa curva di dispersione inoltre può essere calcolata a partire dal sismogramma iniziale  $x-t$  (offset-tempi) sia in forma generale in un diagramma F-V (frequenze-velocità), sia in un diagramma F-L (frequenze-lentezze dal momento che  $L = 1/V$ ), sia in un diagramma F-K (frequenze-numeri d'onda dal momento che  $f=1/T$  quindi  $V = \lambda f = 2\pi f / K$ ) sia in un diagramma T-V o T-L (tempi-velocità o tempi-lentezze).

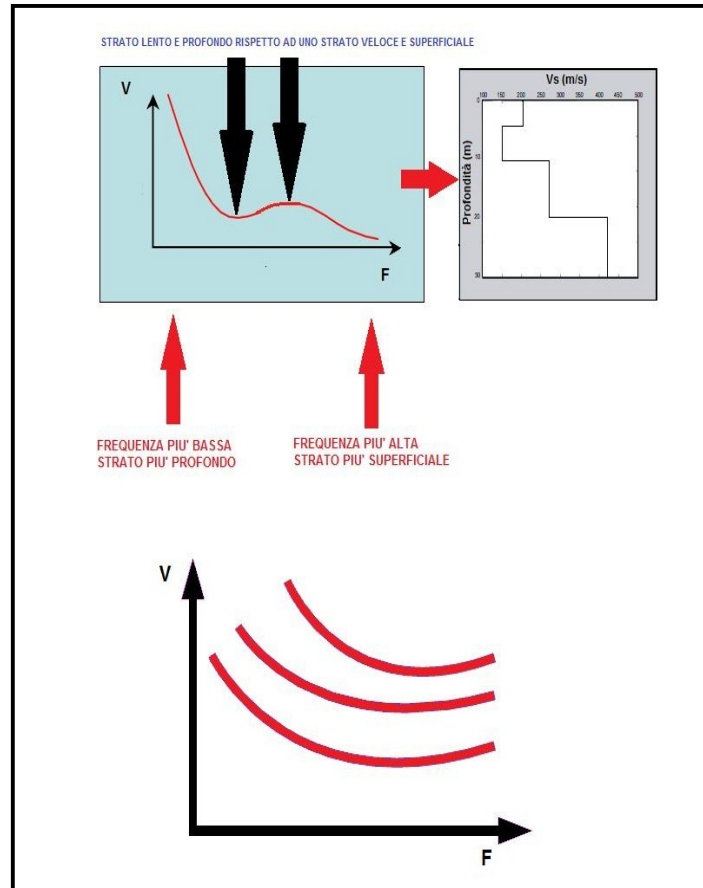


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

### **2.3 – PROPRIETÀ RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI**

1. Circa il 67% dell'energia rilasciata da un qualsiasi tipo di sorgente genera onde di superficie.
2. L'ampiezza delle onde superficiali caratterizzate da un fronte d'onda cilindrico, la cui area risulta  $2\pi xz$ , è notevolmente maggiore rispetto alle onde di corpo che invece presentano fronte d'onda sferico.

Questo significa che per conservare l'energia (dal momento che l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda) l'ampiezza dell'onda di superficie alla distanza  $X$  deve essere proporzionale a  $1/X$ . Il fronte d'onda delle onde di corpo invece è sferico (area relativa  $4\pi x^2$ ) quindi

---

l'ampiezza alla distanza  $X$  è proporzionale a  $X^{-2}$  il che significa che decade molto più velocemente delle onde superficiali.

3. Lo studio delle onde superficiali non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

4. La propagazione delle onde di Rayleigh è influenzata prevalentemente da  $V_s$  e dallo spessore  $h$  degli strati mentre le velocità  $V_p$  e la densità possono essere trascurate. La velocità delle onde di Rayleigh è circa il 90 % della velocità delle  $V_s$ .

5. La proprietà della dispersività permette il calcolo della curva di dispersione dalla quale è possibile ricavare i parametri fondamentali del modello di terreno in superficie. Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

---

### **3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE**

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

#### **3.1 – PROCEDURE DI CAMPAGNA**

I cavi sismici sono stati stesi lungo la zona di interesse e ad essi sono stati collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

Per quanto riguarda invece l'energizzazione delle onde SH è stata utilizzata sempre una mazza da 8 Kg e la battuta è stata eseguita all'interno di buche con pareti a 90° colpendo su ambo i lati in maniera trasversale allo stendimento dei geofoni.

---

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points), sono stati disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi, esternamente ed a distanze variabili entro il profilo stesso (in questo caso solo in posizione centrale).

La profondità di investigazione è, in linea teorica direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

### **3.2 – METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE**

La procedura d'elaborazione dati consiste di due fasi: la lettura dei tempi d'arrivo ai vari geofoni dello stendimento per ciascuna energizzazione effettuata e la loro successiva elaborazione mediante metodi di calcolo.

I tempi di primo arrivo delle onde sismiche vengono riportati su diagrammi spazio-tempo (dromocrone) nei quali l'asse dei tempi ha l'origine coincidente con l'istante in cui viene prodotta l'onda sismica (to), mentre nelle ascisse si hanno le distanze relative fra i geofoni dello stendimento.

Tali diagrammi consentono di determinare, nei punti di flesso, le variazioni di velocità fra i vari strati attraversati dai raggi sismici e, tramite elaborazioni, le profondità a cui si verificano tali variazioni.

Il procedimento di elaborazione dei tempi d'arrivo per ottenere le profondità dei rifrattori, utilizza più metodi: il Metodo del tempo di ritardo (delay time), il Metodo del tempo di intercetta, il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) proposto da Palmer (1980) ed il Metodo Tomografico.

Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni (analisi della velocità e tempo-profondità) si determinano le velocità e quindi le profondità dei rifrattori individuati sulle dromocrone.

La funzione di analisi della velocità corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifratore (distanza intergeofonica), per cui la sua determinazione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche sul rifratore stesso.

Tramite un procedimento di migrazione dei dati, sia la funzione tempo-profondità che quella di analisi della velocità vengono calcolate per distanze intergeofoniche crescenti (da 0 a multipli interi dell'equidistanza dei geofoni): viene scelta poi quella distanza per la quale le curve presentano il miglior andamento rettilineo.

---

Il G.R.M., a differenza del metodo del tempo d'intercetta, permette anche di verificare e di individuare, con metodi di calcoli indiretti, la presenza di eventuali strati nascosti (di limitato spessore e/o basso contrasto di velocità) e strati a bassa velocità nella serie stratigrafica.

Negli strati nascosti si ha sempre un aumento di velocità con la profondità, ma il loro spessore è sottile e/o il contrasto di velocità con lo strato sottostante è piccolo, per cui i raggi sismici che partono da questi strati vengono oscurati dai raggi che partono dallo strato sottostante. Gli strati a bassa velocità presentano invece una velocità sismica minore rispetto allo strato sovrastante (inversione di velocità), per cui alla loro interfaccia non si verifica una rifrazione critica e così non vengono evidenziati sul grafico tempo-distanza.

L'individuazione di eventuali strati nascosti e/o inversioni di velocità viene effettuata attraverso il confronto fra i valori delle funzioni tempo-velocità misurate e quelle ricalcolate in base al valore di XY utilizzata per l'elaborazione (Palmer 1980).

Il Metodo tomografico permette di intervenire sui parametri del modello e di "controllare" le iterazioni successive, al fine di ridurre l'errore quadratico medio (indice della differenza tra i percorsi delle onde sismiche calcolati e quelli misurati).

A partire dal modello con parametri predefiniti dall'operatore (numero di iterazioni da effettuare, intervallo delle velocità sismiche di riferimento, posizione delle celle, dimensione delle celle e forma delle celle), i valori iniziali di velocità sismica relativi alle singole celle vengono modificati mediante iterazioni successive allo scopo di "fittare" i segmenti dei percorsi sismici e renderli compatibili con le misure sperimentali.

L'obiettivo è quindi il calcolo del tempo di transito dell'onda attraverso le celle del modello ed il confronto di tale tempo con quello sperimentale.

Attraverso successivi processi iterativi si determina un modello di velocità sismica finale che permette di soddisfare contemporaneamente le caratteristiche dei vari raggi sismici.

---

#### **4 – INDAGINE SISMICA MASW-REMI (Multichannel Analysis of Surface Waves)**

Per le proprietà descritte precedentemente può risultare quindi conveniente l'utilizzo delle onde superficiali per la caratterizzazione di un determinato sito di indagine per stimare il profilo di Vs dalla velocità delle onde superficiali.

E' stato dimostrato ampiamente che la curva di dispersione delle onde superficiali è influenzata soprattutto dalla velocità delle onde S ma anche dallo spessore di ciascuno strato mentre risultano poco influenti le velocità delle onde P (totalmente nel caso delle onde di Love) e la densità di ciascuno strato.

E' quindi possibile stimare oltre al profilo di velocità delle onde S anche i diversi spessori degli strati.

La registrazione di tali forme d'onda viene effettuata mediante la tecnica MASW, l'acronimo sta per Multichannel Analysis of Surface Waves.

Bisogna precisare subito che la tecnica MASW non si basa solo ed esclusivamente sullo studio delle onde di Rayleigh in quanto anche le onde di Love sono onde superficiali anch'esse soggette al fenomeno della dispersione.

In questa specifica tecnica verranno però prese in considerazione solo le onde di Rayleigh.

Come è stato descritto in precedenza le onde di Rayleigh sono caratterizzate da una polarizzazione sul piano verticale e sono quindi registrabili lungo le due componenti verticale e radiale quindi possono essere registrate sia tramite geofoni verticali (per quanto riguarda la componente verticale) sia tramite geofoni orizzontali posti parallelamente allo stendimento (per quanto riguarda la registrazione della componente radiale).

Il tipo di sorgente dovrà comunque essere di tipo verticale per entrambe le componenti.

Questa precisazione è stata fatta perché molto spesso il solo utilizzo della componente verticale e/o orizzontale delle onde di Rayleigh, come unica tecnica MASW, senza avere dati geologici di base su un determinato sito, può non essere sufficiente per una corretta interpretazione dei diversi modi e la successiva inversione dei dati potrebbe dare qualche problematica.

#### **LIMITAZIONI DEL METODO MASW**

In generale è bene precisare che il metodo MASW presenta alcune limitazioni tra le quali:

1. Il modello di terreno deve essere a strati piani e paralleli viceversa la prova MASW perderebbe di attendibilità.
2. In riferimento a quanto previsto al precedente punto 1, non ci devono essere significative variazioni laterali del terreno.
3. La quota topografica dello stendimento dei geofoni non deve avere variazioni consistenti.



---

4. Le caratteristiche elastiche del terreno possono in alcuni casi attenuare completamente le onde superficiali rendendo quindi il metodo MASW inutilizzabile.

