

**DIEGO
SAMMARTINO**

CN = SAMMARTINO
DIEGO
C = IT

COMUNE DI CINISI
PROVINCIA DI PALERMO

OGGETTO: VARIANTE ALLO STRUMENTO URBANISTICO COMUNALE PER LA RITIPIZZAZIONE DELL'AREA SITA IN CONTRADA MAGAGGIARI/IAPICUZZI, SEGNATA AL N.C.T. DEL COMUNE DI CINISI AL FOGLIO DI MAPPA 10 PARTICELLA 1753, PER LA QUALE SONO DECADUTI I VINCOLI PREORDINATI ALL'ESPROPRIO GRAVANTI SULL'AREA MEDESIMA GIÀ IMPOSTI CON D. DIR. 1466/DRU DEL 20.12.2006.

VISTI ED APPROVAZIONI

RELAZIONE GEOLOGICA

Il Committente
Bommarito Salvatore

Di Maggio Rosa

Il Geologo
Dott.
Diego Sammartino

PREMESSA

Lo scrivente, per conto dei sig.ri Bommarito Salvatore e Di Maggio Rosa, ha condotto uno studio geologico a supporto di: VARIANTE ALLO STRUMENTO URBANISTICO COMUNALE PER LA RITIPIZZAZIONE DELL'AREA SITA IN CONTRADA MAGAGGIARI/IAPICUZZI, SEGNATA AL N.C.T. DEL COMUNE DI CINISI AL FOGLIO DI MAPPA 10 PARTICELLA 1753, PER LA QUALE SONO DECADUTI I VINCOLI PREORDINATI ALL'ESPROPRIO GRAVANTI SULL'AREA MEDESIMA GIÀ IMPOSTI CON D. DIR. 1466/DRU DEL 20.12.2006

Pertanto è stato effettuato un attento rilevamento geologico, accompagnato da una critica considerazione di lavori bibliografici, svolti precedentemente nella medesima zona, dell'area di interesse, a O del centro abitato; ciò al fine di valutare al meglio le caratteristiche morfologiche, geologiche, strutturali, idrologiche dei terreni oggetto dello studio.

Per giungere a risultati più attendibili si è cercato di estendere l'indagine anche su un'area più estesa circostante quella di maggiore interesse; per effettuare il lavoro si è realizzato il rilevamento di superficie; in tal modo si è pervenuti ad un'attenta e scrupolosa ricostruzione geologica e strutturale di superficie, per pervenire a quella dell'immediato sottosuolo.

Lo studio è stato redatto in ottemperanza alla circolare n° 3 DRA - 20/06/2014; ed è stato condotto attraverso:

- una verifica di compatibilità del sito di cui in oggetto con il Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (PAI) della Regione Siciliana;
- un'accurata analisi della documentazione geologica esistente (Carta dei Monti di Palermo e studi precedenti e successivi);
- un dettagliato rilevamento geologico di superficie, per pervenire a quella dell'immediato sottosuolo su base cartografica I.G.M. a scala 1:25.000, su C.T.R. a scala 10.000 e su cartografia a scala 1:2.000, opportunamente esteso ad un intorno significativo dell'area in esame e supportato dalla visione diretta dei terreni affioranti in prossimità di spaccati naturali e/o sbancamenti artificiali esistenti nelle vicinanze;
- l'esecuzione di n° 3 indagini sismiche passive del tipo HVSR con idonea strumentazione (Tromino).

Dalla raccolta e dall'elaborazione dei dati acquisiti, si forniscono le seguenti informazioni:

- inquadramento dell'area nel contesto geologico-strutturale e definizione della natura geolitologica e delle caratteristiche litostratigrafiche dei terreni affioranti e di quelli posti alle modeste profondità rispetto alle opere da realizzare;
- descrizione della zona dal punto di vista geomorfologico con l'identificazione della morfologia del terreno in relazione alla struttura geologica, con particolare riferimento alle eventuali situazioni dinamiche;
- individuazione delle caratteristiche idrogeologiche dei terreni affioranti e descrizione dello schema di circolazione idrica superficiale dell'area con riferimento a quella profonda;
- definizione delle principali caratteristiche fisiche e dei parametri geotecnici dei terreni affioranti nell'area

Alla relazione si allegano i seguenti elaborati:

- Stralcio topografico in scala 1:25.000 con ubicazione del sito
- immagine satellitare
- Stralcio topografico in scala 1:10.000 con ubicazione del sito
- Stralcio catastale in scala 1:2.000 con ubicazione del sito
- Stralci del P.A.I.
- Carta geomorfologica in scala 1:10.000
- Carta geologica in scala 1:10.000
- Carta geologica e geomorfologica in scala 1:2.000
- Carta idrogeologica in scala 1:10.000
- Carta indagini integrative in scala 1:2.000
- Carta litotecnica in scala 1:2.000
- Carta della pericolosità sismica e geologica in scala 1:2.000
- Carta delle prescrizioni ed indicazioni esecutive in scala 1:2.000
- Sezioni sismostratigrafiche in scala 1:200
- Allegato indagini sismiche

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Lo studio geologico è stato redatto in ottemperanza ai seguenti riferimenti normativi:

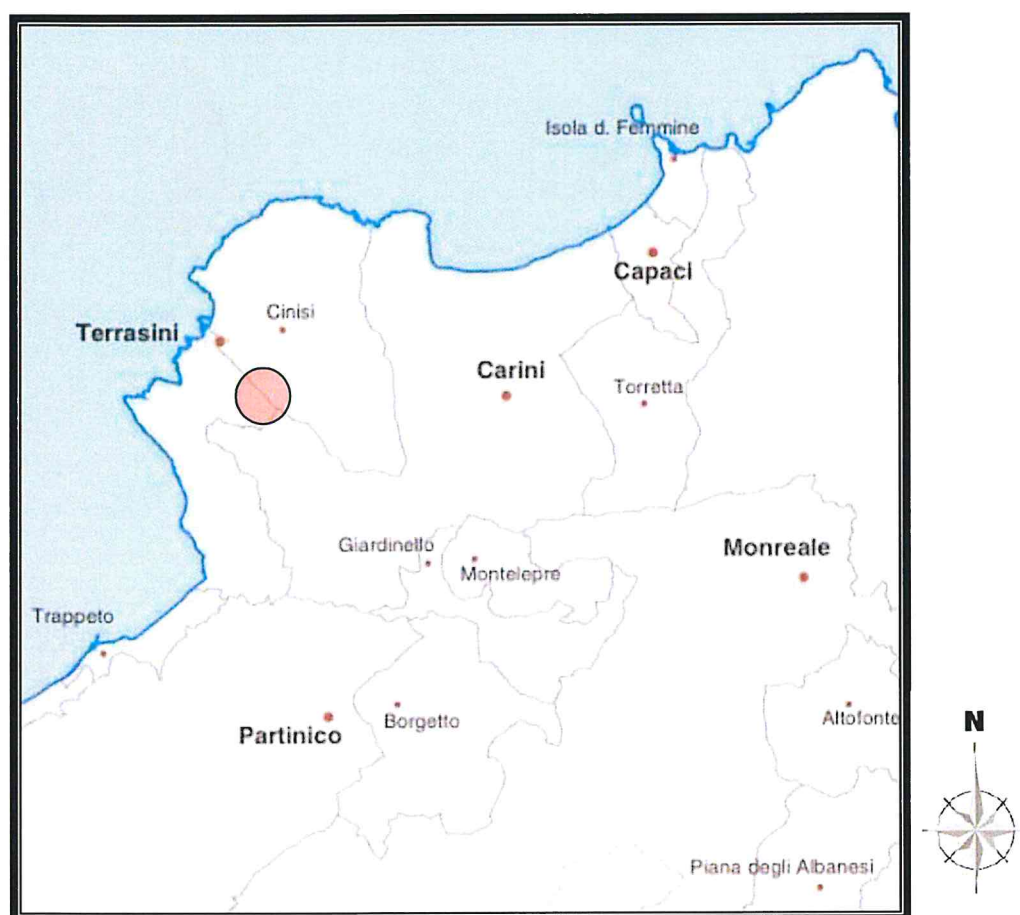
- Legge 13 agosto 2020, n. 19 “Norme per il governo del territorio”
- Circolare Assessoriale A.R.T.A. Sicilia Prot. n. 28807 del 20.06.2014, riguardante gli “Studi geologici per la redazione di strumenti urbanistici”, che ha abrogato e sostituito le circolari 14 gennaio 2014 prot. n. 1588 (pubblicata nella G.U.R.S. n. 5 del 31.01.2014), 15 ottobre 2012, prot. n. 57027 (pubblicata sulla G.U.R.S. in data 2.12.2012) e n.2222/95 (pubblicata sulla G.U.R.S. in data 29.04.95);
- Legge 2 febbraio 1974, n. 64 (art. 13). Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche. Parere delle sezioni a competenza statale degli uffici del Genio Civile sugli strumenti urbanistici.
- Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 per l'individuazione delle categorie di suolo di fondazione con l'utilizzo di opportune indagini sismiche e meccaniche secondo quanto previsto dal paragrafo 3.2.2. del suddetto decreto.
- D.M. LL.PP. del 11/03/1988. Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- D.M. LL.PP. del 14/02/1992. Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- D.M. 9 Gennaio 1996. Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche D.M. 16 Gennaio 1996. Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi
- Circolare Ministero LL.PP. 15 Ottobre 1996 N. 252 AA.GG./S.T.C.. Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 Gennaio 1996
- Circolare Ministero LL.PP. 10 Aprile 1997 N. 65/AA.GG.. Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996
- Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20.3.2003. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative

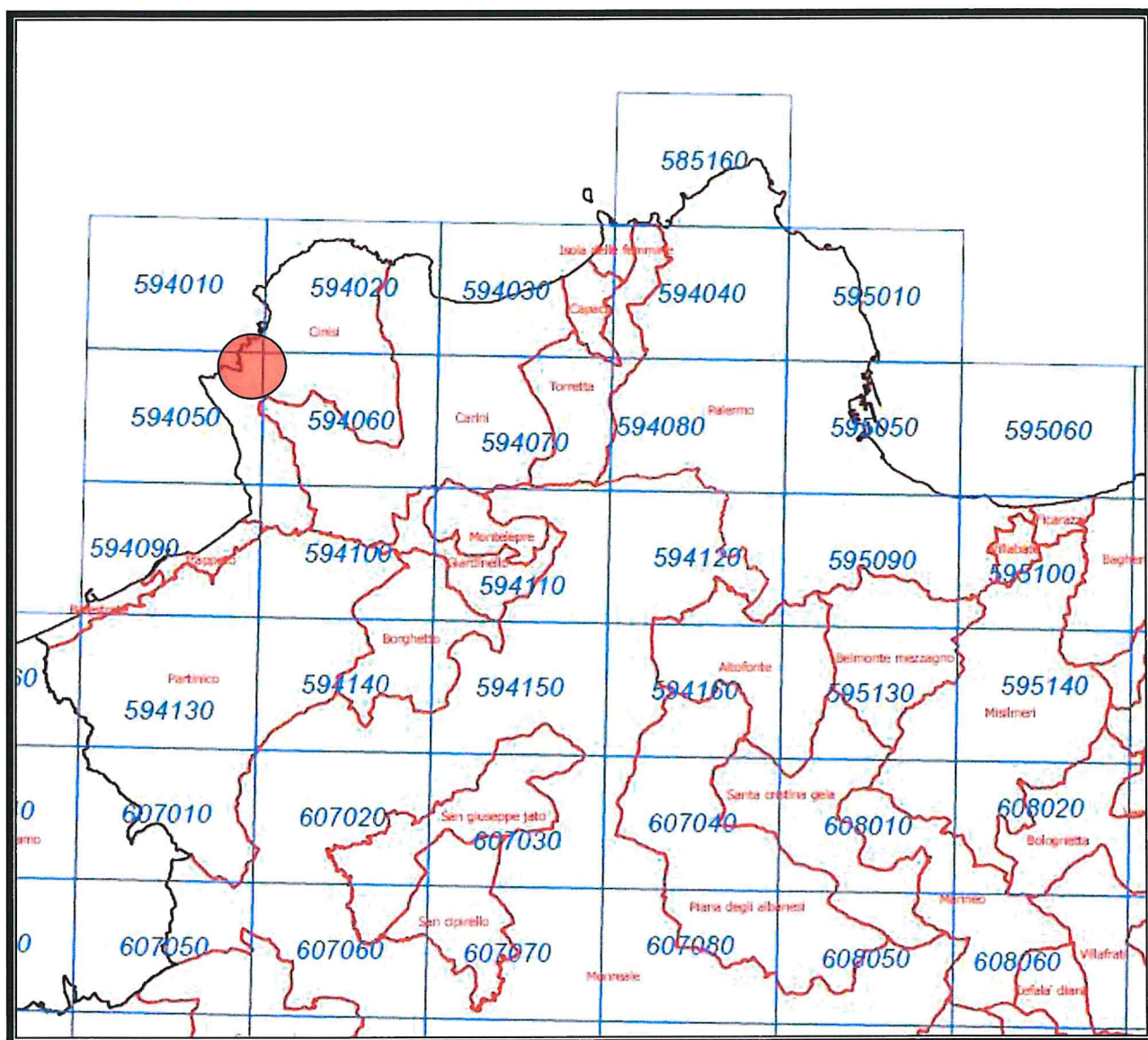
tecniche per le Decreto 17 gennaio 2018 del Ministero Infrastrutture e Trasporti, Aggiornamento delle <<Norme tecniche per le costruzioni>>, pubblicato in "Gazzetta Ufficiale,, n. 42 del 20 febbraio 2018 - Serie generale, supplemento ordinario

- Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- Eurocodice 8 - Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

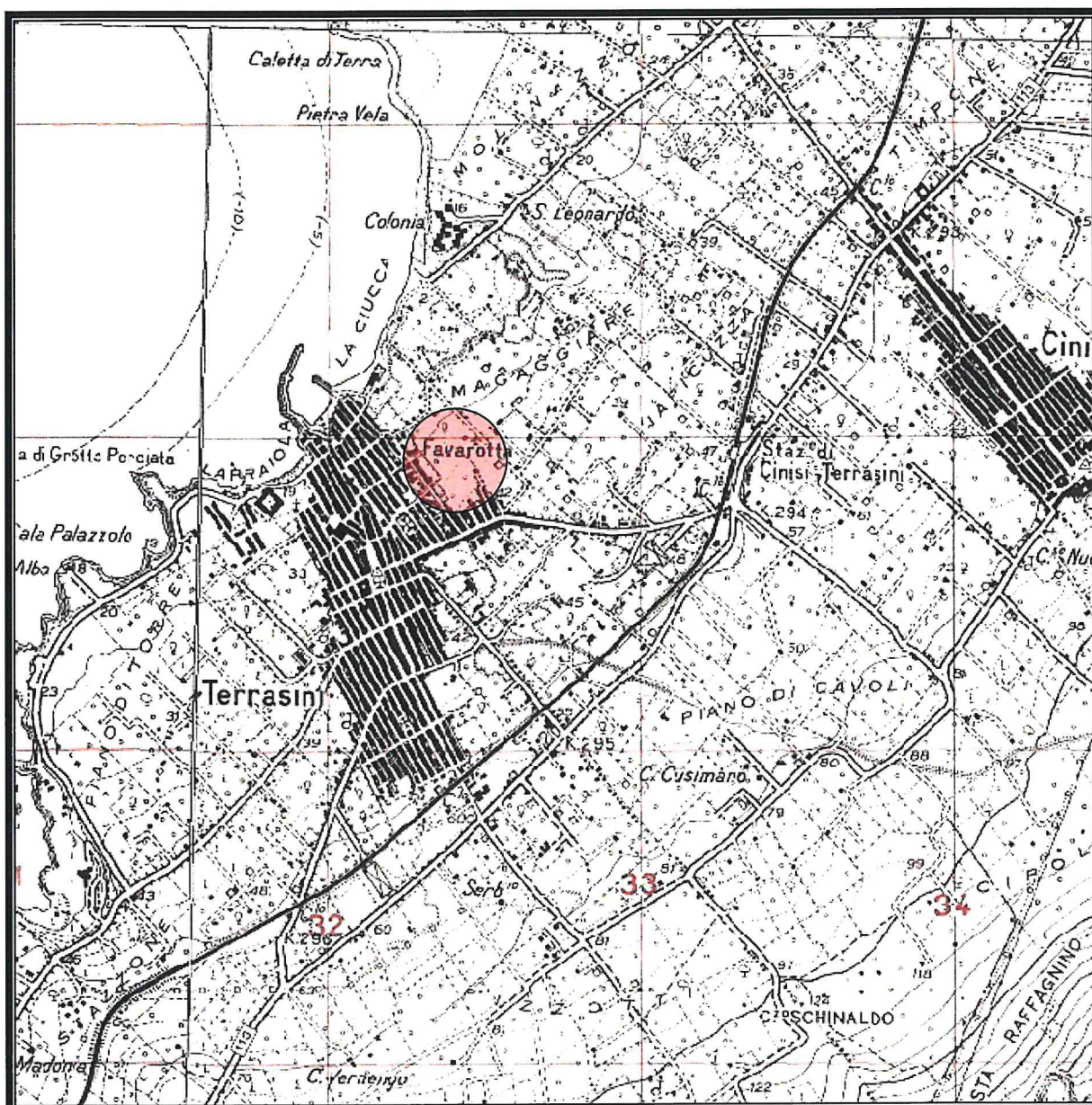
INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area considerata nel presente studio ricade nel Territorio Comunale di Cinisi, a O del centro abitato, con una quota media di 34 m s.l.m.; è iscritta al Catasto alla particella 1753, Foglio n° 10; è rappresentata nella Tavoletta "Carini" F. n°249 III N.E dell'I.G.M.; ricade nella ex zona sismica di II^a categoria con coefficiente sismico $S=9$, e ora ricadente in zona 2. L'effettiva superficie di sviluppo dell'area di cui in oggetto risulta di circa 1.000 m².

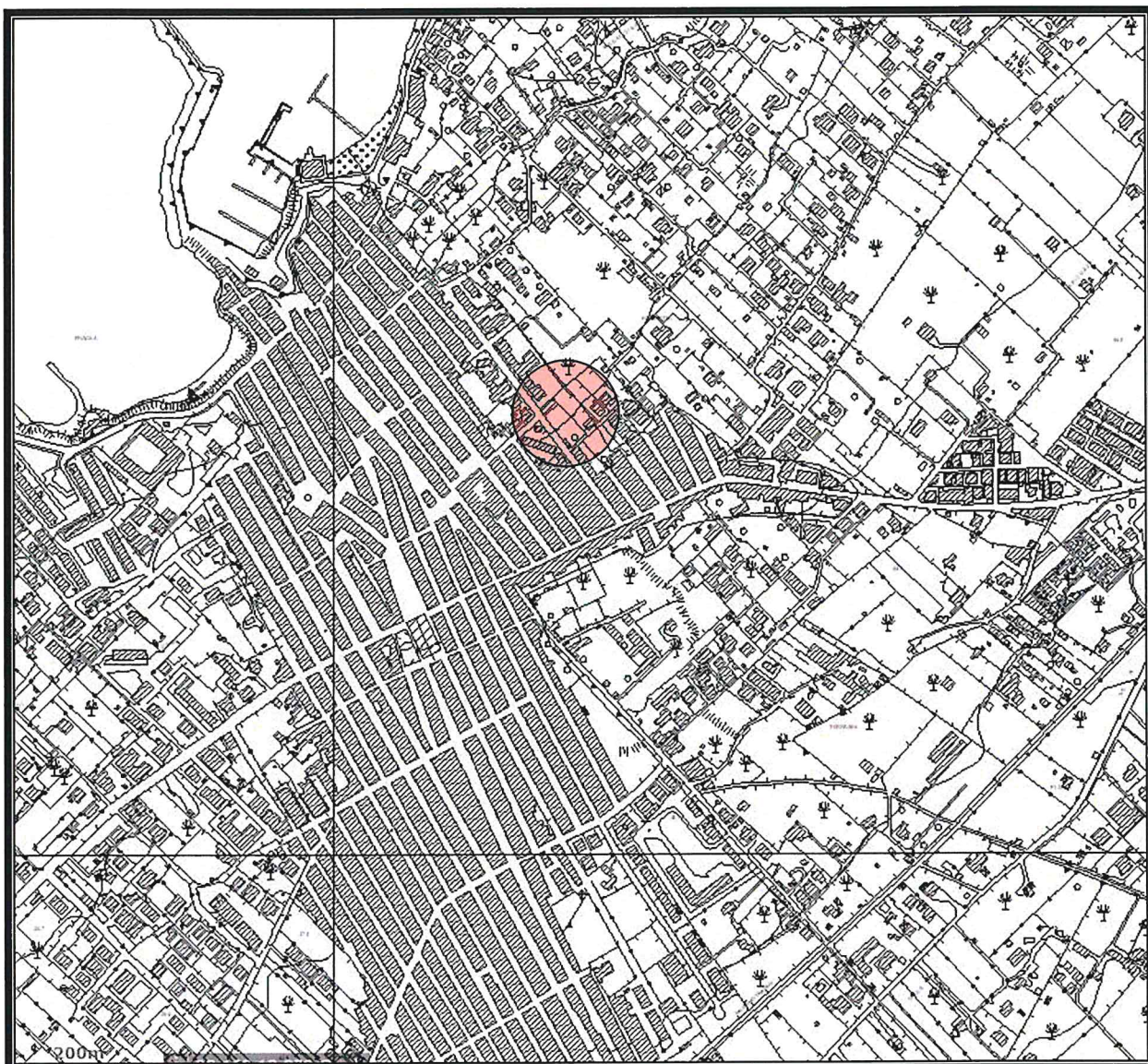




QUADRO UNIONE CTR 1:10.000



STRALCIO TOPOGRAFICO A SCALA 1:25.000 CON UBICAZIONE DEL SITO



STRALCIO TOPOGRAFICO A SCALA 1:10.000 CON UBICAZIONE DEL SITO



Quota s.l.m.	Longitudine (WGS84)	Latitudine(WGS84)
34 m	13.086628°	38.153788°

 area di cui in oggetto

IMMAGINE SATELLITARE CON INDICAZIONE DELL'AREA DI CUI IN STUDIO



STRALCIO DEL P.A.I.

INQUADRAMENTO MORFOLOGICO

Complessivamente l'andamento geomorfologico generale è abbastanza regolare, e presenta un assetto subpianeggiante, con una pendenza media intorno a 0.9° verso mare, cioè a NO.

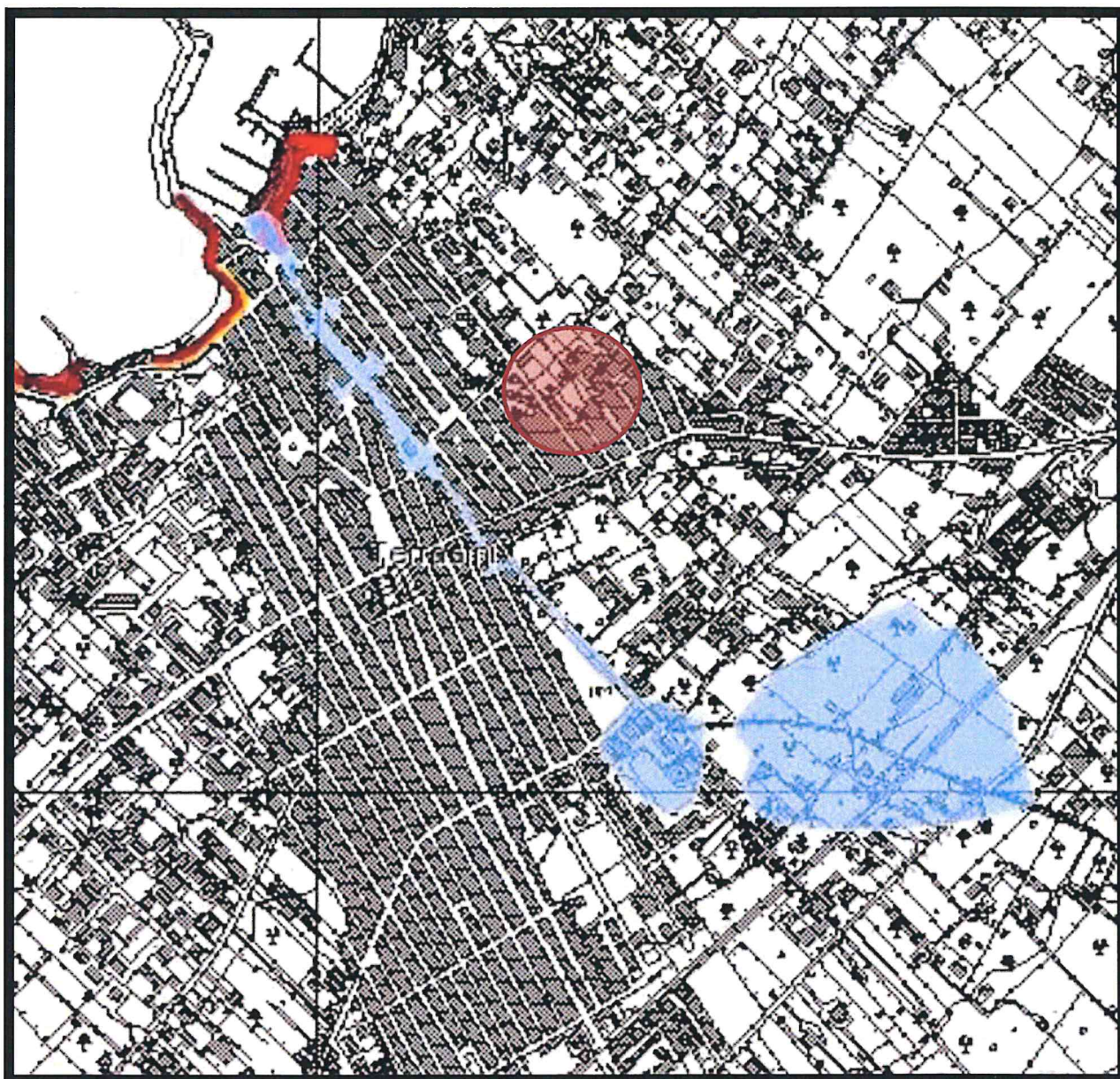
Questo andamento è caratteristico di un sistema di terrazzi marini di abrasione quaternari (in particolare tirreniani), che sono ben rappresentati nella piana costiera su cui insistono i Comuni di Cinisi e Terrasini; tale sistema è creato a spese della calcarenite bioclastica emiliano-siciliana; questa formazione costituisce poi un'ampia monoclinale con una lievissima immersione (5° al massimo) verso NO; si tratta di calcareniti di deposito litorale sedimentatesi durante il Pleistocene in corrispondenza di una fase di ingressione marina; in seguito il ritiro del mare dovuto alle oscillazioni eustatiche succedutesi nelle ere glaciali e interglaciali determinano il sistema di terrazzi, caratterizzati da forme di abrasione e di deposito; nonostante l'intensa attività antropica, è possibile sovente discriminare i due tipi di forme e riconoscere vari ordini del sistema di terrazzi tirreniani, con quote che vanno da 0 a 50 m circa s.l.m. (come nella rottura di pendenza segnata dalla via Partinico), nonché del sistema di terrazzi intermedi, fino a circa 100 m.