5. La profondità di investigazione è dipendente anche dalla lunghezza dello stendimento.

6. Poiché il profilo  $V_s$  finale viene calcolato mediante un processo di inversione, è possibile pervenire ad una curva di dispersione non univoca, ovvero quest'ultima soddisfa più modelli differenti di terreno (vedere seguito).

I metodi di prospezione sismica **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves) quindi, consentono di ottenere un modello verticale delle VS a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale.

In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda.

Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari.

Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore  $H$  dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità  $\rho$  dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson.

A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame.

Quanto detto rappresenta il problema diretto: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh.

Nella prospezione occorre invece affrontare il problema inverso: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi di seguito descritte in maniera semplificata:

**Acquisizione:** registrazione e osservazione dei dati sismici “grezzi” contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;

**Processing:** trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FP) e operazione di *Picking* della Curva di dispersione ottenuta;

**Inversione:** uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità riconducibile col minor scarto di errore possibile al *Picking* della Curva di dispersione sperimentale ottenuta.

#### 4.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI MASW

Le analisi della dispersione delle onde superficiali partono dall'acquisizione dei dati con una geometria di tipo off-end ovvero lo stendimento dei geofoni si trova allineato da una stessa parte rispetto alla sorgente (Fig. 6) oppure split-spread quando invece la sorgente è posta all'interno dello stendimento di geofoni.

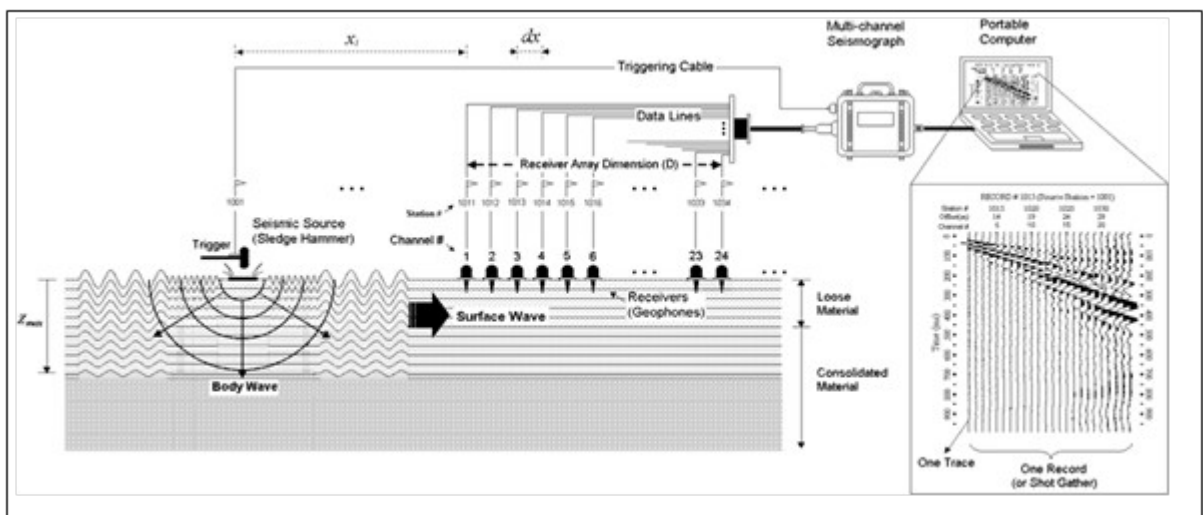


Fig. 6 - Schema di acquisizione delle Onde Superficiali (Fonte immagine [www.kgs.ku.edu](http://www.kgs.ku.edu)).

---

La strumentazione necessaria deve comprendere:

- Sismografo e suoi componenti (Cavi, Trigger, Sistema di acquisizione dati e inversione)
- Geofoni verticali e orizzontali
- Sorgente: martello, grave in caduta libera o fucile sismico
- Piastra per la battuta o traversina
- Appositi supporti per ciascun geofono in caso di presenza di asfalto o roccia

#### **4.1.1 – PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI**

Ecco nel dettaglio i vari parametri necessari per un'acquisizione dati MASW:

##### 1- Sorgente

Il tipo di sorgente utilizzata è stato di tipo verticale (martellata).

Qualora la registrazione fosse risultata problematica a causa della distanza e/o dell'attenuazione intrinseca del terreno è stato aumentato il numero di stack (ovvero il numero di colpi per registrazione). Ciò in generale tende a migliorare il rapporto segnale/rumore, la qualità delle registrazioni e quindi degli spettri di velocità su cui si andrà a fare il picking.

##### 2 - Lunghezza dello stendimento Array Dimension (D)

Lo stendimento, in teoria, deve avere la lunghezza (D) maggiore possibile (in base alla disponibilità di spazio e di geofoni) in quanto dalla sua lunghezza derivano le frequenze più basse registrabili ( $\lambda_{max}$ ) e quindi di conseguenza, come descritto in precedenza, una maggiore profondità di investigazione (Z).

La sua lunghezza non deve comunque essere superiore a 46 m (la distanza tra geofoni deve essere pari a 2 m per un array di 12 geofoni). In caso di utilizzo di più geofoni possono essere comunque possibili anche lunghezze superiori.

Dalla lunghezza dello stendimento dipende inoltre la risoluzione dei vari spettri, maggiore è la lunghezza e maggiore è la risoluzione. Di conseguenza sarà più facile effettuare l'operazione di picking.

In prima approssimazione quindi, sempre in via teorica,  $D \approx Z \approx \lambda_{max}$  dove  $\lambda_{max}$  è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza).

##### 3 – Distanza tra i geofoni (dx)

Dipende molto dal numero di geofoni (in questo caso 12), dalla lunghezza dello stendimento e quindi dalla disponibilità di spazio. Utilizzando 12 geofoni la dx deve essere massimo di 2 m.

A maggior ragione se venisse utilizzato lo spettro f-k per l'individuazione dei modi delle onde superficiali deve essere comunque sempre utilizzata una dx piccola (2 m massimo).

---

Questo a causa del problema dell'*aliasing spaziale* ovvero la non sufficientemente ridotta distanza tra geofoni non consente di campionare a sufficienza i segnali a più alta frequenza.

Tale problema si presenta qualsiasi spettro si utilizzi, ma nel caso  $f - v$  è più facilmente individuabile e non compromette l'interpretazione del dato rispetto allo spettro  $f - k$ .

Dalla distanza tra i geofoni dipendono inoltre le frequenze più alte registrabili quindi le informazioni inerenti gli strati più superficiali.

Una  $dx$  troppo grande inoltre (utilizzando 12 geofoni) ridurrebbe la "ridondanza", cioè quel fenomeno che permette di registrare la stessa frequenza da più stazioni e consente di avere un migliore rapporto segnale/rumore e quindi una migliore definizione della curva di dispersione ottimale.

In prima approssimazione quindi, in questo caso, la profondità minima di esplorazione  $z \approx dx \approx \lambda_{\min}$ , dove  $\lambda_{\min}$  è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

#### 4 - Distanza sorgente-primario ricevitore (offset minimo $X_1$ )

Per quanto riguarda l'offset minimo bisogna tenere in considerazione il fatto che una sorgente troppo vicina causa problemi di *near offset* e non si rispetta la condizione di onda piana in quanto l'onda generata ha un fronte sferico.

La teoria prevede che un'onda può considerarsi piana ad una distanza circa la metà della massima lunghezza d'onda desiderata (se vogliamo ad esempio avere un profilo che interessa i primi 30 metri di profondità si deve considerare una lunghezza d'onda di circa 60-70 metri, quindi un offset minimo di 30-40 m).

In pratica molto spesso ciò non è possibile, ma buoni risultati si possono ottenere anche ad offset minimi inferiori.

E' necessario quindi effettuare registrazioni con diversi offset in modo da poter valutare, nella fase di elaborazione dati, diversi spettri di velocità derivanti da diverse configurazioni sorgente-ricevitori ed ottenere dal loro confronto un quadro più completo che agevoli il riconoscimento dei modi delle onde di Rayleigh effettivamente presenti, non essendo possibile stabilire a priori, in campagna, quale sia la migliore configurazione.

In questo modo si può avere inoltre un riscontro sulla conformazione 1D del sottosuolo (presenza o meno di variazioni laterali) ma anche risultati che interessino porzioni di terreno sempre più profonde.

#### 5 - Tipo di geofoni

E' raccomandato per questo tipo di registrazioni l'utilizzo di geofoni in grado di registrare basse frequenze (4.5 Hz o inferiore).

---

I geofoni verticali vengono utilizzati per la misura della componente verticale delle onde di Rayleigh mentre quelli orizzontali, eventualmente, per la componente radiale delle onde di Rayleigh.

I geofoni vengono posizionati in maniera ben solidale al terreno; in presenza di roccia o di asfalto si utilizzano gli appositi supporti. Il numero di geofoni utilizzati in questa campagna è di 12.

#### 6 – Intervallo di campionamento (dt)

Per quanto riguarda le onde superficiali si parla di onde che hanno un range di frequenze teoricamente <100 Hz per questo motivo è sufficiente utilizzare un passo di campionamento molto ampio (anche 4 ms).

#### 7 – Tempo di registrazione

Il tempo di registrazione dipende molto dal tipo di terreno. Se omogeneo o quasi il fenomeno della dispersione non è molto accentuato, se invece è molto eterogeneo il “ventaglio” della dispersione è molto ampio.

Pertanto la lunghezza della registrazione deve essere di almeno 1-2 secondi.

Nella tabella successiva vengono riassunti i parametri utilizzati appena descritti:

SORGENTE	Onde di Rayleigh: verticale (martellata)
LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO (D)	22 metri
DISTANZA TRA GEOFONI (dx)	2 m
OFFSET MINIMO (X <sub>i</sub> )	≈ dx e ≈ D/2
NUMERO DI SCOPPI	2
TIPO DI GEOFONI	4.5 Hz (verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh)
NUMERO DI GEOFONI	12
TEMPO DI REGISTRAZIONE	1-2 secondi
INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO (dt)	0.5 – 2 ms
NOTE	Le tracce non sono state filtrate e è stato aggiunto AGC (Automatic Gain Control)

---

#### **4.1.2 – STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente campagna geofisica sono state svolte utilizzando un sismografo *DOREMI* prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

#### **4.1.3 – ESECUZIONE INDAGINE MASW**

La geometria di acquisizione utilizzata è indicata nello schema sottostante.

E' bene precisare che una geometria di acquisizione "fissa" non esiste, poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato.

La geometria proposta, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, rappresenta il giusto compromesso tra pratica e teoria.

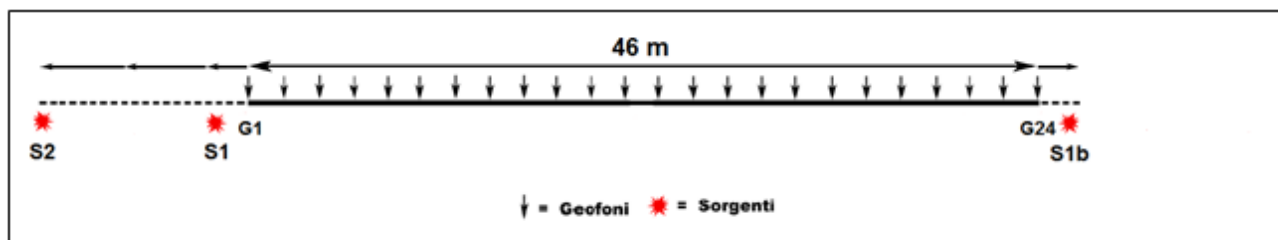


Fig. 7 - Geometria di acquisizione massima per le onde superficiali utilizzando 12 geofoni e  $dx=2$ .

S1: a distanza adeguata da G1.

S2: a distanza  $D/2$  da G1 pari alla semi lunghezza dell'array di geofoni (D).

S1b: a distanza da G12 speculare rispetto a S1

La scelta di utilizzare due scoppi S1 e S2 di cui quest'ultimo a distanza, ove possibile, pari a  $D/2$  è stata fatta per i seguenti motivi:

- Scoppi posti a distanza considerevole permettono di mettere in evidenza tutto il range di frequenze ottenibile dalla sorgente utilizzata, dalle più alte (S1) a quelle più basse (S2);
- I modi superiori, se presenti, sono maggiormente individuabili e discriminabili da quello fondamentale, il che in caso contrario porterebbe ad una interpretazione errata a seguito della fase di inversione dei dati;
- La similarità tra i due spettri F-V ricavabili dai due scoppi permette di stabilire se siamo in condizione di piani paralleli e/o assenza di variazioni laterali significative;
- In aggiunta al punto precedente, per verificare il parallelismo e l'omogeneità degli strati, in caso non ci sia lo spazio necessario per lo scoppio S2, eventualmente, ove possibile, è buona norma ricorrere ad uno scoppio (S1b) posto nella parte opposta dello stendimento in posizione geometricamente speculare allo scoppio S1.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione si passa alla fase di montaggio della strumentazione in campagna.

I cavi sismici vengono stesi lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La profondità di investigazione è, in linea teorica come descritto precedentemente, direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

---

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

#### **4.2 – ELABORAZIONE (PROCESSING) E INVERSIONE DEI DATI MASW**

L'analisi della dispersione delle onde superficiali (qualsiasi tipo esse siano) al fine di determinare il profilo delle Vs di un determinato sito è composta da due fasi fondamentali:

1 – Determinazione dello spettro di velocità (generalmente nel dominio  $f - v$ ) dal quale vengono determinate le caratteristiche delle onde superficiali quindi le curve di dispersione.

2 – l'inversione, ovvero il passaggio dalle curve di dispersione al modello di terreno, dei diversi modi precedentemente individuati (in particolare il modo fondamentale). Una volta registrate le tracce seguendo la metodologia precedentemente descritta si ottiene il dataset dei dati nel dominio  $x - t$  ovvero spazio - tempo. E' chiaramente impossibile lavorare in questo dominio quindi si deve passare al dominio  $f - k$  (frequenze - numeri d'onda) oppure al dominio  $f - v$  (frequenze - velocità) (Fig. 8).

Alcuni punti chiave da tenere in considerazione per il controllo di qualità dei dati sono:

1 – La registrazione corretta ben visibile in tutte le tracce.

2 – Spettro di velocità chiaro ed interpretabile.

3 – Attenzione ai modi superiori se presenti.

4 – Utilizzare come modello iniziale i dati geologici e/o i dati forniti dalla sismica a rifrazione. Trattandosi infatti di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile (Foti, 2008).

5 - La corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali (Foti, 2008).

6 – In caso di incertezze legate alla NON UNIVOCITA' DELLA SOLUZIONE è necessaria quindi una taratura mediante dati diretti di esplorazione del sottosuolo.



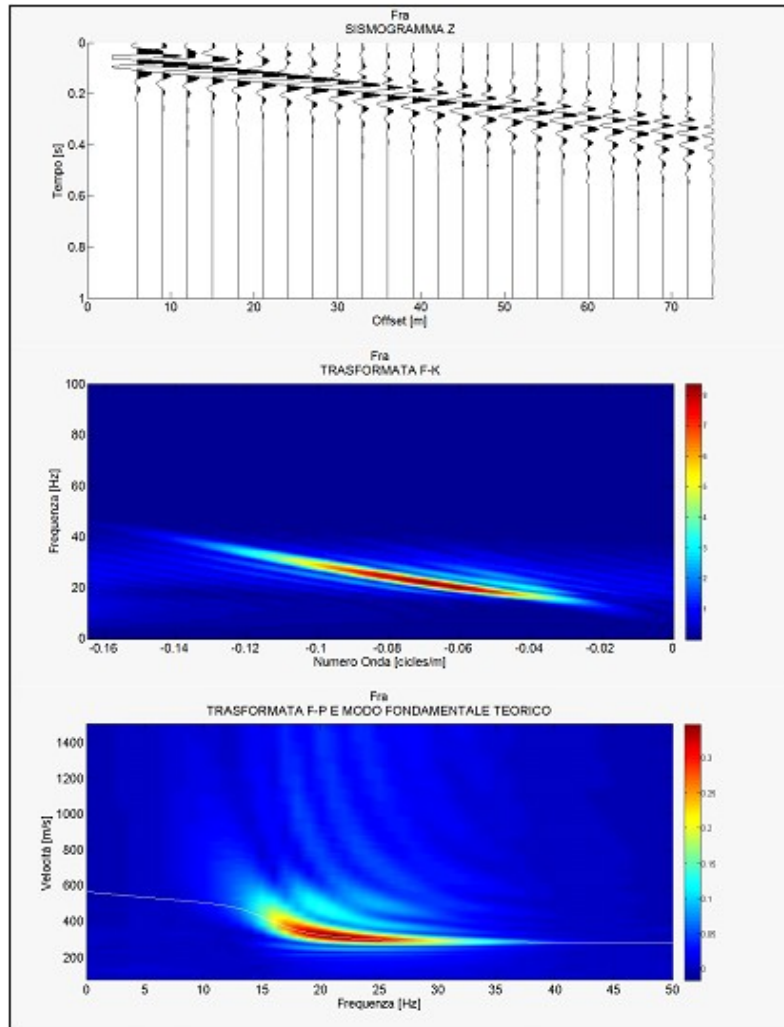


Fig. 8 - Semplice modello preso dalla letteratura composto da due strati a velocità crescente ( $V_p = 650$  e  $1400$  m/sVs =  $300$  e  $600$  m/s spessore  $h$  fino al semispazio di  $8$  m). Dall'alto al basso si può vedere il sismogramma sintetico (componente verticale), lo spettro f-k e lo spettro f-v (con modo fondamentale teorico).

Una volta calcolato lo spettro  $f-v$  è buona norma verificare la profondità massima raggiunta dall'indagine (Fig. 9) in modo da meglio vincolare il modello da utilizzare nella fase di inversione, dopo di che si entra nella parte più delicata, ovvero il picking, l'individuazione cioè dei diversi modi.

La loro individuazione è quindi soggettiva (di contro all'oggettività dello spettro calcolato) e le scelte che si fanno devono essere ponderate con cura per non inficiare in maniera determinante il processo di inversione.

E' di uso comune interpretare il modo fondamentale come quello a più alta energia.

Questo non è sempre vero. In base infatti alla complessità del sito geologico i modi superiori potrebbero essere molto più energetici o addirittura talmente energetici che nello spettro il modo fondamentale non è visibile.

---

Non bisogna in maniera categorica basarsi sul picking e inversione automatica che molti software consentono di fare.

E' necessario quindi fare riferimento a prove invasive presenti nelle vicinanze (penetrometrie, carotaggi ecc.). Più dati si hanno a disposizione e maggiore è la probabilità di ricostruire, dalla curva di dispersione, il modello di terreno più veritiero che l'ha determinata, riducendo al minimo così i problemi di non univocità.

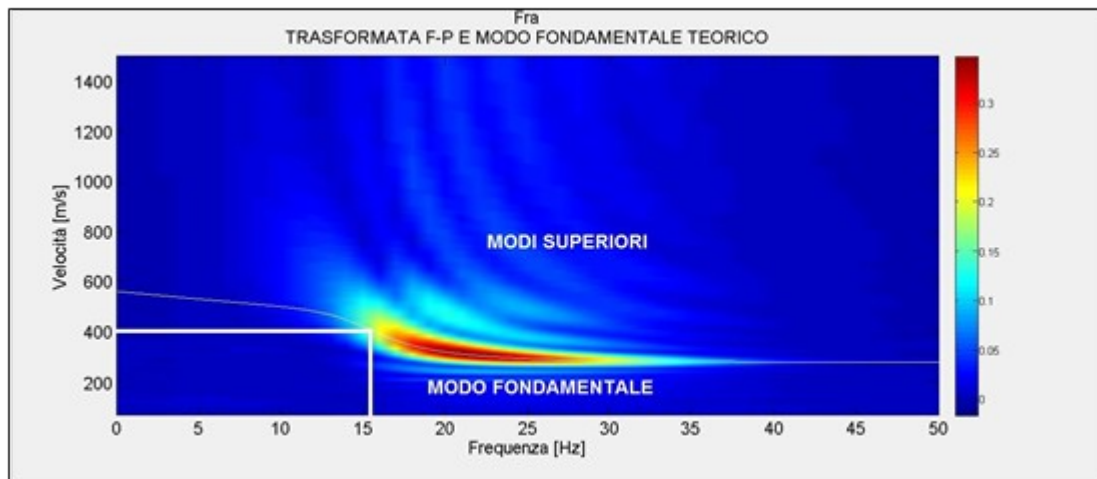


Fig. 9 - Calcolato lo spettro f-v per determinare in maniera approssimata la profondità massima raggiunta dalla prova si prendono le coordinate f-v dell'ultimo punto chiaramente visibile del modo fondamentale e si esegue la seguente formula:  $Z = v / 2f$ . In questo caso  $v = 400$  m/s,  $f = 15.5$  Hz quindi  $Z = 400 / 31 = 12.9$  m

Il metodo di prospezione **REMI** (Extended Spatial Autocorrelation Method) invece avviene tramite la registrazione dei microtremori come sorgenti sismiche con stendimenti bidimensionali e attraverso il processo di inversione della curva di dispersione effettiva (anziché modale come nel caso dell'indagine MASW).

Nel metodo REMI si registra il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente, cioè sollecitazioni di qualsiasi origine, provenienti da sorgenti ignote e isotropiche (disposte in tutte le direzioni) rispetto ad uno stendimento sismico non lineare.

In assenza di spazi sufficientemente lunghi e in presenza di ambienti urbanizzati, acquisizioni con stendimenti 2D (a "L", croci o cerchi) e di breve durata, consentono in maniera speditiva l'analisi del microtremore sismico.