La piana costiera è drasticamente contrapposta ai rilievi di tipo collinare ad E e SE, costituiti prevalentemente da calcari di piattaforma, brecce calcaree addizionate e subordinatamente da argilliti brune e calcari marnosi tipo "Scaglia"; questo contrasto è stato determinato dalla tettonica tensiva pleistocenica che determina un sistema di faglie con andamento NE-SO.

Il resto dell'area è caratterizzato da una prevalenza di andamenti sempre poco acclivi, eccetto comunque nelle zone di raccordo tra la piana costiera e i rilievi, dove accanto a pareti talora subverticali, viene mantenuta una pendenza intorno ai 30° - 40° , in corrispondenza di larghe fasce di detrito di falda, peraltro sufficientemente stabili; si osservano alcune caratteristiche conoidi di detrito presumibilmente attive, ma notevolmente distanti dal centro abitato.

Nel corso di vari sopralluoghi, estesi anche ad un'area limitrofa più ampia di quella di maggior interesse, non sono stati riscontrati segni morfologici superficiali riconducibili in qualche modo a dissesti o movimenti franosi, né in atto né quiescenti; allo stesso modo non sono evidenti eventuali danni o lesioni ad edifici o manufatti, che possono essere dovuti a instabilità e cedimenti del sottosuolo; fanno eccezione, oltre

alle già citate conoidi di detrito, limitati fenomeni di crollo in corrispondenza degli affioramenti calcarei ad immediato contatto con il mare, dovuti alla eccessiva pendenza (si tratta in genere di falesie costiere) e all'azione del mare: in entrambi i casi i fenomeni di movimento agiscono in luoghi sufficientemente distanti da qualsiasi manufatto urbano in utilizzo, e in particolare dall'area ubicazione di cui in oggetto; nel caso della piana calcarenitica, che occupa buona parte del centro della area rilevata e il cui litotipo risulta quello di maggior interesse per l'opera in studio, l'azione di fattori morfogenetici si manifesta maggiormente con l'erosione chimica; gli affioramenti superficiali si presentano mascherati da un caratteristico suolo bruno-rossastro (terra rossa) ricco in ossidi di ferro, che è tipico di terreni calcarei e la cui formazione è da ricondurre ai fenomeni di alterazione subaerea sono stati sottoposti gli affioramenti calcarei in particolari condizioni climatiche: temperature e umidità mediamente elevate tipiche dei periodi interglaciali; in sostanza viene favorita, attraverso processi chimico fisici, la separazione e l'accumulo di questi ossidi, responsabili della colorazione rossastra.



	Aree del P.A.I. a rischio cadute R 4
	Aree a pericolosità di inondazione del Torrente Furi
	UBICAZIONE AREA DI CUI IN OGGETTO

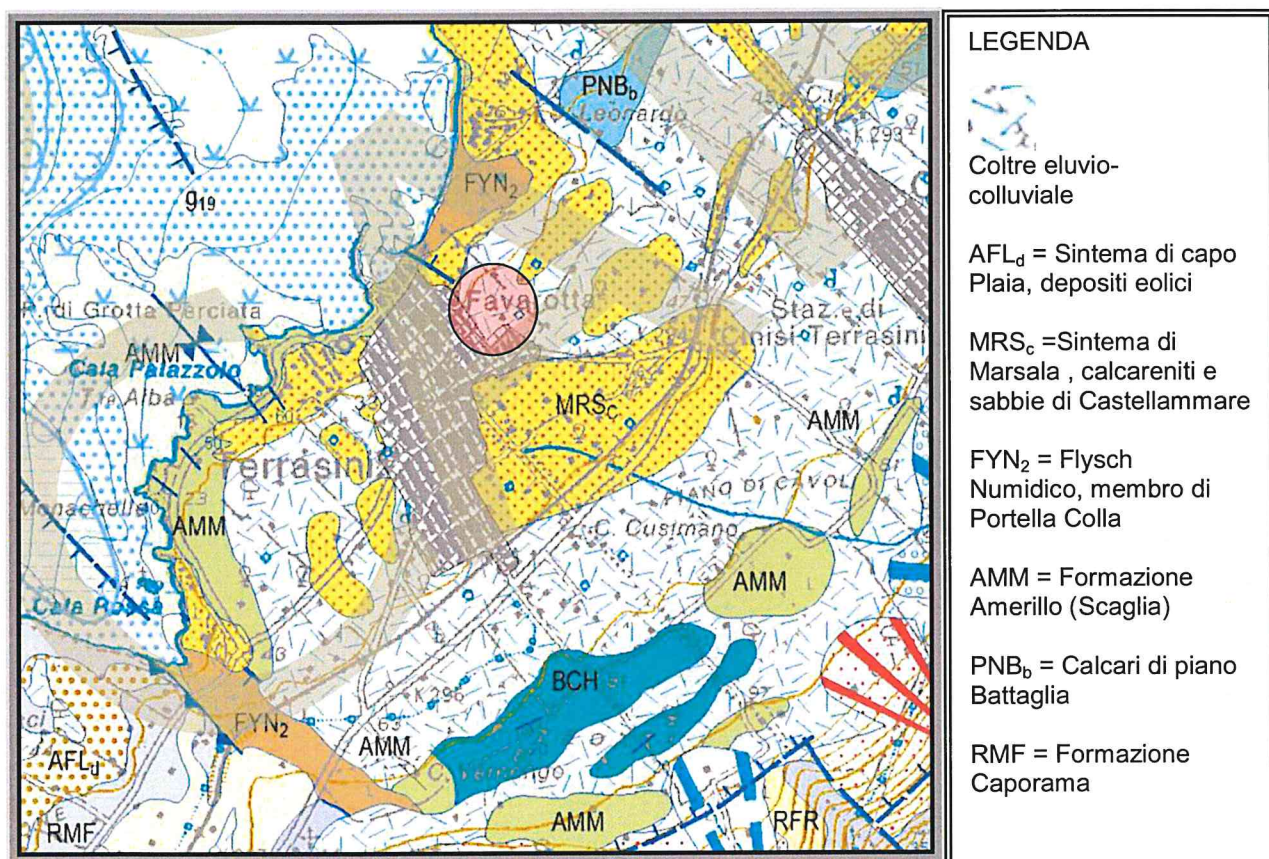
CARTA GEOMORFOLOGICA A SCALA 1:10.000

INQUADRAMENTO GEOLITOLOGICO

I litotipi che interessano l'area di studio sono di origine sedimentaria; l'analisi della sequenza delle serie stratigrafiche rilevate nel più vasto ambito della Tavoletta mostra sostanzialmente l'evoluzione di una Piattaforma Carbonatica, dal Trias al Pleistocene, in relazione agli ambienti di sedimentazione e alle vicissitudini subite.

La ricostruzione della successione stratigrafica delle rocce nell'area è stata effettuata integrando i dati dell'osservazione diretta in campagna con le informazioni ricavate dai dati bibliografici di autori precedenti.

Per quanto riguarda il litotipo di maggior interesse, e cioè la Formazione calcarenitico-sabbiosa Pleistocenica, essa verrà meglio caratterizzata di seguito.



INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE DELL'AREA

Gli affioramenti sono riconducibili all'U.S.S. Cozzo di Lupo, geometricamente sottostante alla U.S.S Gallo-Palmeto, e rappresentata dagli affioramenti più meridionali dei corpi di Piattaforma Panormide; infatti nella stessa si può distinguere la subunità Cala Rossa, rappresentata dagli affioramenti della fascia costiera ricadente nell'abitato di Terrasini.

In particolare le unità stratigrafiche affioranti nell'area sono rispettivamente, dal basso verso l'alto:

Formazione di Capo Rama (RMF)

L'Unità è costituita da calcari e calcari dolomitici grigio biancastri a megalodontidi in banchi metrici con a luoghi numerose cavità paleocarsiche colmate da siltiti giallo rossastre; Dolomie stromatolitiche e loferitiche, brecce loferitiche. Locali intercalazioni di biolititi a Coralli e livelli di pisoliti vadose. Questi depositi risultano organizzati in cicli peritidali e subtidali; spessori affioranti 400-500 metri. La successione tipo della formazione di nuova istituzione è ben esposta lungo la Falesia di Capo Rama Dove è stata studiata in dettaglio da Catalano et alii (1974) il contenuto fossilifero è rappresentato da Gasteropodi, Megalodontidi in posizione di crescita o localmente rielaborati, Ammoniti, Gasteropodi, Coralli, Foraminiferi bentonici ed arenacei.

Calcarei di Piano Battaglia (PNB_b)

Costituiti da biolititi coralgari, calcareniti oolitiche, calcareniti e calciruditi bioclastiche e brecce in spessi strati o banchi a stratificazione massiva, contenenti Ellipsactinia, Coralli, Alghe, Foraminiferi bentonici, Molluschi, Resti di Echinidi e rare Ammoniti. Raggiungono lo spessore massimo di 500 metri nella successione di montagna Longa; età Titonico- Neocomiano. La formazione si rinviene anche nel settore nord occidentale a Cozzo di Lupo e lungo la Piana Costiera di Capo Rama nel settore di Città del Mare e a Monte Pecoraro e Montagna Longa. Nel nostro caso la litofacies di Monte Pecoraro (associazione di avanscogliera è costituita da prevalenti Brecce intraclastiche con elementi derivanti dalla frantumazione della scogliera

Formazione Amerillo (AMM) - Scaglia

Questa unità, informalmente nota come Scaglia raggruppa strati sottili di calcilutiti e calcari marnosi bianchi e rosso-grigiastri a Foraminiferi planctonici (Globorotalie, Globotruncane Hantkenine), a luoghi calcilutiti selcifere più o meno argillose grigio-

verdastre alternate a biocalcareniti risedimentate a Orbitoidi e frammenti di Rudiste, passanti verso l'alto a calcilutiti bianche con laminazioni pianparallele od incrociate. La formazione affiora in lembi poco spessi di 20 m nella regione di Cozzo di Lupo, Città del Mare, e in particolare nell'area di Cala Rossa dove raggiungono spessori di 150 metri.

Flysch Numidico (FYN)

La formazione del flysch numidico comprende peliti e peliti argillose con sottili livelli arenacei, biocalcareniti e megabrecce ad elementi carbonatici, quarzareniti e siltiti argillose con microconglomerati, passanti in discordanza a marne, peliti verdastre ed arenarie quarzose con glauconite. È datata all'intervallo Oligocene-superiore (Chattiano)- Miocene inferiore (Burdigaliano). Nel nostro caso si distingue il membro di Portella Colla di età Oligocene superiore-Miocene inferiore (Aquitano basale) costituito da argille, marne sabbiose e argilliti color tabacco, spesso a struttura scagliettata, peliti brune, talora mangesifere a laminazione pianparallela, a cui si intercalano strati centimetrici di siltiti ed arenarie a grana fine, prevalentemente quarzose, e banchi metrici di quarzareniti ben cementati e conglomerati con ciottoli di quarzo. L'analisi delle facies consente di riferire questi depositi ed ambienti di sedimentazione di scarpata deposizionale

Calcareniti di marsala (MRS_c)

Si tratta di depositi quaternari: calcareniti e sabbie di Castellammare: la successione mostra dal basso in alternanza di livelli conglomerati ed arenitici in banchi di spessore compreso tra 15 e 60 cm. i conglomerati sono costituiti da ciottoli carbonatici e quarzareniti di diversi cm di diametro mediamente ben arrotondati, immersi in una matrice arenitico-ruditici, prevalentemente giallo-rossastra; sono presenti sia livelli grano-sostenuti che fango-sostenuti con prevalenza dei primi. Le areniti sono prevalentemente carbonatiche (bioclastiche) grossolane presentano laminazione sia parallela che incrociata. La fauna è ricca di gusci interi e frammenti di Gasteropodi, Lamellibranchi come Pecten, Clamis Ostrea, Cardium oltre a Briozoi, Alghe calcaree, Foraminiferi bentonici. Affiorano ben visibili anche in discordanza con la formazione Amerillo nella spiaggia a nord di Terrasini; lo spessore è molto variabile tra 20 e 50 m; la sedimentazione è da ricondursi ad un ambiente di piattaforma interna con apporti misti di tipo bioclastico ma anche terrigeno, che si alternavano principalmente sotto il controllo della tettonica e del clima costituendo una serie di terrazzi di abrasione e

deposito; in particolare affiorano in modo evidente nella successione di Punta Raisi, a nord dell'abitato di Terrasini con la tipica colorazione giallastra, costituenti uno spessore di circa 20 m, con inclinazione di 2°-5° gradi, che continua verso nord-nord-ovest; la fauna fossile è data da Lamellibranchi, Brachiopodi e nidi di Dentalium. Età Emiliano-Siciliano

Sistema di Capo Plaia (depositi recenti)

Questa formazione comprende vari tipi di depositi recenti, come ad esempio depositi alluvionali terrazzati ad est dell'area considerata, e depositi eolici lungo le zone costiere e a Sud Ovest dell'area; I depositi eolici dunari sono costituiti da sabbie quarzose più o meno siltose passanti lateralmente a Ghiaie di spiaggia, che presentano talvolta valve disarticolate spiaggiate di bivalvi. Età Olocene

INQUADRAMENTO TETTONICO - STRUTTURALE

L'attuale assetto strutturale è il risultato di un'evoluzione tettonica caratterizzata da due eventi deformativi principali (con caratteri compressivi e transpressivi).