L'acquisizione secondo una geometria bidimensionale risolve alcuni problemi legati alle velocità apparenti, presenti nei dati acquisiti mediante array unidirezionali (ReMi).

Uno stendimento REMI è realizzato mediante l'utilizzo della classica strumentazione per l'esecuzione di una prospezione sismica MASW con geofoni a componenti verticale da 4,5 Hz disposti secondo una geometria 2D (a "L", croci o cerchi).

---

Al contrario di ciò che avviene con le tecniche attive, il metodo REMI, consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con una sorgente attiva e l'acquisizione può essere eseguita, al limite, anche da un solo operatore.

Con la metodologia REMI viene studiata la direzionalità del microtremore e valutata la velocità di fase alle diverse frequenze.

Il metodo consente di definire la cosiddetta **curva di dispersione effettiva**, che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali "pesate" in base al loro specifico contenuto energetico nel sito.

Nel caso di profili normalmente dispersivi, la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale.

In altri casi, per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, la curva di dispersione effettiva risulta frutto di una combinazione dei diversi modi in funzione della relativa energia.

Un vantaggio quindi della tecnica REMI è quello di non dovere identificare (come in altre metodologie) i vari modi di vibrazione, che sono invece trattati, più semplicemente, in modo unitario.

Mediante software dedicato viene calcolata automaticamente la curva di dispersione effettiva, dalla quale può essere eseguita la **modellazione delle velocità di taglio (Vs)**.

Le analisi REMI sono mirate ed utili a definire le basse frequenze, ma non risultano altrettanto efficaci alle alte (ove invece le analisi di sismica attiva si rivelano decisamente superiori).

Per questo motivo si utilizzano tecniche passive con **analisi congiunta** con dati provenienti da sismica attiva (**REMI+MASW**) al fine di risalire ad un modello sismostratigrafico affidabile lungo tutta la profondità di indagine.

La geometria dello stendimento **MASW-REMI** utilizzata è stata di **12 geofoni** intervallati da una distanza di **5 m** (Lunghezza stendimento pari quindi a **55 m**) mentre i parametri di acquisizione sono stati settati in maniera consona a questo tipo di indagine (tempo di registrazione più lungo e bassa frequenza di campionamento).

In base alle indagini sismiche effettuata quindi, è stato possibile ricavare più sequenze sismo-stratigrafiche relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali, nei primi 30 metri di profondità ed oltre (**Vs30/Vseq**).

---

## **5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)**

Il metodo reso popolare da Nakamura nel 1989 è una valutazione di tipo sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie terrestre misurati puntualmente mediante l'utilizzo di un apposito sismometro a tre componenti (due orizzontali ortogonali tra di loro ed una verticale).

Proprio dal fatto che tale metodo si basa su di un rapporto viene anche denominato indagine HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio) o più semplicemente prova "di Nakamura".

Rumore al di sotto degli 0.5 Hz è generato prevalentemente da onde marine e perturbazioni atmosferiche mentre al di sopra degli 0.5 Hz il contributo prevalente è dato da vento, traffico veicolare e attività industriali.

Il risultato di tale misura viene mostrato in un grafico in cui il rapporto H/V (in ordinata) è messo in relazione con la frequenza (in ascissa).

Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei picchi sono le frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura.

La risonanza è un fenomeno che si viene a creare quando si hanno forti contrasti di impedenza sismica tra uno strato e il sottostante.

In caso quindi di misura effettuata al di sopra di una roccia la curva H/V non presenterà picchi significativi ma avrà un andamento piano con ampiezza pari ad 1. Maggiore quindi è il contrasto sismico e maggiore sarà la precisione della misura H/V.

Geologicamente quindi una copertura soffice al di sopra di un basamento rigido rappresenta la condizione ottimale per questa metodologia di misurazione.

In questa configurazione molto semplice è possibile quindi mettere in relazione la frequenza di risonanza (f) con la velocità media delle onde S ( $V_s$ ) e lo spessore della copertura soffice (h) mediante la seguente relazione:

$$f = V_s/4h$$

Data quindi la frequenza di risonanza calcolata tramite il metodo H/V e la velocità media delle  $V_s$  delle coperture è quindi possibile ricavare la profondità dello strato a forte impedenza sismica e quindi fare successivamente una valutazione sulla possibile amplificazione sismica del sito in esame.

E' importante però che questo metodo (data la sua natura stocastica) sia utilizzato assieme ad una conoscenza generale dell'area di studio dal punto di vista geologico ed a prove di sismica quali MASW e/o rifrazione in modo da avere una conoscenza a priori della natura del sito e della velocità delle coperture.

In assenza di qualsiasi vincolo infatti esistono infiniti modelli (cioè combinazioni  $V_s$ -H) che soddisfano la stessa curva H/V.

---

## **5.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA**

Le misure di rumore a stazione singola si effettuano mediante l'utilizzo di sismometri a tre componenti (chiamati anche tromografi) con una sensibilità tra 0.1 e 20 Hz (corrispondenti ai modi di vibrare della maggior parte delle strutture).

Per quanto riguarda l'acquisizione in campagna bisogna prestare molta cura ed attenzione al posizionamento dello strumento.

L'accoppiamento dello strumento con il terreno deve essere fatto il più solidale possibile evitando interfacce intermedie (ad esempio cemento, fondo stradale ecc.) le quali causano grossi problemi dovuti all'inversione di velocità la cui conseguenza in molti casi è il non corretto risultato della curva H/V.

Importante è la messa in bolla dello strumento, se questo non fosse verificato le misure sarebbero completamente errate. Evitare la misura in giornate particolarmente avverse dal punto di vista meteorologico.

E' sempre consigliabile posizionare lo strumento all'interno di una piccola buca nel terreno in modo da mantenerlo oltre che perfettamente solidale anche al riparo da possibili agenti di disturbo.

Dal momento che le frequenze di interesse ingegneristico non superano i 25 Hz la frequenza di campionamento non deve essere inferiore ai 50 Hz.

Particolarmente importante è la durata della registrazione. Come accennato in precedenza, la misura di rumore è un fenomeno detto stocastico quindi per avere una validità dal punto di vista statistico è necessaria una consistente quantità di dati i quali si ottengono registrando il rumore per una durata commisurata alla frequenza di risonanza di interesse.

In generale quindi per avere un dato concreto riguardante un bedrock sismico profondo (basse frequenze di risonanza) sarà necessario un tempo di registrazione più lungo rispetto ad un bedrock sismico superficiale (alte frequenze di risonanza).

L'orientamento dello strumento in via convenzionale deve essere rivolto verso il Nord geografico.

In presenza di elementi topografici o morfologici lo strumento dovrebbe essere allineato secondo gli assi di questi in modo da cogliere eventuali effetti di direttività. Quest'ultima può essere causata o da una non omogenea distribuzione delle sorgenti attorno allo strumento di misura o da cause derivanti dalla natura del sottosuolo sia per motivi topografici (misure a bordo di una scarpata ad esempio) sia per motivi stratigrafici (valli sepolte, stratificazioni inclinate ecc.). Le misure quindi in cui è presente questa problematica vanno interpretate con cautela. \_

---

## **5.2 – ANALISI DEI DATI**

Una volta registrate le serie temporali di ciascuna componente il calcolo della curva H/V avviene passando al dominio delle frequenze e facendo il rapporto tra la componente H e la componente V. La componente H è la media delle due componenti orizzontali.

Per quanto riguarda le fasi dettagliate del processing si fa riferimento alle linee guide fornite dal progetto SESAME (2004).

La fase di interpretazione successiva deve essere fatta con alcuni accorgimenti fondamentali:

- 1- La curva H/V deve essere statisticamente significativa, ovvero deve avere una deviazione standard sia in ampiezza che in frequenza ridotta. Se questo non fosse verificato, premesso che la prova è stata acquisita tenendo presente tutti gli accorgimenti descritti nel precedente paragrafo, è necessario “pulire” la curva H/V. SESAME (2004) propone la rimozione nella serie temporale di quelle finestre in cui la deviazione standard del segnale STA (media a breve termine) è maggiore della media a lungo termine (LTA). Si tratta quindi dell’eliminazione di quelle finestre in cui è evidente la presenza di segnali di disturbo (detti transienti).
- 2- La curva H/V deve essere SEMPRE osservata insieme agli spettri di ciascuna componente in modo da poter effettivamente individuare quei picchi di natura stratigrafica. In condizioni normali infatti le tre componenti hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza si ha un picco del rapporto H/V in quanto diminuisce la componente verticale determinando una forma a “occhio” o “ogiva” indice di una risonanza stratigrafica. I picchi di forma differente non sono attribuibili a cause stratigrafiche.

## **5.3 – IL PROGETTO SESAME**

Il progetto SESAME ha stabilito delle direttive per garantire la riproducibilità delle misure H/V, indispensabile per ottenere dei dati rappresentativi e poco influenzati dal contesto di misura ed ambientale.

Le direttive fornite dal progetto SESAME descrivono diversi criteri da seguire mediante i quali è possibile valutare l’attendibilità della curva H/V.

### **5.3.1 – CRITERI DI AFFIDABILITÀ DEL PICCO**

Le seguenti condizioni di affidabilità sono state stabilite grazie al progetto SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations), a seguito dei numerosi studi condotti (SESAME 2004).

La prima condizione necessaria per ritenere una curva H/V affidabile, è la sua riproducibilità nello stesso sito con altre sorgenti e tipologie di rumore ambientale, e mediante una differente selezione di finestre.

In sintesi i primi tre criteri tutti da soddisfare sono i seguenti:

1.  $f_0 > 10 / l_w$  , ovvero che alla frequenza di interesse devono trovarsi almeno 10 cicli significativi nella finestra selezionata.;  $l_w$  è la lunghezza della finestra.
2.  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$ , ossia che il numero di cicli significativi sia maggiore di 200;  $n_w$  è il numero di finestre selezionate per condurre l'analisi.
3. un basso livello di scattering tra le finestre. Deviazioni standard troppo elevate sono riportabili a situazioni di scarsa stazionarietà ed alta perturbazione del segnale, quindi ad una bassa rappresentatività. In particolare la deviazione standard deve essere minore di 2 (se  $f_0 > 0.5$ ) nell'intervallo  $0.5f_0 < f < 2f_0$  e minore di 3 (se  $f_0 < 0.5$ ) sempre nel solito intervallo.

Per quanto detto nei punti I e II quindi un picco ad 1 Hz per la sua corretta affidabilità devono esserci almeno 20 finestre di 10 s ognuna, o per un picco a 0,5 Hz, 10 finestre a 40s.

Nella tabella sottostante vengono indicati parametri di affidabilità a seconda del picco di interesse.

$f_0$ [Hz]	Minimum value for $l_w$ [s]	Minimum number of significant cycles ( $n_c$ )	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Poiché i transienti eventualmente presenti nella registrazione vanno eliminati in fase di processing, è opportuno allungare il tempo di registrazione.

La tabella sopra indicata, fornita dal progetto SESAME deve comunque essere utilizzata in maniera molto indicativa.