Durante il primo evento (Miocene medio-superiore), si sono determinate: la deformazione dei terreni del Flysch Numidico (coperture del Dominio Imerese); la loro sovrapposizione sulle successioni Panormidi (non ancora deformate) a partire dalla fine del Langhiano; la deformazione delle successioni Imeresi e la loro sovrapposizione sulle successioni Panormidi in sollevamento; la deformazione delle successioni Panormidi.

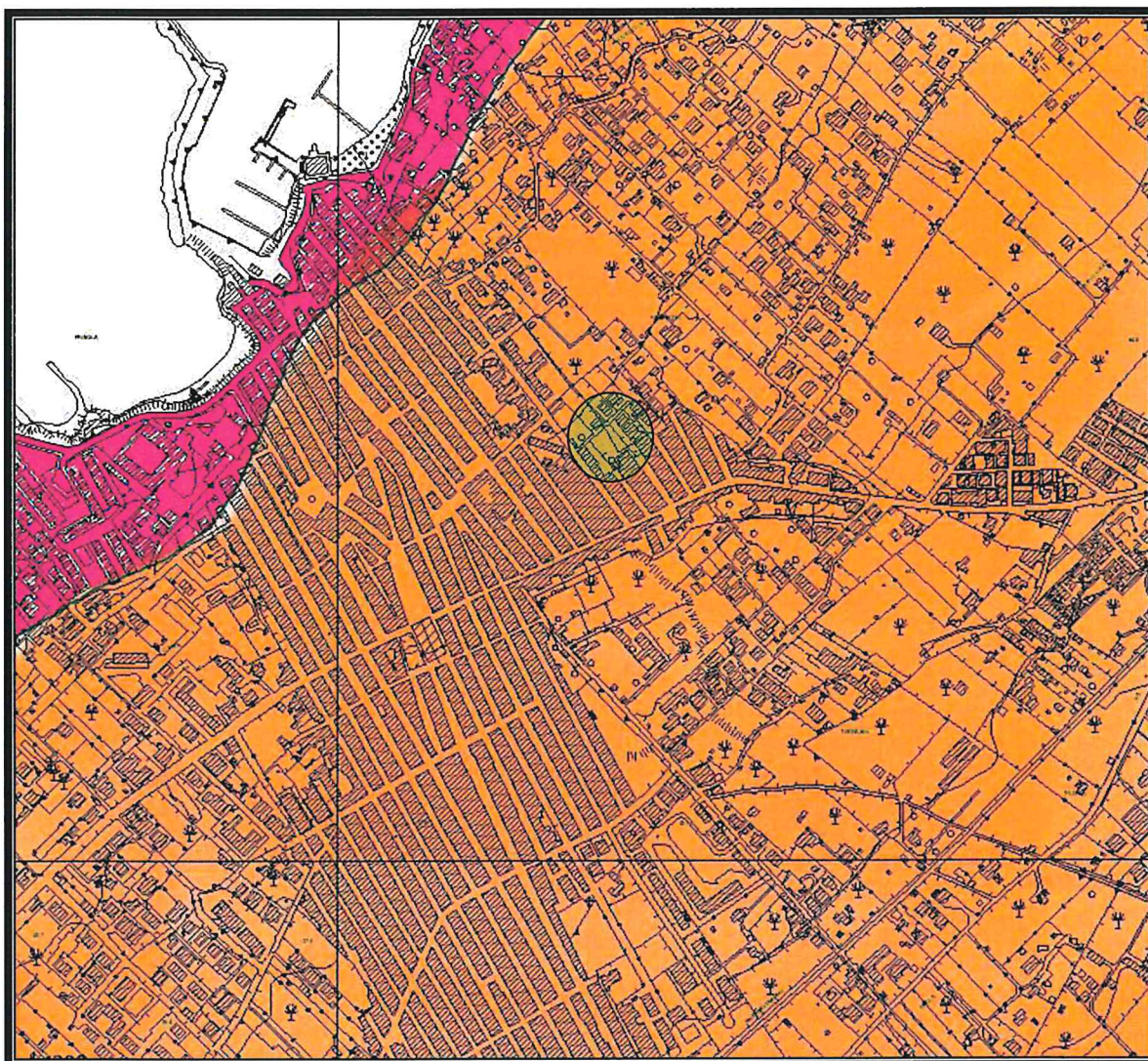
Questo cuneo, formato da Unità Panormidi ed Imeresi si sovrappone, durante il Tortoniano (parte media), sulle successioni di piattaforma carbonatica Trapanese probabilmente ancora radicate, lungo contatti a basso angolo.

Nel secondo evento (Miocene superiore-Pleistocene inferiore), prodottosi a livelli strutturali più profondi, si completa la deformazione della piattaforma carbonatica Trapanese; questo evento è collegato alla tettonica transpressiva (responsabile di pieghe e di faglie inverse ad alto angolo) e transtensiva. I contatti ad alto angolo producono localmente l'anomala sovrapposizione delle unità di piattaforma carbonatica su quelle di mare profondo, invertendo gli originari rapporti di sovrapposizione ereditati dal primo evento deformativo.

Nell'area in questione i due eventi si evidenziano in tal modo: La fase tettonica post - miocenica, cui è legata la deposizione del Flysch Numidico, è evidente nella deformazione degli strati della Scaglia cretaceo-eocenica, come si vede in modo particolare alla Praiola o in affioramenti a S e SE di Cinisi; il risultato è, a grandi linee, la formazione di un sistema di pieghe sinclinali ed anticlinali con pendenze elevate, talora prossime alla verticalità, la cui direzione degli assi strutturali è NO-SE; in relazione alla diversa plasticità dei litotipi si ha pure la formazione di faglie inverse con la medesima direzione, che sono osservabili a S dell'area; a Calarossa è presente un contatto tettonico riconducibile alla tipologia di cuneo listrico, che continua fino ai rilievi situati a S dei Comuni di Terrasini e Cinisi; in tale situazione si notano i diversi effetti della tettonica, che pone a contatto i calcari a Megalodon di Piattaforma del Trias-Lias inferiore con i calcari marnosi della Scaglia.

La successiva fase tettonica distensiva, posteriore alla deposizione della calcarenite costiera pleistocenica, è responsabile dei dislocamenti che dividono la piana

costiera dai rilievi orientali, ed è presente con una serie di faglie dirette con direzione NE-SO, grossomodo ortogonali alle direzioni delle strutture della fase tettonica precedente; infine, i pochi corsi d'acqua presenti sono impostati dunque in relazione alle direzioni delle faglie.



LEGENDA



calcareniti e sabbie EMILIANO – SICILIANO



Calcilutiti e calcari marnosi CRETACEO SUPERIORE – OLIGOCENE INFERIORE

CARTA GEOLOGICA A SCALA 1:10.000



LEGENDA

 calcareniti e sabbie EMILIANO – SICILIANO

CARTA GEOLOGICA E GEOMORFOLOGICA A SCALA 1:2000

CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE ED IDROGEOLOGICHE

Dal punto di vista dell'idrografia superficiale, un reticolo idrografico è praticamente assente; la predominanza di litologie calcaree che presentano un certo sistema di fessurazione, oltre che una propria porosità naturale (rispettivamente quindi sia primaria che secondaria) conferisce a questi terreni una buona permeabilità per porosità e per fessurazione, riducendone il deflusso superficiale (il coefficiente di permeabilità k per questi terreni si aggira intorno a 10^{-3} - 10^{-4} cm/s); la natura stessa dei terreni calcarei, che costituiscono la maggior parte degli affioramenti superficiali nell'area in esame, implica l'assenza quasi totale di incisioni vallive o segni di dilavamento interno ad opera di acque meteoriche, eccetto nel carsismo degli affioramenti a diretto contatto con il mare, che sono comunque dovuti più che altro all'azione del moto ondoso e delle correnti.

Per quanto riguarda la formazione calcarenitico-sabbiosa, si ha una prevalenza di permeabilità per porosità naturale, mentre la sottostante formazione calcilutitico-calcareo presenta un elevato grado di fratturazione che consente la formazione di falde significative solo a elevate profondità.

In situazioni più limitate, la sovrapposizione di litologie permeabili (come la calcarenite costiera) a litologie impermeabili (Flysch Numidico ovvero "Scaglia Cinerea"), permette anche in questo caso l'esistenza di un circuito idrico sotterraneo non immediatamente superficiale.

In particolare avremo un acquifero calcarenitico-sabbioso costituito da calcareniti e sabbie grossolane a cemento calcareo, considerato poroso e per le caratteristiche di sedimentazione proprie della formazione; nelle zone fratturate e fessurate si innescano circolazioni idriche, non immediatamente superficiali. La geometria del deposito è omogenea, e la permeabilità è variabile da elevata a moderata.

Caratteristica prevalente è la presenza di microfessure e/o veri e propri canali che si sviluppano invece nei complessi litoidi. Infatti i calcari marnosi e calcilutiti rappresentano acquiferi con queste caratteristiche; affiorano prevalentemente a N del territorio; la porosità primaria è generalmente ridotta, anche se in superficie la caratteristica superficie scagliettata conferisce un aumento della medesima, mentre è più elevata quella secondaria, dovuta a fratture di origine tettonica. La permeabilità è complessivamente media-elevata.

In relazione alle caratteristiche litologiche e di permeabilità delle diverse formazioni affioranti nel territorio, ai loro rapporti stratigrafici al loro assetto strutturale e all'estensione e spessore dei depositi, possono essere schematicamente distinti i seguenti sistemi acquiferi:

- Acquiferi in falda libera nei depositi costieri calcarenitico-sabbiosi quaternari
- Acquifero profondo in pressione nella successione carbonatica di piattaforma

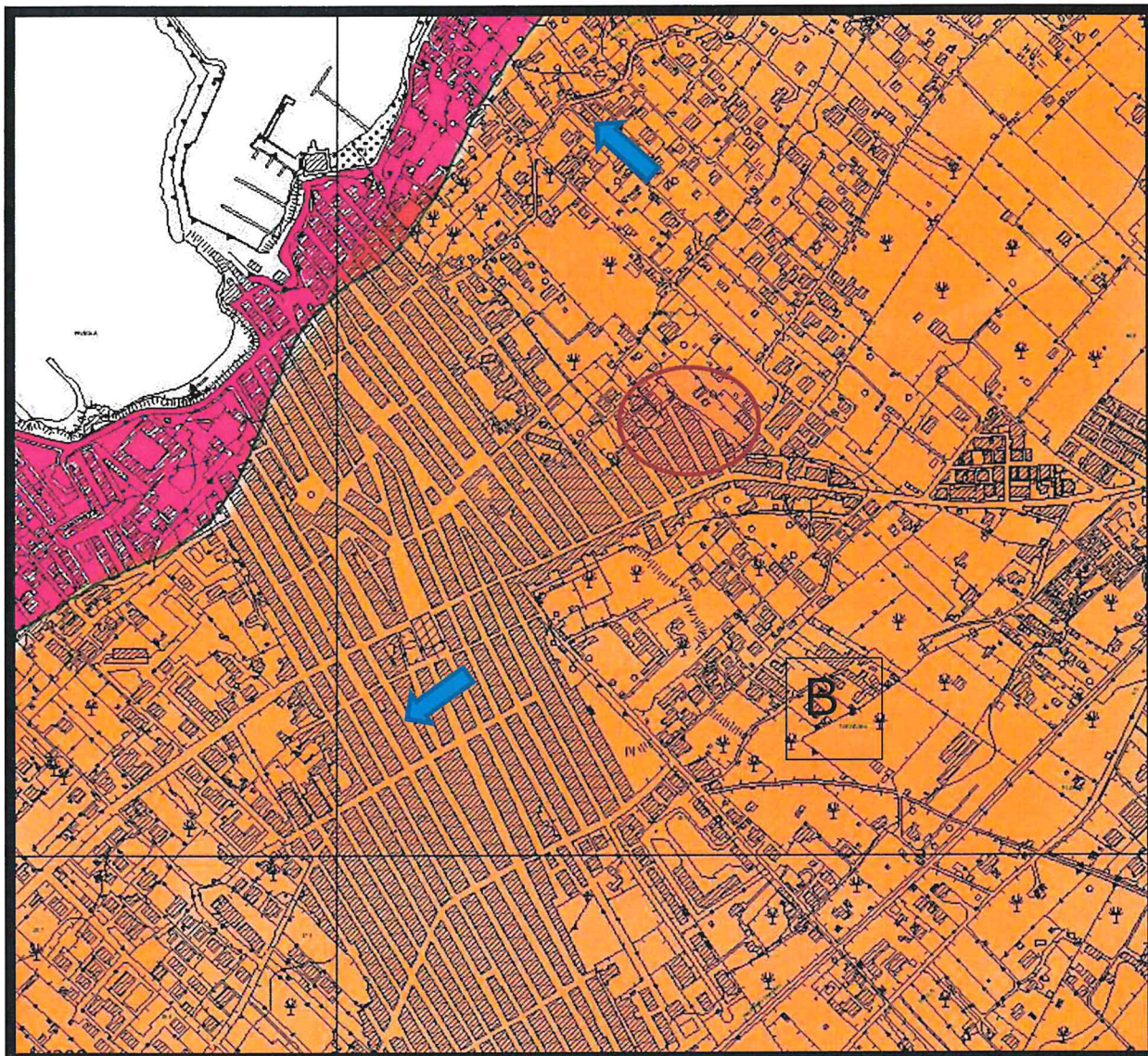
La presenza nell'area di numerosi scavi ed affioramenti escludono la presenza di falde acquifere superficiali che possono in qualche modo interferire con i piani di posa delle fondazioni di eventuali edifici; la profondità della falda si attesta oltre i -15 m.

Non sono presenti pozzi destinati ad uso potabile o sorgenti.

In un intorno più esteso dell'area l'unico corso d'acqua significativo è il Vallone del Furi, un corso d'acqua ad andamento stagionale.

Si evidenziano in tabella le caratteristiche di permeabilità e di porosità delle unità idrogeologiche presenti:

litotipo	Tipo di permeabilità	Grado di permeabilità	Coefficiente di permeabilità	Grado di porosità (%)	drenaggio
Formazione calcarenitico-sabbiosa	porosità	Medio-elevato	10^{-3} - 10^{-4} cm/s	35	Buono
Calcilutiti e calcari marnosi	fratturazione	Medio-elevato	10^{-3} - 10^{-4} cm/s	30	buono



TERRENI PERMEABILI PER POSITÀ
detrito di falda, materiali colluviali, calcareniti e sabbie



TERRENI A PEREABILITÀ LIMITATA E LOCALIZZATA PER FESSURAZIONE
calcolutiti e calcari marnosi a Foraminiferi

B = bacino marginale della piana di
Terrasini e Cinisi



Direzione di scorrimento delle falde profonde



UBICAZIONE AREA DI CUI IN OGGETTO

CARTA IDROGEOLOGICA A SCALA 1:10.000

CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICO – GEOTECNICA DEL SITO

I litotipi che interessano il sito di cui in oggetto sono costituiti nello specifico dall'alto verso il basso da:

- **Coperture vegetali e terreni residuali:** costituiti da un terreno residuale sciolto, di colore brunastro, a granulometria eterogenea, con matrice argillosa, suborizzontale in cui si osserva nei dintorni la presenza di residui vegetali ed elementi calcarei di dimensioni centimetriche; tale suolo non è sempre presente, essendo a volte la formazione calcarenitica praticamente subaffiorante.

Nel complesso si presenta come un terreno piuttosto eterogeneo sia orizzontalmente che verticalmente, molto compressibile, dalle scadenti qualità meccaniche.

- **Formazione calcarenitico-sabbiosa:** calcareniti e sabbie a granulometria variabile da grossolana a fine mediamente addensate, di colore giallastro, a stratificazione regolare e giacitura suborizzontale; il contenuto fossilifero (molto scarso) comprende per lo più clasti di Lamellibranchi e Gasteropodi.

Nel complesso si mostra come un terreno piuttosto omogeneo e dalle buone qualità meccaniche.

- **Calcilutiti e calcari marnosi a Foraminiferi Planctonici (Scaglia),** di colore variabile dal bianco al rosato al rosso, con tracce di ossidazione subaerea rossastra; la stratificazione è regolare, con strati di spessore variabile fino a 10-20 cm; presenti intercalazioni di brecce calcarenitiche grigio chiare; in sezione sottile presentano Foraminiferi planctonici e spicole di Spugne.

Nel complesso si mostra come un terreno piuttosto omogeneo e dalle buone qualità meccaniche.

Di seguito (Tab. 1) si riportano i parametri meccanici e geotecnici dei litotipi in esame, estrapolati da valutazioni cautelative a scapito della sicurezza

Tab.1

	γ' (T/m ³)	ϕ (°)	c' (T/m ³)	Spessore (m)
Coperture vegetali e terreni residuali	1.8	28	0	0.5
Formazione calcarenitico-sabbiosa	1.9	30	0	1.0
Calcilutiti e calcari marnosi fratturati	2.1	32	0	6.0 – 6.5
Calcilutiti e calcari marnosi	2.3	34	0	Inf.

TABELLA MODULI DINAMICI		
0.4	(v) Modulo di Poisson strato 1	
0.3	(v) Modulo di Poisson strato 2	
		LITOLOGIA
532	(Vp) velocità onde primarie strato 1 (m/s)	coperture vegetali e terreni residuali
1010	(Vp) velocità onde primarie strato 2 (m/s)	calcareniti e sabbie
0.018	(γ) peso di volume strato 1 (Kg/cm ²)	
0.02	(γ) peso di volume strato 2 (Kg/cm ²)	
217.19	(Vs) velocità onde secondarie strato 1 (m/s)	
539.87	(Vs) velocità onde secondarie strato 2 (m/s)	
2423.4471	(E) Modulo di Young strato 1 (Kg/cm ²)	
15449.31	(E) Modulo di Young strato 2 (Kg/cm ²)	
390.94	(μ) Modulo di rigidità strato1 (Kg/cm ² *sec)	
1079.74	(μ) Modulo di rigidità strato2 (Kg/cm ² *sec)	
849.07	(G) Modulo di taglio strato 1 (Kg/cm ²)	
5829.1429	(G) Modulo di taglio strato 2 (Kg/cm ²)	
3962.336	(K) Modulo di incompressibilità strato 1 (Kg/cm ²)	
12629.81	(K) Modulo di incompressibilità strato 2 (Kg/cm ²)	



calcareniti e sabbie a granulometria variabile da grossolana a fine con grado di cementazione variabile, di colore giallastro, a stratificazione regolare e giacitura suborizzontale; presenti rari clasti di Lamellibranchi e Gasteropodi **C22 – G2c**



UBICAZIONE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

CARTA LITOTECNICA SCALA 1:2000

CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO DI FONDAZIONE

L'Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri 3274/2003 (Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del Territorio Nazionale) e successiva 3519/2006 e il Decreto Ministeriale 14/09/2005 e successive modifiche e integrazioni (Norme Tecniche per le Costruzioni) prescrivono le modalità di caratterizzazione e classificazione del terreno di fondazione; esso consiste fondamentalmente di due punti;

- caratterizzazione del suolo in base ad alcune categorie (sulla base di diversi valori di V_{SEq}).
- caratterizzazione del territorio in base ad una divisione in 4 zone, caratterizzate da diversi valori di a_g , relative alla determinazione dello spettro di risposta elastico nelle sue componenti orizzontale e verticale.

Ai fini della definizione della azione sismica di progetto (punto 3.2.2), deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale. In mancanza di tali studi si può utilizzare la classificazione dei terreni descritta di seguito.

La classificazione deve riguardare i terreni compresi tra il piano di imposta delle fondazioni degli edifici ed un substrato rigido di riferimento, (*bedrock*) ovvero quelli presenti ad una profondità commisurata all'estensione ed all'importanza dell'opera. La classificazione può essere basata sulla stima dei valori della velocità media delle onde sismiche di taglio V_s ovvero sul numero medio di colpi NSPT ottenuti in una prova penetrometrica dinamica ovvero sulla coesione non drenata media c_u . In base alle grandezze sopra definite si identificano le seguenti le categorie del suolo di fondazione:

A – Ammassi rocciosi affioranti e terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

B – rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un graduale miglioramento delle

proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati, o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 e 360 m/s.

D - Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.

E – Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibile a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiori a 30 m.

L'attribuzione del suolo di fondazione ad una delle categorie di cui sopra sarà determinata dal valore V_{Seq} , ovvero una velocità media di propagazione delle onde di taglio calcolato con la seguente espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_i^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti negli H m superiori.

Come da indagini sismiche “HVSr” allegate, la velocità V_{Seq} ottenuta è, rispettivamente, di 435 m/s, 574 m/s e 573 m/s; tali valori permettono di ascrivere il suolo di fondazione alla categoria “B”

Con la Deliberazione n° 408 del 19/12/2003 (individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche connessi al recepimento dell'OCPM 3274/03) il territorio nazionale è stato suddiviso in 4 zone sismiche.

Il territorio di Cinisi, (Codice ISTAT = 19082031) che rispetto alla vecchia classificazione ricadeva nella II categoria con coefficiente sismico = 9, ricade ora nella zona 2.

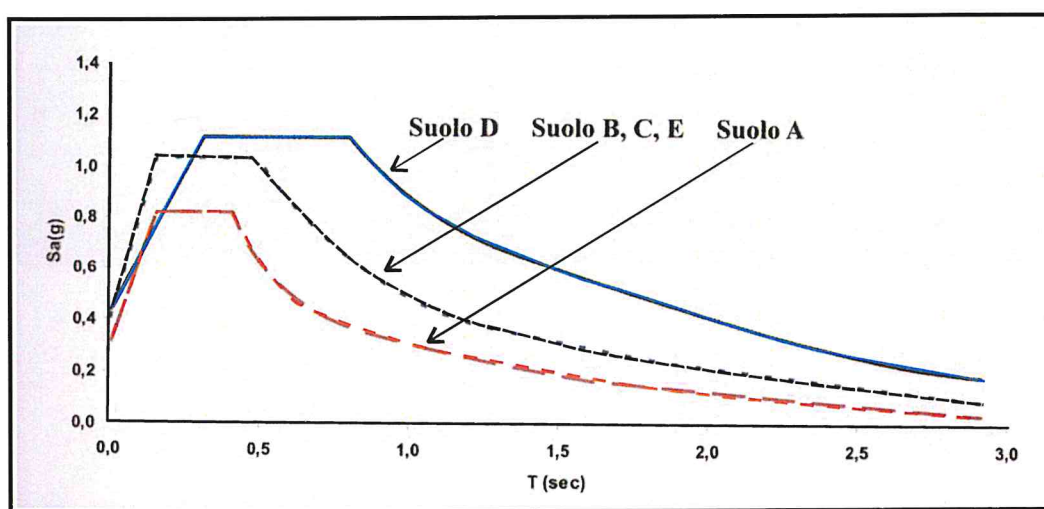
In base al D. M. 14/09/2005 a ciascuna di queste zone corrisponde un preciso valore di a_g = accelerazione massima orizzontale convenzionale, espressi come frazione dell'accelerazione di gravità g .

zona	Valore di a_g
1	0,35g
<u>2</u>	<u>0,25g</u>
3	0,15g
4	0,05g

Quindi per il Territorio del Comune di Cinisi il valore di a_g è = **0,25g**.

Questo valore permette di calcolare lo spettro di risposta sismico. Un modello di riferimento per la descrizione del moto sismico sul piano di fondazione è costituito dallo spettro di risposta elastico. Lo spettro di risposta elastico è costituito da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5% e considerata indipendente dal livello di sismicità, moltiplicata per il valore della accelerazione massima convenzionale del terreno fondale a_g che caratterizza il sito.

Le espressioni che definiscono lo **spettro di risposta elastico** della **componente orizzontale** è definito dai valori dei parametri che definiscono la forma spettrale riportati di seguito :



Tali spettri vengono normalizzati in relazione ai parametri di amplificazione topografica, stratigrafica, in relazione alla pericolosità sismica del sito, alla vita nominale della costruzione, ed all'uso cui essa è destinata.

In particolare nelle fasi di verifica strutturale vengono adottate delle forme spettrali previste dalle NTC, che vengono definite su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione di tre parametri:

- **a_g** : accelerazione massima orizzontale del terreno;
- **F_o** : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- **T_c** : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento (T_r : tempo di ritorno) e di vita di riferimento (V_r) della costruzione, per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche.

I suddetti parametri a_g , F_0 , T_c , vengono definiti tramite un reticolo di riferimento della pericolosità sismica, approvato dal Consiglio superiore dei lavori Pubblici, previa istruttori tecnica del Dipartimento della Protezione Civile.

I valori di riferimento dei punti non nodali vengono ricavati per interpolazione.