Nella realtà infatti bisogna tenere presente che per la registrazione corretta di un picco a basse frequenze (bedrock sismico profondo quindi) a seconda delle caratteristiche geologiche del sito sono necessari tempi di registrazione superiori (anche nell'ordine delle ore).

E' quindi buona norma prima di effettuare misure di rumore conoscere la geologia della zona da investigare e fare riferimento a tutte le prove pregresse effettuate nel sito.

### **5.3.2 – CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO**

Nel migliore dei casi, la curva mostra un singolo picco 'netto', definibile in termini di ampiezza, deviazione standard relativa ed assoluta. In termini di ampiezza deve soddisfare le seguenti condizioni:

1. Esistenza di una frequenza  $f^-$  tra  $f_0/4$  ed  $f_0$  tale che  $A_0 / A_{H/V}(f^-) > 2$ ; dove  $A_0$  rappresenta l'ampiezza media del picco e  $A_{H/V}(f^-)$  l'ampiezza della frequenza  $f^-$ .
2. Esistenza di un'altra frequenza  $f^+$ , compresa tra  $f_0$  e  $4f_0$ , tale che  $A_0 / A_{H/V}(f^+) > 2$ ;
3.  $A_0 > 2$ .

Viceversa le condizioni di **stabilità** sono che:

1. Il picco deve apparire alla stessa frequenza sulle curve H/V corrispondenti alla somma e differenza della deviazione standard, con una percentuale del 5%;
2. La deviazione standard del picco in frequenza  $\sigma_f$ , deve essere inferiore ad una soglia massima  $\varepsilon(f_0)$ ;
3. La deviazione standard del picco in ampiezza  $\sigma_A(f_0)$ , deve essere inferiore ad una soglia massima  $\theta(f_0)$ ; Il valore  $\sigma_A(f_0)$  rappresenta il numero con cui moltiplicare e dividere la curva media H/V per ottenere le curve relative alla deviazione standard.

Di seguito sono inseriti i valori massimi accettabili per le deviazioni standard a diversi range di frequenza del picco.

Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Quindi se la curva H/V per un dato sito soddisfa almeno 5 di queste 6 condizioni, il valore di  $f_0$  è da considerarsi rappresentativo della frequenza fondamentale; se l'ampiezza di picco  $A_0$  è

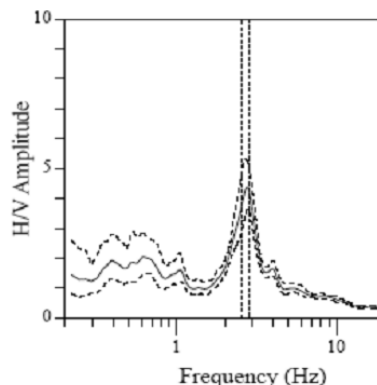


maggiore di 4 o 5, si può affermare con certezza che esiste una discontinuità ed un contrasto di velocità ad una qualche profondità.

Bisogna infine verificare che:

1. la frequenza  $f_0$  è consistente con la frequenza di cut-off del sensore e con la sensitività;
2. il picco non ha origine industriale.

In basso si riporta un esempio di curva H/V, con picco ‘netto’ che soddisfa le condizioni di stabilità.



Window length $t_w$ [s]	Number of windows $n_w$	Number of significant cycles $n_c$	Frequency statistics from individual windows			
			$f_0$ [Hz]	$\sigma_f$ [Hz]	$A_0$	$\sigma_{A(f_0)}$
41	14	1561	2.72	0.11	4.4	1.2

Fig. 10 - Esempio di picco netto da SESAME (2004)

Non sempre la curva H/V mostra dei picchi netti. Talora sono poco chiari o allargati, e non soddisfano le condizioni sopra citate.

In questi casi sono imputabili a diversi fattori quali: un contrasto di impedenza moderato o alla bassa frequenza delle vibrazioni ambientali; condizioni di misura ventose e perturbate; un disaccoppiamento suolo-sensore; disturbi a bassa frequenza (camion, macchine a grande distanza); parametri di smoothing inadeguati; sensore a frequenza e sensitività troppo basse.

### **5.3.3 – INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME**

A questo punto verificati i punti sopra elencati occorre allegare a tali risultati altre informazioni non descritte nel progetto SESAME per dare maggiore stabilità all'indagine.

Di seguito l'elenco completo:

1. Stazionarietà temporale dei rapporti spettrali.

In pratica una volta effettuata la registrazione, il dato viene diviso dall'operatore in finestre temporali, per ciascuna di esse il software calcola la curva H/V e come output restituisce un diagramma FT in cui al variare del tempo viene mostrato l'andamento del segnale.

---

Il segnale è stazionario se la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura.

2. Direttività del segnale (azimuth).

Il software calcola una volta selezionate le finestre la direttività del segnale ovvero la sua provenienza rispetto all'orientazione degli assi dei sensori dello strumento (di norma la componente orizzontale NS deve essere rivolta verso Nord).

La direttività corretta si ha quando il picco H/V (nel caso sia presente uno solo altrimenti tutti i picchi) è presente da 0 a 180° (da 180° a 360° è superfluo poiché la distribuzione del segnale è speculare) ovvero le sorgenti intorno allo strumento sono uniformi in tutte le direzioni.

Viceversa in caso di segnali direttivi in un range ridotto di frequenze le cause possono essere varie tra cui sorgenti non uniformi (es. rumori industriali).

In questo caso il risultato della registrazione non è attendibile. le variazioni azimuthali di ampiezza non devono superare il 30% del massimo.

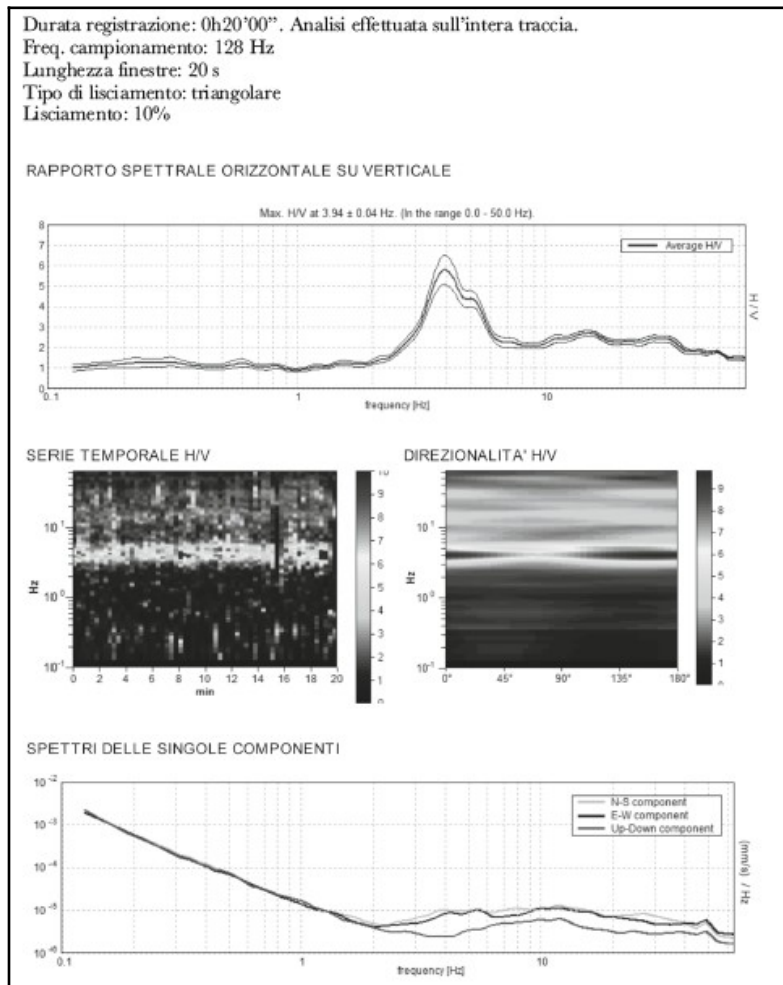
Questo deriva dal fatto che, nonostante la natura stocastica del fenomeno, in presenza di un campo d'onda diffuso, ovvero caratterizzato da sorgenti posizionate in maniera statisticamente omogenea attorno al sito di misura che si attivano in maniera non coordinata, l'andamento medio del segnale risulterà statisticamente indipendente dalla loro natura e posizione e sarà condizionato soprattutto dalla struttura del sottosuolo.

3. Si deve inoltre allegare l'andamento complessivo del rapporto H/V e gli spettri di ciascuna componente.

Ciò è utile per verificare che in corrispondenza del picco ci sia un effettivo abbassamento della componente verticale rispetto alle componenti orizzontali (plausibilità fisica).

Inoltre mediante il confronto dei vari spettri è possibile verificare se lo strumento è bene in bolla e l'eventuale presenza di inversioni di velocità caratterizzate contrariamente da quanto detto in precedenza da un abbassamento delle componenti orizzontali rispetto alla componente verticale.

4. Bisogna verificare l'assenza di rumore elettromagnetico caratterizzato da una forte direttività e da picchi molto stretti nella curva H/V.



**Picco H/V a 3.9 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).**

Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	3.94 > 0.50	OK	
$n_s(f_0) > 200$	4725.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 190	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste $f^*$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste $f^*$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	5.79 > 2	OK	
$f_{scissa} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00462  < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \sigma(f_0)$	$0.01818 < 0.19688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < 0.7f_0$	$0.3534 < 1.58$	OK	

Fig. 11 - Esempio di acquisizione corretta e presentazione dei risultati (D.Albarello,S.Castellaro, 2011)

#### 5.4 – VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLE MISURE HVSR

E' proposta, quale metodo di valutazione della qualità tecnica delle misure HVSR acquisite, la classificazione proposta da Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro,2011.

---

L'obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati.

La classificazione di Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro, 2011 si divide in 3 classi principali: Classe A, Classe B e Classe C.

**Classe A:** H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola.

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (stazionarietà)

2. le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (isotropia)

3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (assenza di disturbi)

4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (plausibilità fisica)

5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (robustezza statistica)

6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (durata)

ECCEZIONE per la Classe A: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con ampiezza circa pari a 1, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile.

**Classe B:** curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE per la Classe A.

**Classe C:** curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura

2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse.