Alla configurazione sismostratigrafica individuata si può adottare la **seguente categoria stratigrafica (D.M. 17 gennaio 2018)** alla quale corrispondono i seguenti valori massimi di coefficiente di amplificazione stratigrafica :

Categoria di sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
<u>B</u>	<u>$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \times F_0 \times a_g/g \leq 1,20$</u>	<u>$1,10 \times (T_c)^{-0,20}$</u>
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \times F_0 \times a_g/g \leq 1,50$	$1,05 \times (T_c)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \times F_0 \times a_g/g \leq 1,80$	$1,25 \times (T_c)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \times F_0 \times a_g/g \leq 1,60$	$1,15 \times (T_c)^{-0,40}$

Alla configurazione sismostratigrafica individuata si può adottare la **seguente categoria topografica (D.M. 17 gennaio 2018)** alla quale corrispondono i seguenti valori massimi di coefficiente di amplificazione topografica:

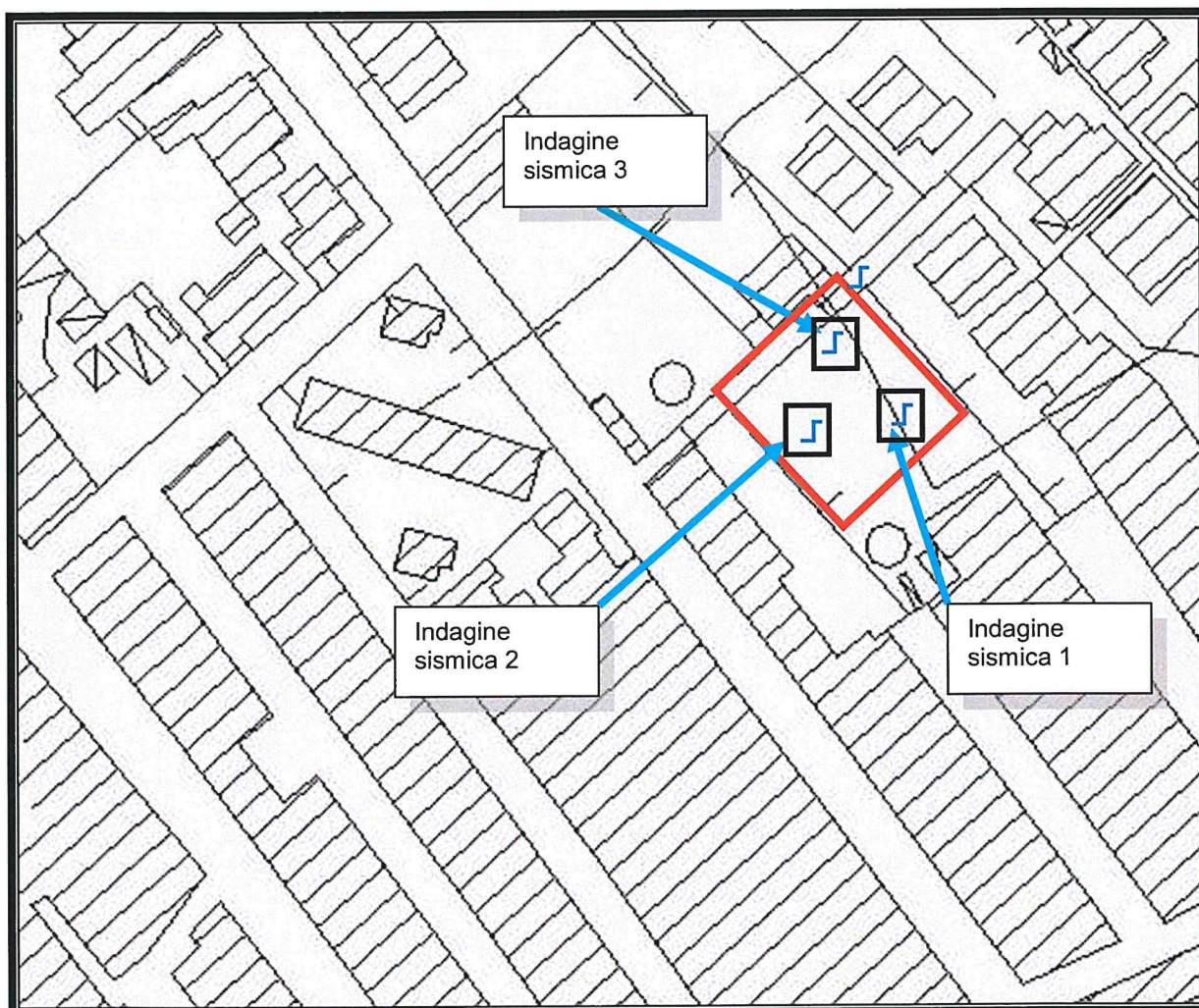
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica	S_t
<u>T1</u>	<u>Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$</u>	<u>1,0</u>
T2	In corrispondenza della sommità del pendio, pendii con inclinazione media $i \geq 15^\circ$	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo con cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo con larghezza di cresta molto minore che alla base ed inclinazione media $i \geq 30^\circ$	1,4

I valori dei parametri che definiscono la forma delle spettro derivano dalle indagini di risposta sismica locale. In mancanza di tali accurate determinazioni, si possono assumere, per le componenti verticali del moto e per le categorie di suolo di fondazione definite, i valori di T_B , T_C , T_D e S riportati nella seguente tabella:

CATEGORIA DI SUOLO	S	T_B	T_C	T_D
A – B – C – D - E	1.00	0.05	0.15	1.0

Mentre per le componenti orizzontali, i valori riportati nella seguente tabella:

CATEGORIA DI SUOLO	T_E	T_F
A	4.5	10.00
<u>B</u>	<u>5.00</u>	<u>10.00</u>
C,D,E	6.00	10.00



LEGENDA

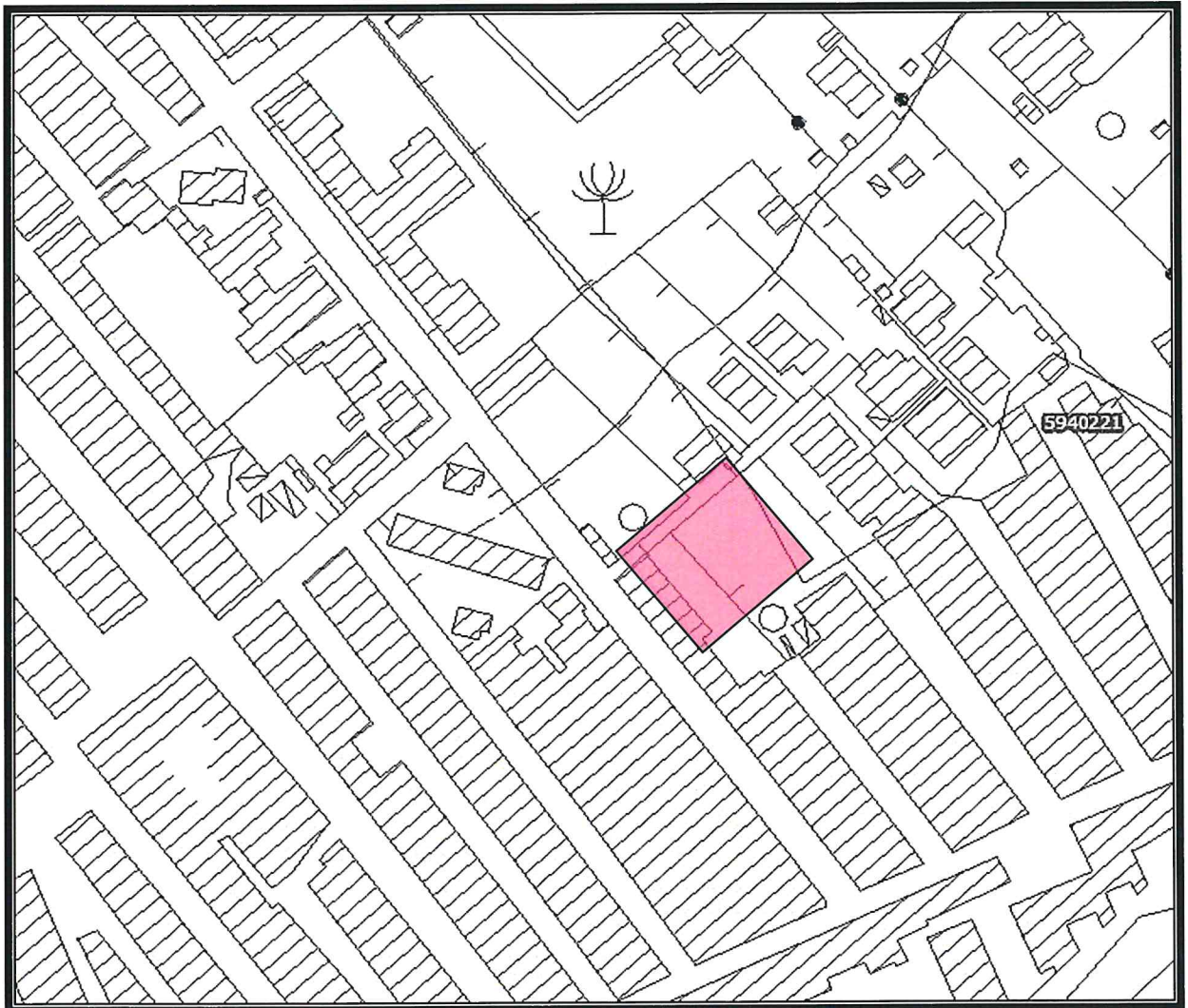


Indagini sismiche passive di tipo HVSR con Tromino –
stazione microtremore a stazione sismica



UBICAZIONE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

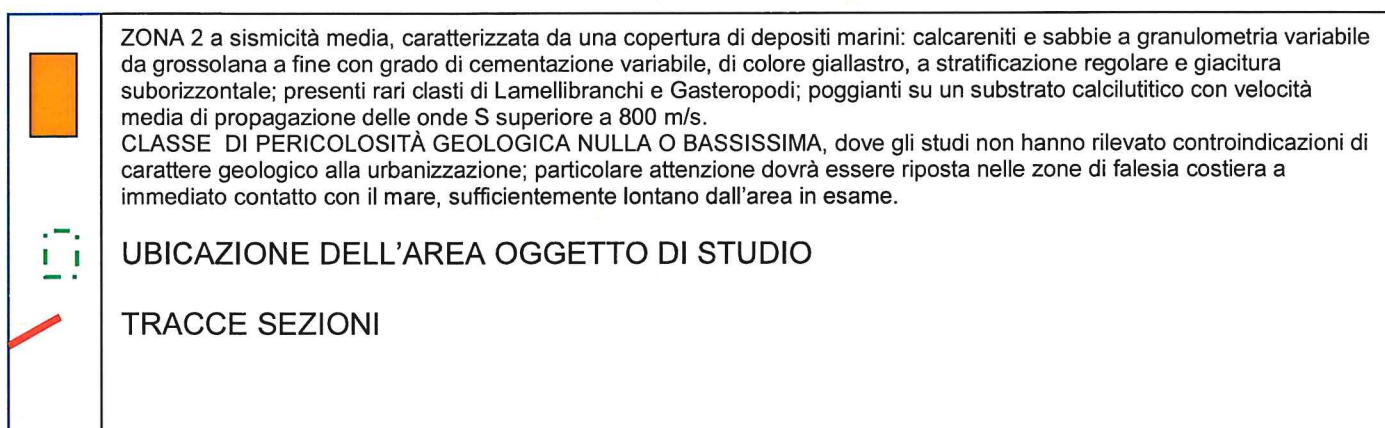
CARTA INDAGINI INTEGRATIVE IN SCALA 1:2000



UBICAZIONE DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

AREA CON BUONE CARATTERISTICHE GEOTECNICHE, DOVE DEVE ESSERE
COMPLETAMENTE ELIMINATO LO STRATO DI ALTERAZIONE SUPERFICIALE E
LE COPERTURE VEGETALI

CARTA DELLE PERSCRIZIONI ED INDICAZIONI ESECUTIVE IN SCALA 1 :2000



CARTA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA E GEOLOGICA IN SCALA 1:2000

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In base allo studio effettuato e all'analisi delle caratteristiche morfologiche, geologiche, strutturali dell'opera in esame, è possibile concludere quanto segue:

- il sito esaminato offre delle ottime condizioni di stabilità in quanto caratterizzato da una morfologia subpianeggiante e dall'assenza di fenomeni di dissesto sia in atto che quiescenti, che agiscono in aree sufficientemente lontane dal sito di cui in oggetto, e ricadono al di fuori da aree a rischio presenti nel relativo stralcio del P.A.I.
- i terreni che interessano il sito sono costituiti da una formazione calcarenitico-sabbiosa, dalle buone qualità meccaniche.
- è da escludersi l'interazione tra un eventuale piano di fondazione e la falda freatica poiché, dai dati acquisiti, la profondità della superficie piezometrica è superiore alla massima profondità ipotizzabile per un piano di posa fondale; altresì non sono stati rinvenuti pozzi o sorgenti.
- il sito in esame ricade in zona sismica di 2° categoria con grado di sismicità $S = 9$
- nell'area interessata non sono state rilevate pericolosità geologiche e/o sismiche di alcun tipo
- non si intravedono alla luce del presente studio, ulteriori problematiche di ordine geomorfologico o geologico tali da compromettere la stabilità di eventuali opere.

Cinisi, 15/11/2021

IL GEOLOGO
Dott. Diego Sammartino
O.R.G.S. n° 1688

INDAGINE GEOFISICA PASSIVA HVSR

(TECNICA DEI RAPPORTI SPETTRALI TRAMITE ANALISI DEI MICROTREMORE)

PREMESSA

Scopo della seguente indagine è la caratterizzazione sismica del sottosuolo, con particolare riferimento all'individuazione delle discontinuità sismiche e la profondità del substrato compatto, per pervenire alla stima della V_s eq, così come prescritto dalle N.T.C. del 17/01/2018.

L'indagine si avvale del metodo basato sulla tecnica di Nakamura (1989), ovvero della misura del rumore sismico ambientale (o microtremori) e dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e verticale, per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. (Nogoshi e Igarashi, 1970, Shiono et al. (1979), Nakamura, (1989).

GENERALITÀ E CENNI TEORICI SUL METODO IMPIEGATO

Le basi teoriche di questa tecnica si basano sul rumore sismico ambientale (Castellaro, Mulargia, Bianconi, 2005), presente ovunque sulla superficie terrestre; tale rumore è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre; esse si propagano come onde superficiali di Rayleigh.

Tale rumore viene anche definito microtremore o microsisma, in quanto caratterizzato da oscillazioni molto piccole, in termini di accelerazione (dell'ordine di 10^{-15} m/s²), di vari ordini di grandezza più piccole di quelle indotte da terremoti; in particolare tali vibrazioni sismiche ambientali (rumore sismico) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di 10^{-4} - 10^{-2} mm (Okada, 2003). In riferimento al contenuto in frequenza, il rumore sismico viene chiamato microtremore se contiene alte frequenze (in genere maggiori di 0.5 Hz) e microsisma per basse frequenze.

Le misure puntuali di rumore sismico possono essere utilizzate per la stima sia degli effetti di sito (funzione di amplificazione), sia degli effetti sulle costruzioni nel rispetto della normativa che ne stabilisce la soglia massima (UNI 9916).

In relazione agli effetti di sito, l'analisi delle misure di rumore sismico può essere condotta con tre metodi:

- Spettri di Fourier
- Rapporti spettrali
- Rapporti spettrali H/V

Tra questi quello che sembra fornire i risultati migliori è proprio quello dei **Rapporti spettrali H/V**.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato artificialmente allo scopo, come nel caso di esplosioni o masse battenti (sismica attiva).

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

Similmente, nel tragitto dalla sorgente di emissione al sito di indagine, le onde elastiche dovute al suddetto microtremore o anche ad un sisma, subiscono, come è noto dalla fisica, tutta una serie di fenomeni di rifrazione, riflessione e attenuazione che dipendono dalla natura del mezzo attraversato; quindi, se è vero che da un lato l'informazione relativa alla sorgente di

emissione viene alterata e quindi persa, dall'altro è presente comunque sempre una parte del segnale (correlabile ad esso), che può essere estratto, e che contiene in qualche modo le informazioni del percorso del segnale, e in particolare relativo alle strutture più superficiali (vicine al sensore di acquisizione); si tratta, in pratica di estrarre questo debole rumore sismico, inserito e mascherato nell'insieme del rumore sismico, attraverso opportune tecniche come la suddetta HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio).

I primi studi furono effettuati da Kanai (1957), e ripresa e perfezionata poi da numerosi autori, tra cui Nogoshi e Igarashi (1970), e Nakamura (1989), per la determinazione dell'amplificazione sismica locale; questi autori indagarono sul significato fisico del rapporto H/V e mostrarono la sua relazione diretta con la curva di ellitticità delle onde di Rayleigh. Essi conclusero che il picco massimo di ampiezza si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale della copertura di terreni. Nel 1989, Nakamura propose in inglese il rapporto H/V come stima affidabile della funzione di trasferimento delle onde S per un dato sito. Le argomentazioni usate da Nakamura sono estremamente qualitative e si basano sull'ipotesi che i microtremori siano originati da sorgenti molto locali, come il traffico vicino al sismometro, e siano onde di Rayleigh che si propagano in un solo strato su un semispazio. oggi sono possibili stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei terreni.

Il metodo HVSR considera dunque i microtremori come composti prevalentemente da onde di Rayleigh, e presuppone che l'amplificazione relativa agli effetti di sito sia causata dalla presenza di uno strato e un substrato elastico (bedrock) con caratteristiche differenti; in queste condizioni le componenti del moto sismico da analizzare sono quattro:

- quelle orizzontali di superficie (Hs)
- quelle orizzontali al bedrock (Hb)
- quelle verticali di superficie (Vs)
- quelle verticali al bedrock (Vb)

Secondo Nakamura è inoltre possibile fare una stima della forma spettrale della sorgente dei microtremori $A_s(\omega)$ (in funzione della frequenza) con la seguente relazione

$$A_s(\omega) = V_s(\omega) / V_b(\omega)$$

In cui $V_s(\omega)$ e $V_b(\omega)$ sono le ordinate spettrali delle componenti verticali del moto, rispettivamente in superficie e al tetto del bedrock.

Nakamura poi definisce come effetto di sito il rapporto spettrale $S_e(\omega)$:

$$S_e(\omega) = H_s(\omega) / H_b(\omega)$$

Dove $H_s(\omega)$ e $H_b(\omega)$ sono le ordinate spettrali delle componenti orizzontali del moto, rispettivamente in superficie e al tetto del bedrock.

Per compensare l'effetto di sito $S_e(\omega)$ dello spettro di sorgente $A_s(\omega)$ viene calcolato il rapporto spettrale modificato $S_m(\omega)$ come:

$$S_m(\omega) = S_e(\omega) / A_s(\omega) = (H_s(\omega) / V_s(\omega)) / (H_b(\omega) / V_b(\omega))$$

Nakamura assume infine che per tutte le frequenze di interesse $H_b(\omega) / V_b(\omega) = 1$, basandosi su registrazioni, sperimentalmente verificate dallo stesso, di microtremori in pozzo; quindi l'effetto di sito modificato $S_m(\omega)$ è descritto da:

$$S_m(\omega) = S_e(\omega) / A_s(\omega) = (H_s(\omega) / V_s(\omega))$$

La frequenza di risonanza è ricercata al primo picco individuato dal rapporto tra la componente orizzontale e quella verticale dei segnali registrati.

Nel 2004, nell'ambito di un progetto denominato SESAME (Site EffectS Assessment using AMbient Excitations), sono state elaborate le linee guida per l'esecuzione e l'interpretazione di misure sismiche di microtremore, creando così le premesse per la standardizzazione di questo tipo di indagine geofisica.

Le misure di microtremori possono essere inoltre utilizzate per valutazioni stratigrafiche o, alternativamente, di velocità delle onde di taglio (V_s). il metodo risulta molto semplice ed intuitivo nell'ipotesi di un sottosuolo stratificato orizzontalmente e i cui parametri variano solo con la profondità (sistema monodimensionale 1D).

Nel caso ideale di un sottosuolo formato da due strati (una "copertura" 1 e un "bedrock" 2), separati da una superficie orizzontale e separati da un diverso valore di impedenza sismica (differenti densità e/o velocità delle onde sismiche), un'onda che viaggia dal mezzo 1 al mezzo 2 viene parzialmente riflessa dall'interfaccia che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le massime ampiezze di oscillazione (condizione di risonanza) quando la sua lunghezza d'onda λ è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore del primo strato.

Cioè in altri termini, la frequenza fondamentale di risonanza f_r del mezzo 1 relativa alle onde P è

$$F_r = V_{p1} / 4h$$

Mentre quella relativa alle onde S è

$$F_r = V_{s1} / 4h$$

Teoricamente questo effetto è sommabile, cosicché la curva HVRS mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati alle varie profondità. Questo, insieme ad una stima degli spessori degli strati, che solitamente è disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sulla velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo, ivi incluse dunque stime di V_s ¹.

Riconosciuta questa capacità, e dato che, viceversa, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico; è sempre perché l'effetto è sommabile, questo, insieme ad una stima delle velocità che è solitamente disponibile almeno a livello di massima, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati.

Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto, ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticali, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- il contenuto in frequenza,
- la risposta strumentale
- l'ampiezza del segnale

quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

Quindi, l'applicazione di questa tecnica è tipica e molto efficace nel caso di coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi (Ibs-Von Seth e Wohlenberg, 1999).

¹ Il problema principale di questa visione è che i microtremori sono solo in parte costituiti da onde P o S; sono costituiti in misura molto maggiore da onde superficiali (in particolare onde di Rayleigh; tuttavia ci si può ricondurre alla risonanza delle onde P e S, perché le onde di superficie sono prodotte dall'interferenza costruttiva di queste ultime.

Per affinare il risultato interpretativo in termini di sismostrati si procede creando curve sintetiche H/V simulando il campo di onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli, secondo la teoria descritta da Aki (1964) e Ben-Menahem e Singh (1981). Il modello, opportunamente applicato, può essere considerato uno stimatore del profilo di V_s con errori confrontabili a quelli di metodi più tradizionali, per lo meno nei primi 30 m di profondità.

La tecnica dei rapporti spettrali è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di alcun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterna che sia differente dal normale rumore ambientale.

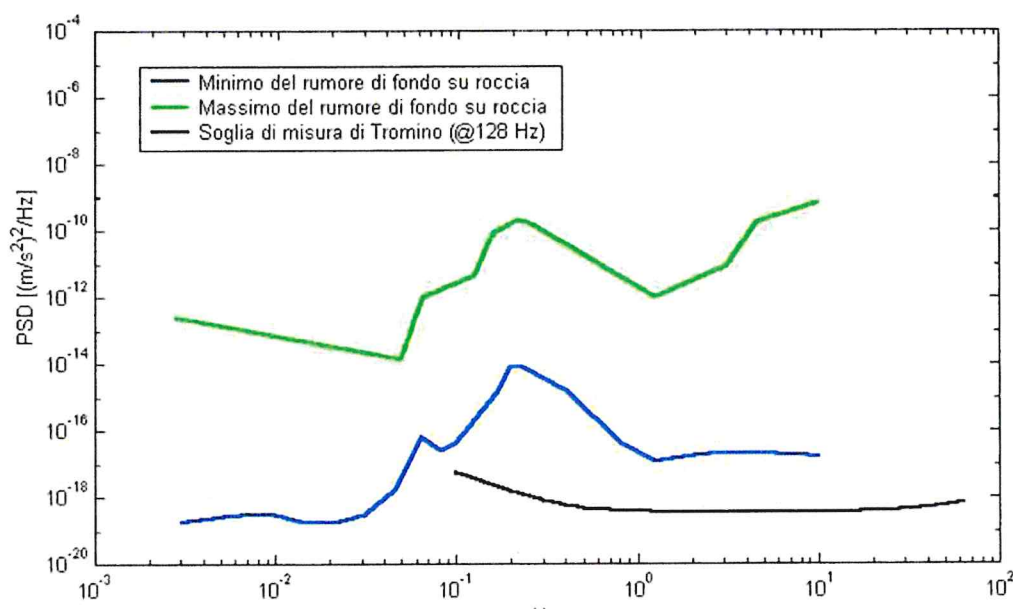
In definitiva i risultati che si possono ottenere da questo tipo di registrazione sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito, che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale, dato che si devono prendere misure necessarie nella progettazione e esecuzione degli edifici (onde evitare il pericoloso fenomeno della doppia risonanza)
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio (effettuando la misura all'interno dello stesso: questo valore è immediatamente correlabile con il primo, in termini di rischio del succitato fenomeno di doppia risonanza²)
- la velocità media delle onde di taglio V_s calcolata (previa conoscenza di riflettori noti della stratigrafia del sito) tramite fit vincolato (Castellaro e Mulargia, 2007).
- La stratigrafia del sito, in termini di spessori di strati intesi come corpi a differente impedenza o contrasto sismico

La registrazione dei microtremori presentata in questo studio è stata effettuata con il tromografo digitale TROMINO, che è uno strumento progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico.

Si tratta di un apparecchio portatile compatto di circa 10 x 7 x 14 cm e 1 kg di peso dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) ortogonali fra loro (orientati N-S, E-W e verticalmente), alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, fornito di GPS interno e senza alcun cavo esterno (essendo i dati memorizzati in scheda interna da 512 Mb), che consente le registrazioni nel campo di frequenze 0.1 – 256 Hz.

In figura si riporta la curva di rumore di Tromino messa a confronto con le curve di rumore standard calcolate per la Terra; tali curve sono espresse in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



² In particolare, dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, dalla seguente formula (Pratt): $f_{nat} dell'edificio = 10 \text{ Hz} / \text{numero di piani}$. L'eventuale coincidenza della frequenza naturale del sito con quella dell'edificio provocherebbe i danni maggiori, dando luogo al già citato fenomeno della doppia risonanza

PRINCIPALI NOTE TECNICHE DI TROMINO

Alimentazione	2 batterie alcaline x 1.5 VDC AA
Voltaggio interno	+3.3 V, +3.6 V per la sezione analogica
Consumi	75 mW (GPS disattivato), 450 mW (GPS attivo)
Durata delle batterie	80 h di misura continua con GPS disattivato
Numero di canali	3+1 analogici
Amplificatori	tutti canali con input differenziali
Rumore	< 0.5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input	10 ⁶ Ohm
Range di frequenze	DC - 360 Hz
Frequenza di campionamento	16384 Hz per canale
Frequenze di sovracampionamento	32x, 64x, 128x
Conversione A/D	equivalente a 24 bit
Massimo input analogico	51.2 mV (781 nV/digit)
Display grafico	grafico, 128 x 64 pixel, retroilluminato
Tastiera	4 tasti a membrana
Orologio	interno, permanente con datario e allarme, può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
GPS	12 channels with time-marker (precision 1 μ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Livella	a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
Conessioni	porta USB, tipo B
Registrazione dati	memoria interna, standard 512 Mb, opzionale fino a 2 Gb
Dimensione e peso	10 x 14 x 7.7 (altezza) cm 1.1 kg contenitore di alluminio
Accoppiamento col terreno	su punte e cuscinetto reologico
Condizioni operative	temperatura - 10 / +70°C umidità 0-90% senza condensa
Impermeabilità	indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Sensori	3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione

I risultati dell'analisi sono stati ottenuti col software Grilla in dotazione allo strumento. Al fine di evitare l'inserimento di basse frequenze, sono stati corretti i dati come offset e trend ma non filtrati, come raccomandato dalla norma DIN 4150-3.

In sintesi, il segnale dei velocimetri è acquisito nel sito, nelle tre componenti, per un tempo t non inferiore a 20 minuti, e digitalizzato a 24 bit, con un idoneo accoppiamento strumento - terreno.

La registrazione è stata suddivisa in finestre di 30 secondi ciascuna, dove per ogni segmento viene eseguita l'analisi spettrale nelle tre componenti, e i rapporti spettrali sui piani orizzontale e verticale (H/V); infine vengono calcolati i rapporti spettrali medi tra tutti i segmenti.