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia: Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: possibile risonanza Tipo 2. Non presenta picchi "chiari" nell'intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza

---

## **5.5 – CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

Le misure di rumore HVSR sono state tutte registrate mediante l'utilizzo del tromografo *THEREMINO*, costituito da geofoni con frequenza di 4.5 Hz

La sua particolare forma e utilizzo è il risultato di alcune considerazioni sperimentali e non per motivi estetici o di designer:

- 1- Forma circolare per avere la minima resistenza al vento;
- 2- Cupola emisferica ribassata per avere la minima resistenza al vento;
- 3- Baricentro molto ribassato per avere la massima stabilità;
- 4- Peso aumentato da una zavorra in piombo;
- 5- Diametro sufficientemente largo per avere una maggiore stabilità;
- 6- Materiale in policarbonato per isolare acusticamente i geofoni dai rumori antropici ed ambientali;
- 7- I cavi non devono essere posizionati verticalmente rispetto allo strumento perché causano vibrazioni dovute al vento, il cavo ha l'effetto "bandiera" generando frequenze orizzontali che non hanno nulla a che fare con i microtremori;
- 8- Aumento della larghezza della base di appoggio, in questo modo i tre puntali che poggiano sul terreno aumentano la stabilità dello strumento e garantiscono una riduzione della rumorosità strumentale indotta da vento e rumori antropici;
- 9- Distanza identica tra i vari puntali, in questo modo si ha una eguale distribuzione a 360° delle vibrazioni indotte dal terreno;
- 10- Con il piombo di zavorra si è aumentata la pressione sul terreno evitando così saltellamenti verticali e garantendo una maggiore aderenza e continuità tra terreno e strumento;
- 11- La zavorra in piombo posizionata nella parte medio bassa della piastra e l'alleggerimento della cupola hanno spostato il baricentro strumentale a pochi cm dal piano di appoggio sul terreno, ciò va a favore della stabilità;
- 12- La forma rotondeggiante della piastra e la forma emisferica della cupola permette di avere un alto grado di permeabilità al vento, possibile affondare la piastra di 4- 5 cm nel terreno stirpando la cortina erbosa superficiale, in questo modo dal piano si campagna spunta solo la cupola riducendo ulteriormente l'effetto vento;
- 13- Isolamento acustico del geofono grazie allo spessore della cupola, in questo modo si riduce l'effetto "microfono" dei geofoni che trasformano i rumori acustici in fastidiosi disturbi e rumori random;
- 14- Spessori centimetrici delle pareti dell'ubo per evitare vibrazioni dannose dovute a spessori millimetrici dei contenitori spesso in plastica della scatola utilizzata;

- 
- 15- Minima superficie laterale per ridurre l'impatto con il vento;
  - 16- La forma tondeggiante e emisferica della piastra e della cupola permette di avere la medesima disposta al vento in tutti i 360 gradi;
  - 17- Contenitore basso e largo, e pesante al contrario di molti strumenti stretti alti e leggeri con pareti di lamierino sottile (vere casse acustiche), il contrario di come dovrebbero essere;
  - 18- Molta cura nel posizionamento all'interno dello strumento dell'elettronica e dei geofoni, riduzione al massimo di componenti inutili che hanno lo scopo di sporcare il segnale e una cura per schermare il segnale da inquinamento elettromagnetico.

---

**INDAGINE SISMICHE PETROGNANO**









**Acquisizione punto sismico congiunto MASW-REMI-HVSR**

---

## **7 = BIBLIOGRAFIA**

C. Park, R. Miller, J. Xia. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808, 1999.

C. Park, R. Miller, J. Xia and J. Ivanov. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) – active and passive methods, *The Leading Edge* (January 2007).

M. Cercato. Addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion, *Geophysical Prospecting*, 00, 1-21, 2008.

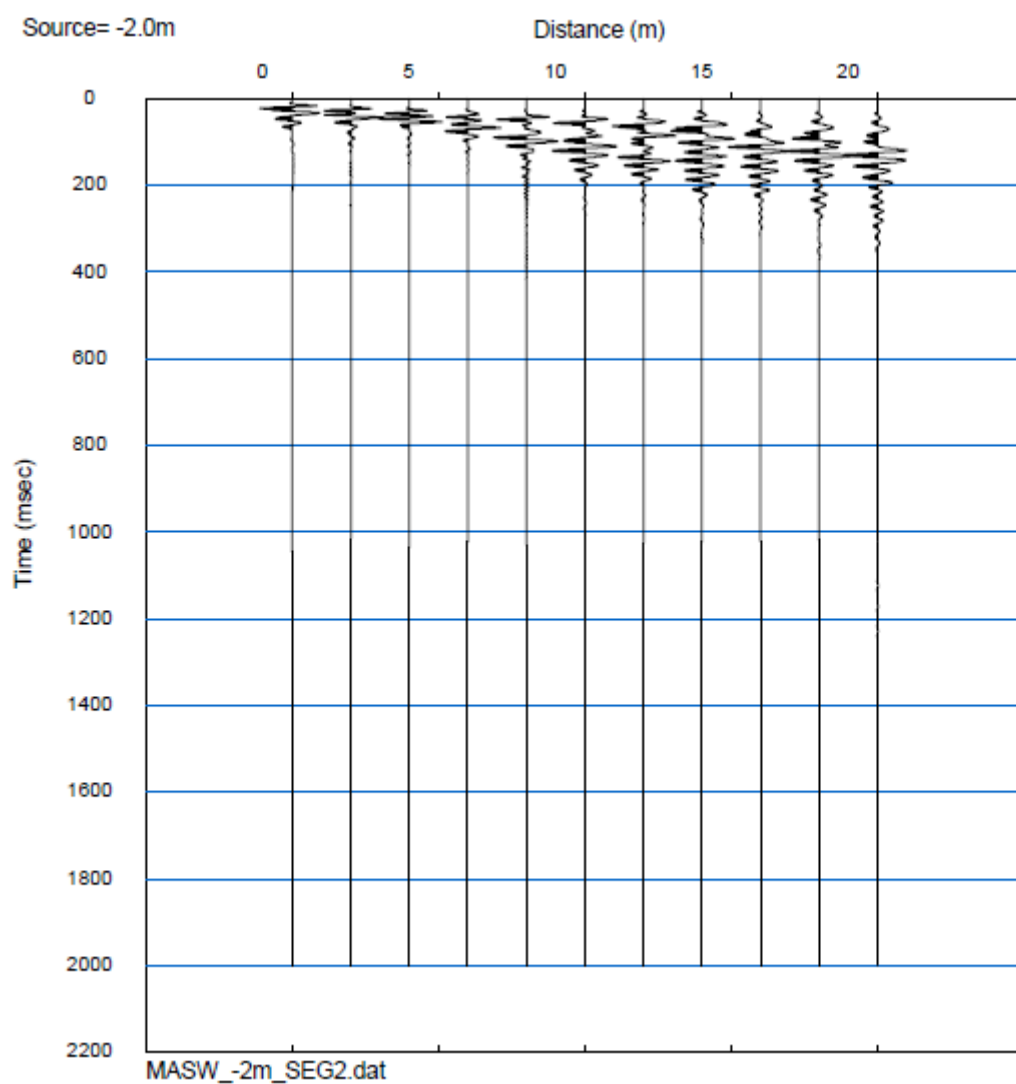
S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva. Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva, 2008.

D. Albarello, S. Castellaro. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola *Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n. 2 – 2011*.

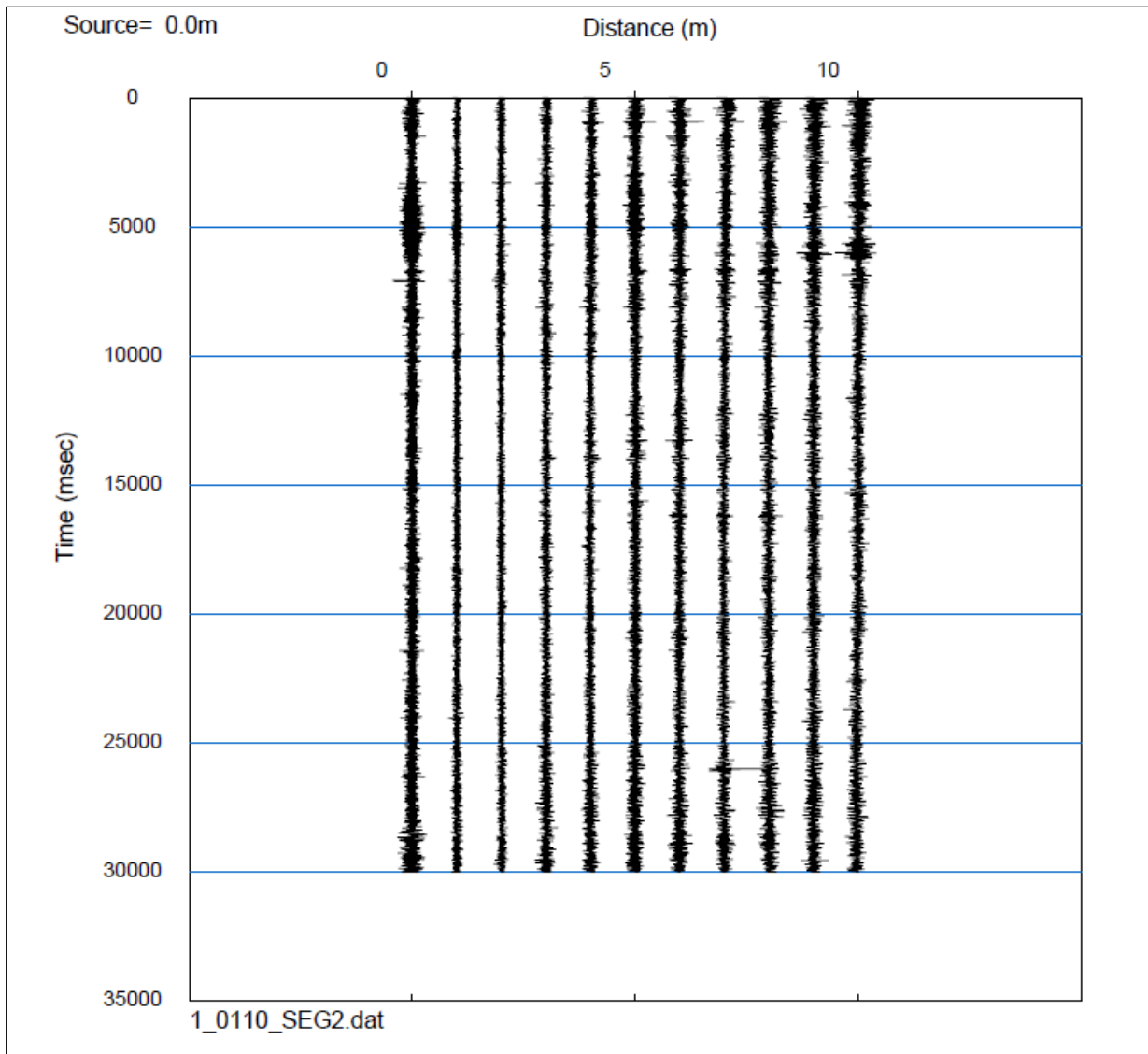
M. Bour\*, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation (1998).

SESAME European research project. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation (2004).

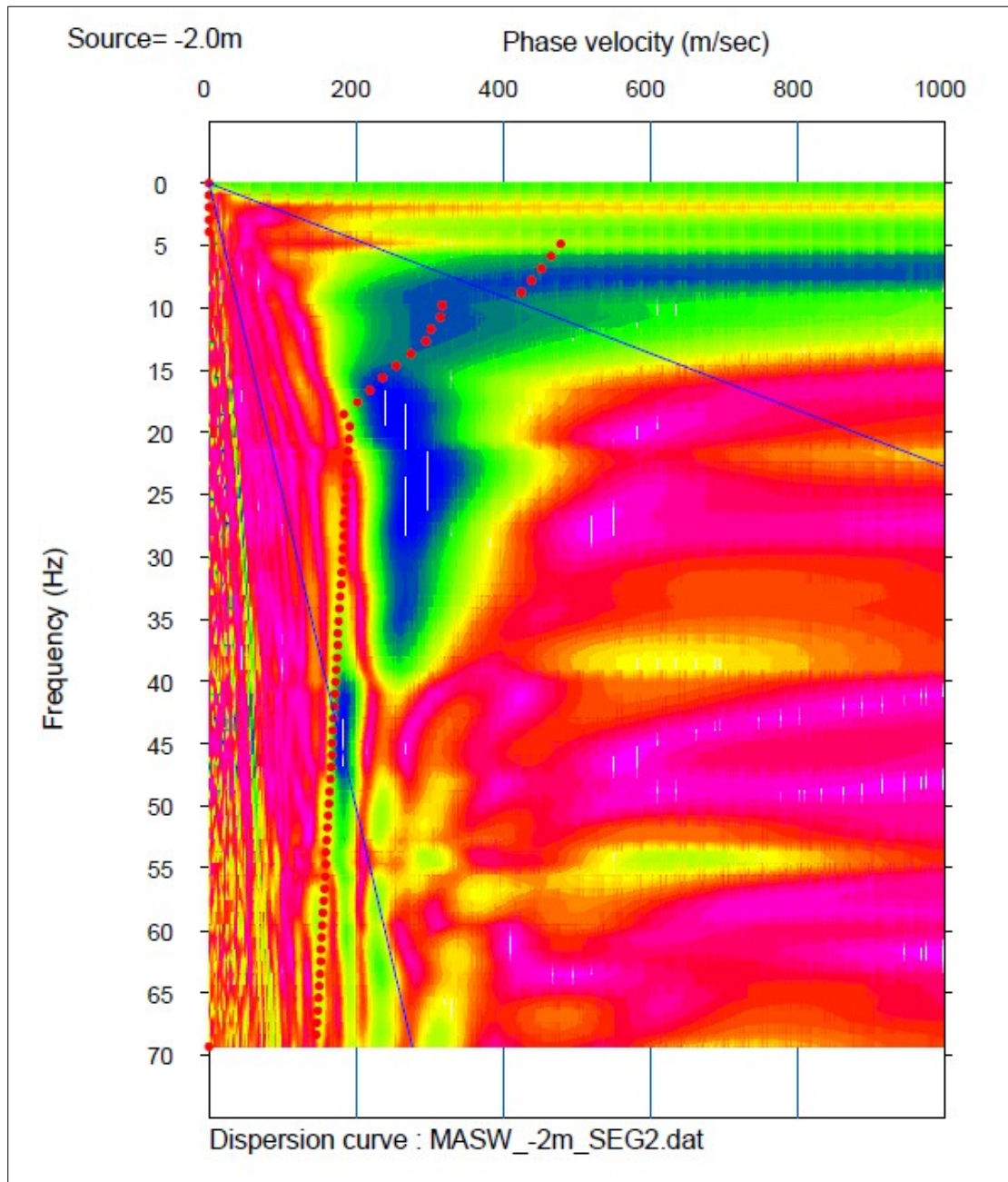
**ALLEGATO 1 – RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE MASW-REMI-HVSR**



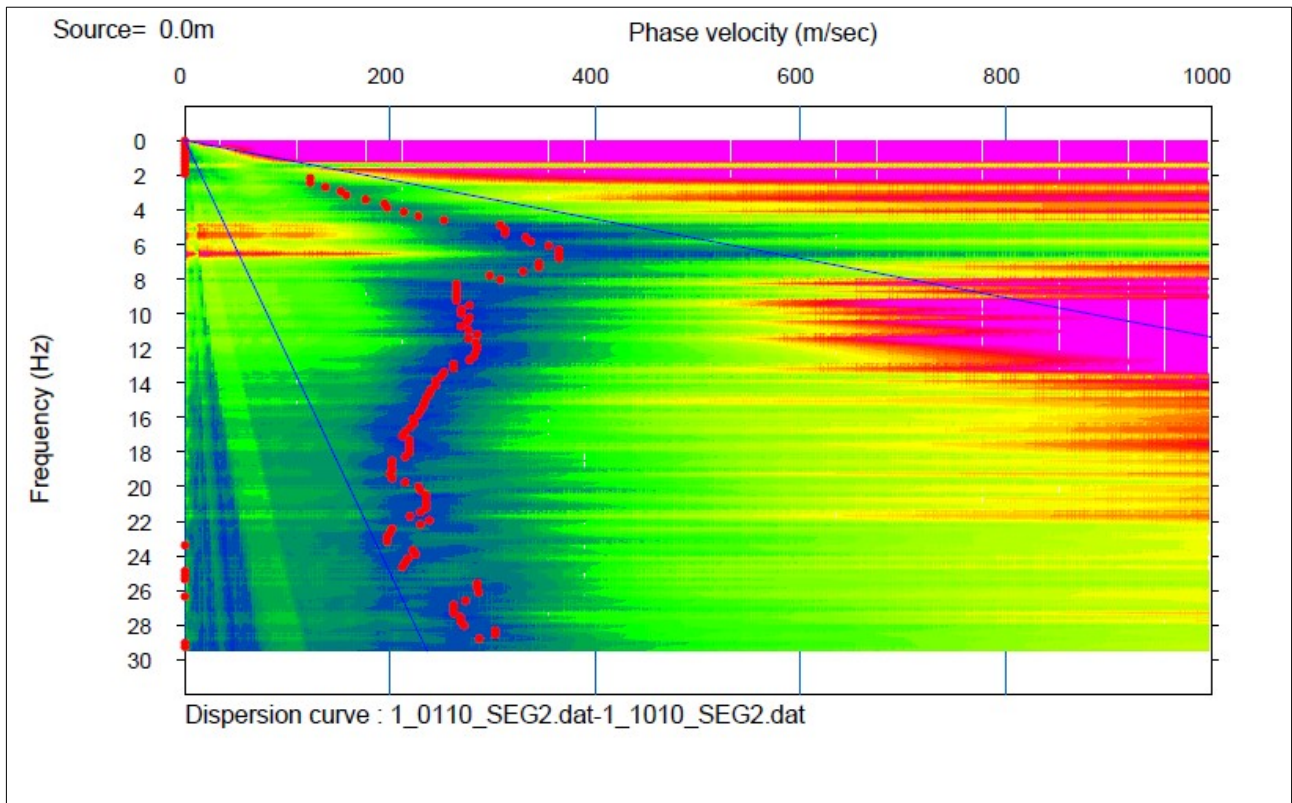
**Sismogramma MASW**



Sismogramma REMI

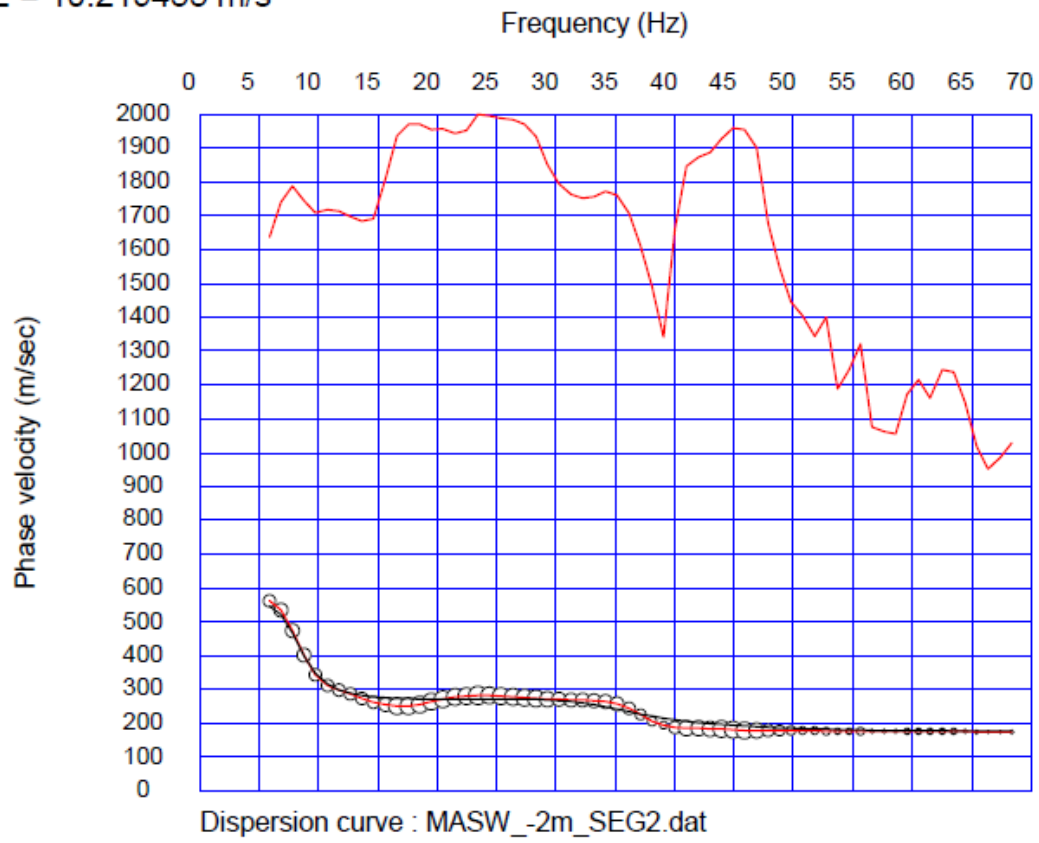


**Curva di dispersione MASW**



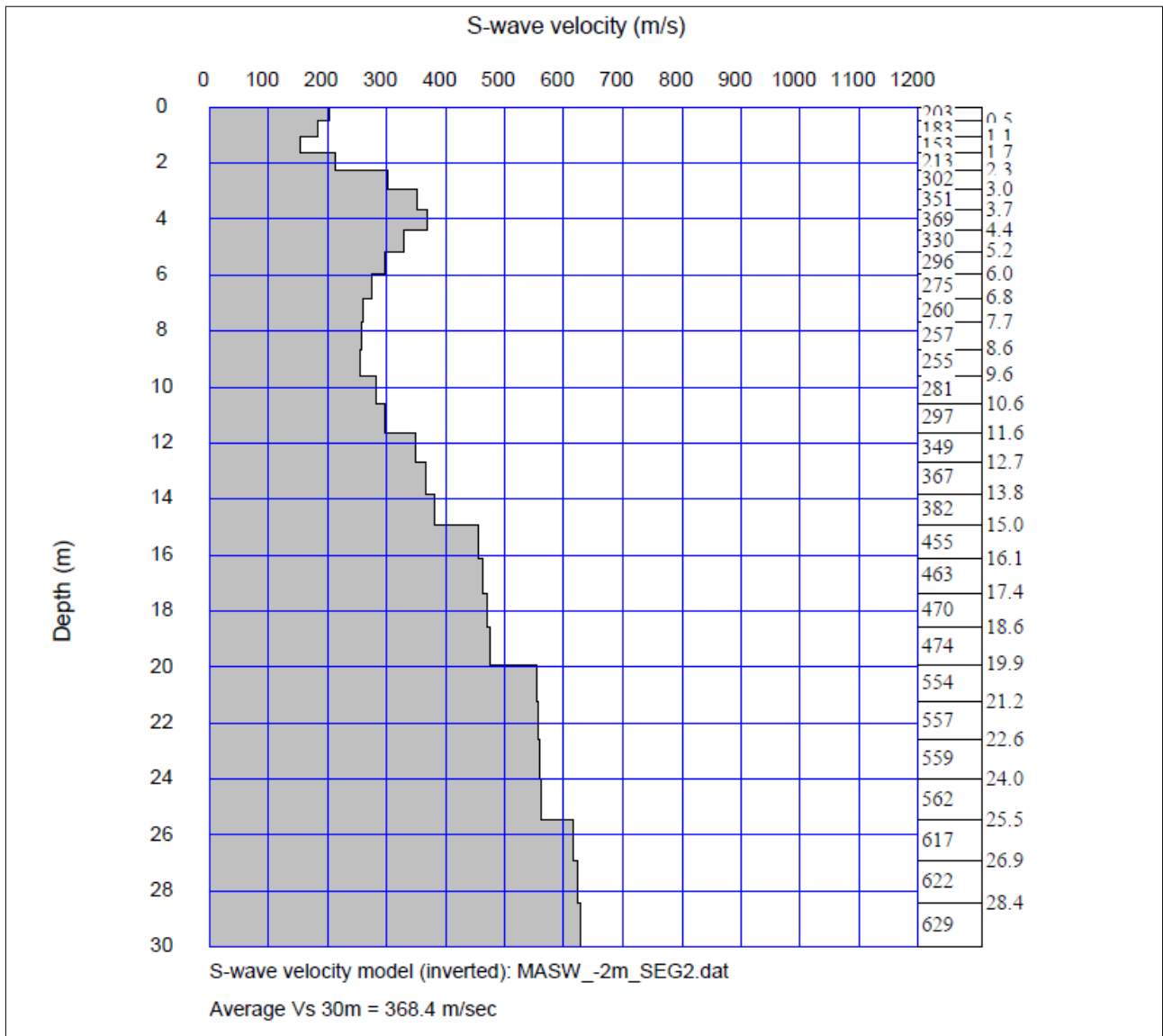
**Curva di dispersione REMI**

RMSE = 10.219455 m/s



**Curva Teorica Sperimentale**





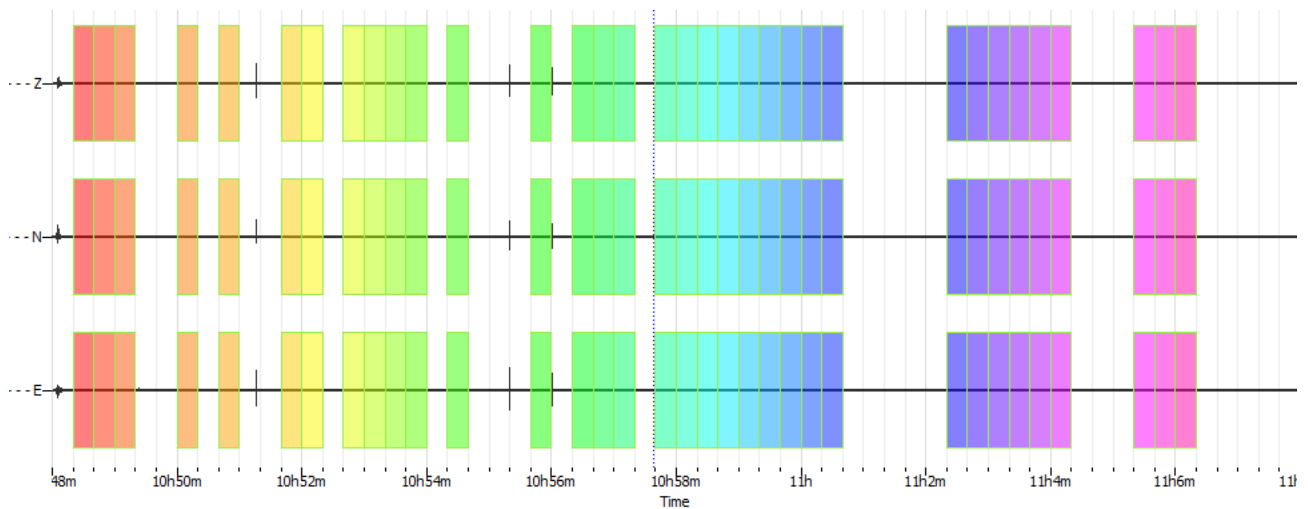
**Profilo di Velocita' Vs**

**Classe di Sottosuole : Categoria B**

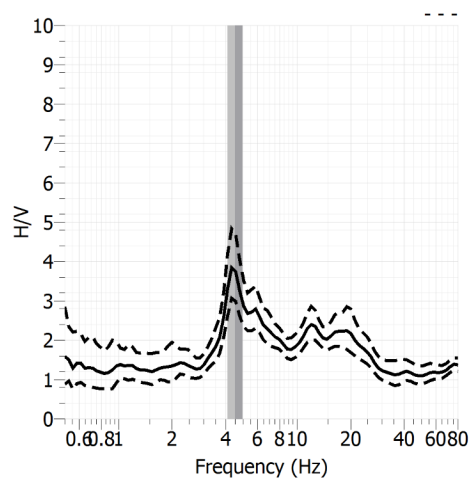
<b>Stazione</b>	1	
<b>Strumento</b>	Theremino	
<b>Data acquisizione</b>	Settembre 2022	
<b>Durata registrazione</b>	20 minuti	
<b>Freq. Campionamento</b>	500 Hz	
<b>Lunghezza finestre</b>	20 s	
<b>Numero di finestre analizzate</b>	34 (52% del tracciato)	
<b>Tipo di lisciamento</b>	Konno & Ohmachi	
<b>Lisciamento</b>	40	
<b>Orientamento strumentazione</b>	0° N	
<b>Terreno di misura</b>	Suolo naturale	
<b>Meteo</b>	Sereno	

<b>Frequenza del picco H/V</b>	<b>4.51 Hz</b>
<b>Ampiezza Media della frequenza</b>	<b>3.75</b>

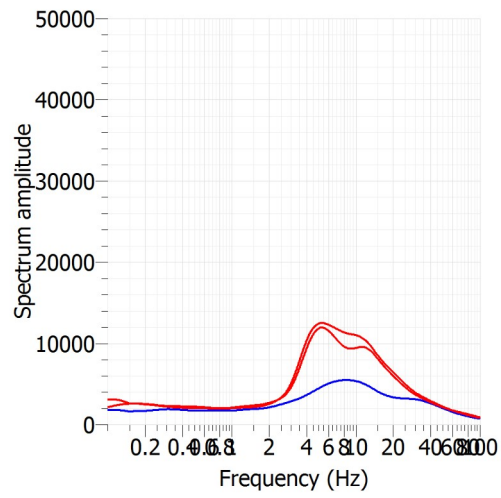
### ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



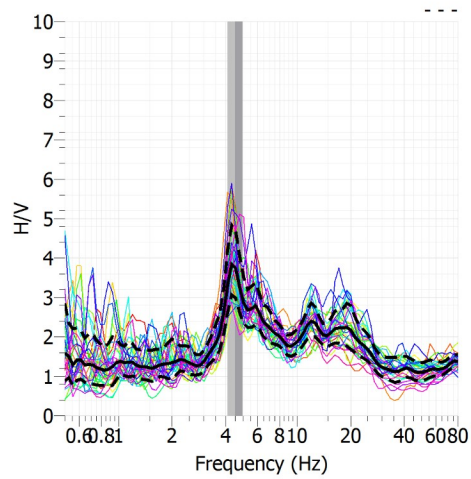
### RAPPORTO SPETTRALE H/V



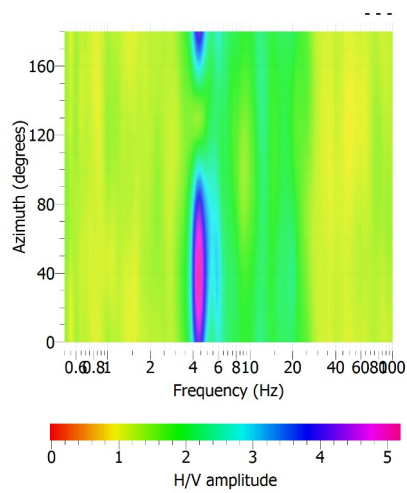
## SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



## SERIE TEMPORALE H/V



## DIREZIONALITA' H/V



### CRITERI SESAME

Window length $l_w$ [s]	Number of windows $n_w$	Number of significant cycles $n_c$	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			$f_0$ [Hz]	$\sigma_f$ [Hz]	$A_0$	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	34	3071	4.517	0.44	3.75	1.25	MODERATO

Criteri per una curva H/V affidabile					
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]					
$f_0 > 10/Lw$	4.517	>	0.500	OK	
$n_c(f_0) > 200$	3071	>	200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 28			OK	
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$				OK	
Criteri per un picco H/V chiaro					
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]					
Amplitude conditions	Esiste $f$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f) < A_0/2$			OK	
	Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$			OK	
	$A_0 > 2$	3.7529	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$			OK	
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.4395	>	0.2258	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.2539	<	1.5800	OK

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
<b>DURATA</b>	Durata minima registrazione 20 minuti	<b>SI</b>
<b>STAZIONARIETA'</b>	% ( $\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	<b>SI</b>
<b>ISOTROPIA</b>	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	<b>SI</b>
<b>ASSENZA DISTURBI</b>	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	<b>SI</b>
<b>PLAUSIBILITA' FISICA</b>	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	<b>SI</b>
<b>ROBUSTEZZA STATISTICA</b>	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	<b>SI</b>

CLASSE A1

Non ci sono picchi HVSR significativi nel range di frequenze 0.5-20 Hz

# TAV.01 - Ubicazione indagini Petrognano San Godenzo Firenze

## Legenda

Esecutori indagini geofisiche:  
Dott. Geol. Francesco Puccetti  
Dott. Geol. Cristian Pieroni



Misura di Microtremore a stazione singola (HVSR)



MASW- REMI

Scala 1:1.000