Mediante il software Grilla, per ciascuna delle 3 componenti del moto, in base alle linee guida summenzionate, vengono effettuate le seguenti operazioni:

- divide il tracciato acquisito in finestre di lunghezza L prefissate
- elimina trend da ciascuna finestra, cioè elimina le eventuali sotto finestre contenenti transienti (la procedura indicata nelle linee guida prevede una analisi basata sul rapporto Sta/Lta in grado di riconoscere la parte stazionaria del segnale escludendo le porzioni del segnale occasionali e non cicliche, legati a sorgenti specifiche come rumori di automobili, passi, ecc.)
- ne fa il "taper" con una finestra Bartlett, per il computo degli spettri, eliminando le sottofinestre che hanno un comportamento anomalo
- fa il "pad" di ciascuna finestra con degli zero,
- calcola la trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra,
- calcola lo spettro di ampiezza per ciascuna finestra,
- liscia (smoothing) lo spettro di ogni finestra secondo varie funzioni, come la triangolare, la Konno-Ohmachi smoothing window, per l'analisi di frequenze inferiori ad 1 Hz, e la Hanning smoothing window, per frequenze superiori ad 1 Hz.
- calcola il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza, per ciascuna finestra.
- Analisi ed interpretazione dei risultati in termini di frequenza fondamentale del sito e Vs_{30}

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

Tramite opportuno modulo software, sulla base delle conoscenze approfondite delle caratteristiche geologiche del sito, si calcola la Vs_{30} nel sito di riferimento. La curva sperimentale HVSR viene fittata con una curva teorica usando come vincolo lo spessore dello strato più superficiale (o altro orizzonte) di sottosuolo, che deve essere noto.

La procedura di inversione consiste di 3 passi:

1. identificazione di un orizzonte stratigrafico superficiale (di solito ad alcuni metri di profondità),
2. identificazione del marker HVSR corrispondente,
3. fit della curva HVSR teorica utilizzando 1) e 2) come vincoli

La curva HVSR teorica è calcolata assumendo un campo di tremore con sorgenti puntuali distanti posizionate casualmente sulla superficie, ed un campo d'onde che si propagano in un mezzo stratificato 1-D, con i coefficienti di accoppiamento di Ben-Menahem e Singh (1981), correzione di stabilità di Dunkin per i propagatori e con valori di $Q=10$ indipendente dalla frequenza. Il fit della curva HVSR fornisce un modello stratigrafico sismico dell'andamento di Vs con la profondità da cui è immediato calcolare Vs_{30} .

Si riporta di seguito i report delle misure ed analisi effettuate, con relativi grafici.

INDAGINE 1

Strumento: TRZ-0081/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 29/10/21 15:57:15 Fine registrazione: 29/10/21 16:17:16

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

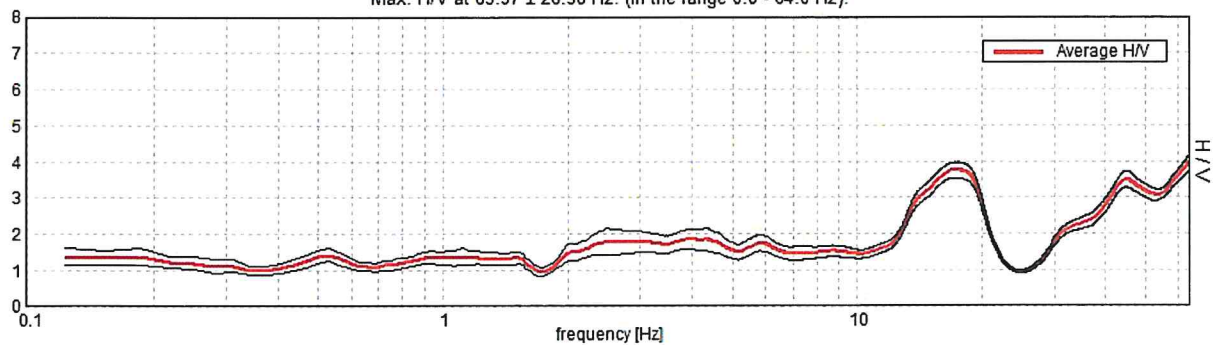
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

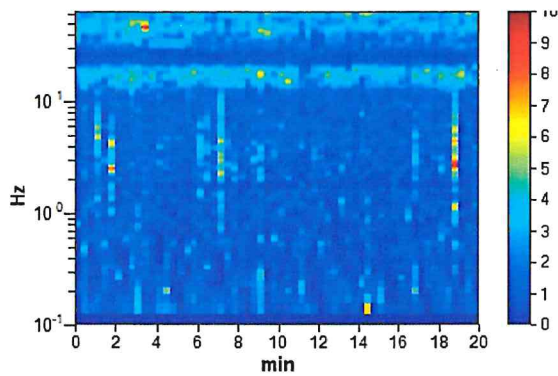
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

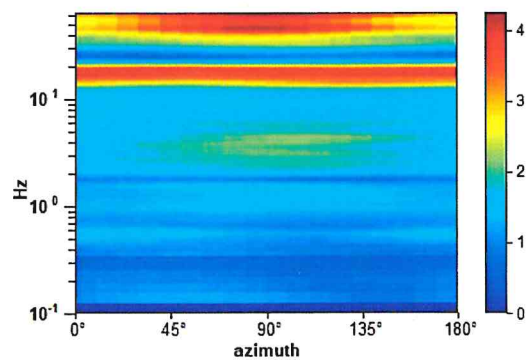
Max. H/V at 63.97 ± 26.38 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



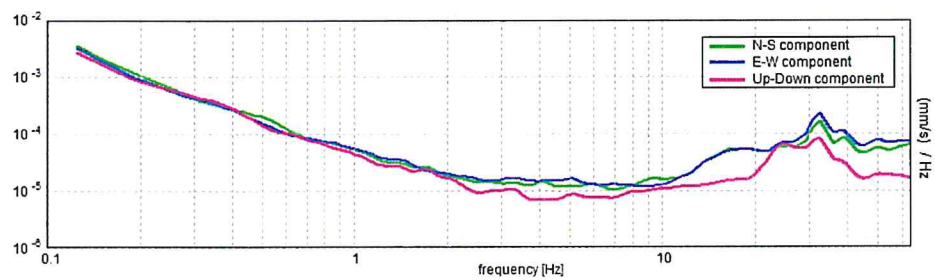
SERIE TEMPORALE H/V



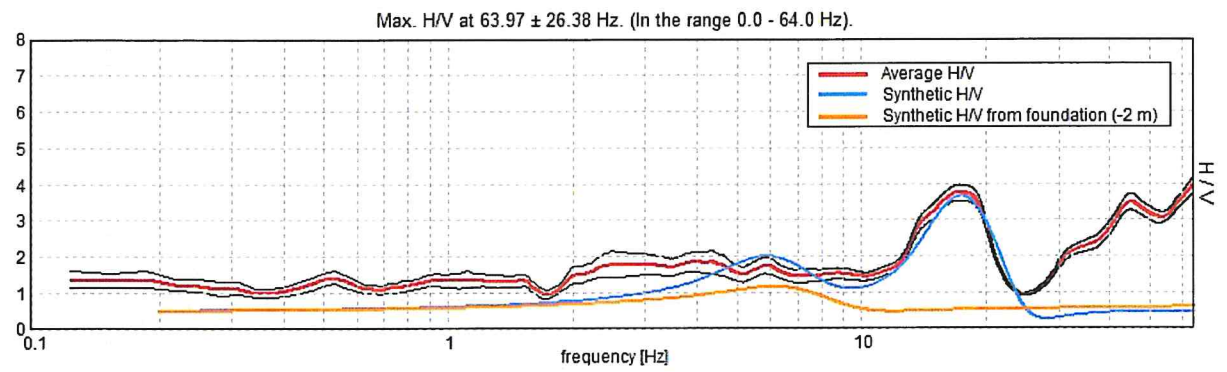
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

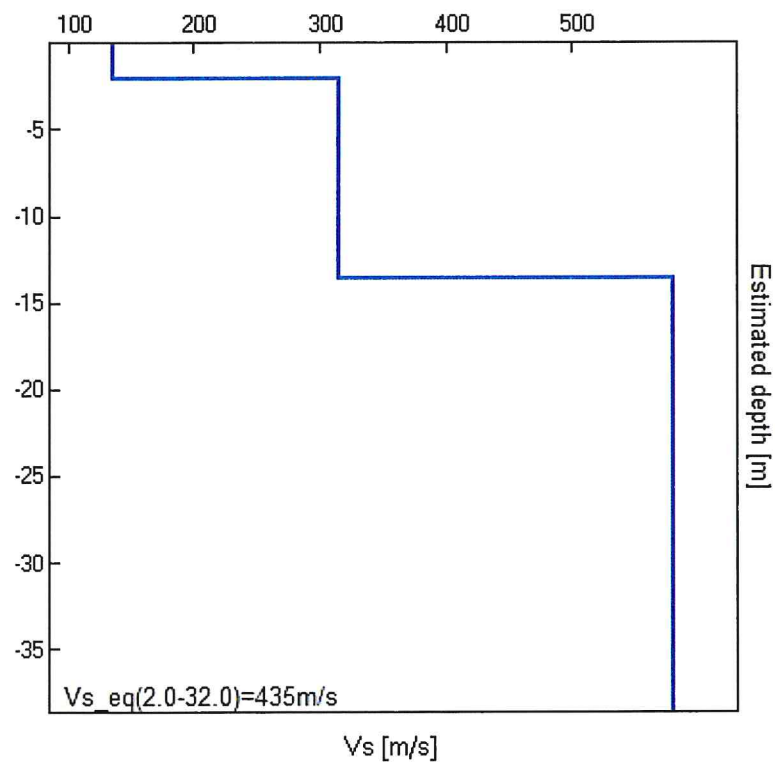


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.10	2.10	136	0.40
13.60	11.50	315	0.30
33.60	20.00	580	0.25
inf.	inf.	580	0.25

$V_{s_eq}(2.0-34.0)=435\text{m/s}$



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 63.97 ± 26.38 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$63.97 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$76762.5 > 200$	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 1026	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	31.125 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$3.97 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.41241 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$26.38141 < 3.19844$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2209 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

INDAGINE 2

Strumento: TRZ-0081/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 29/10/21 16:18:50 Fine registrazione: 29/10/21 16:38:51

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

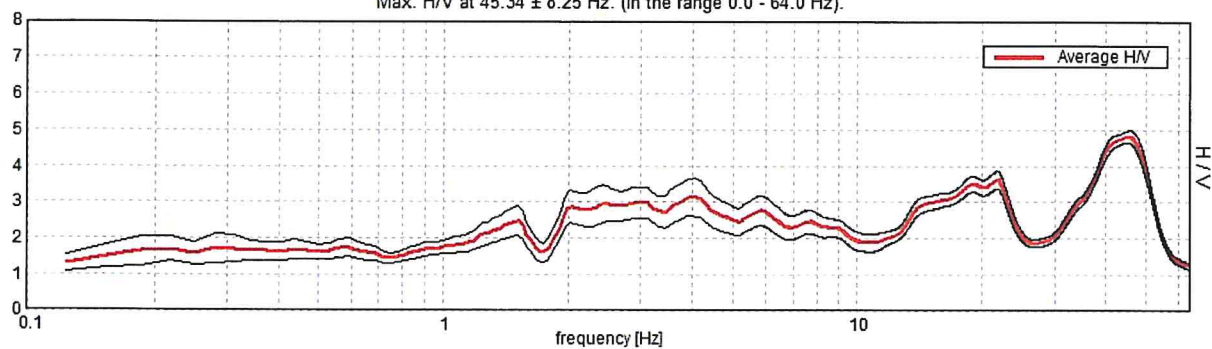
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

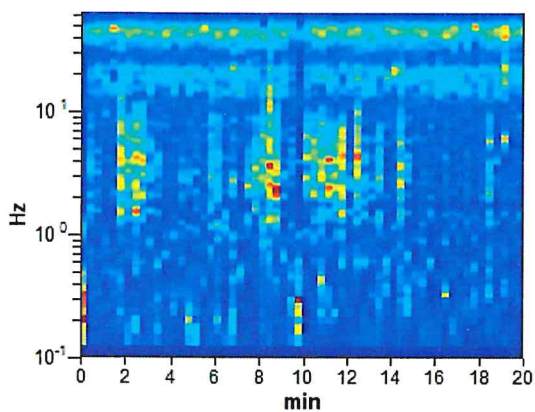
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

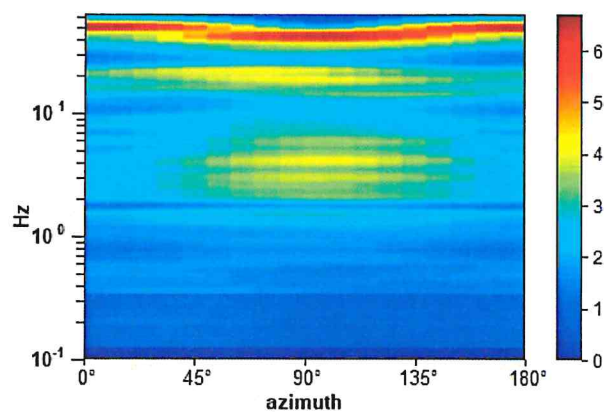
Max. H/V at 45.34 ± 8.25 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



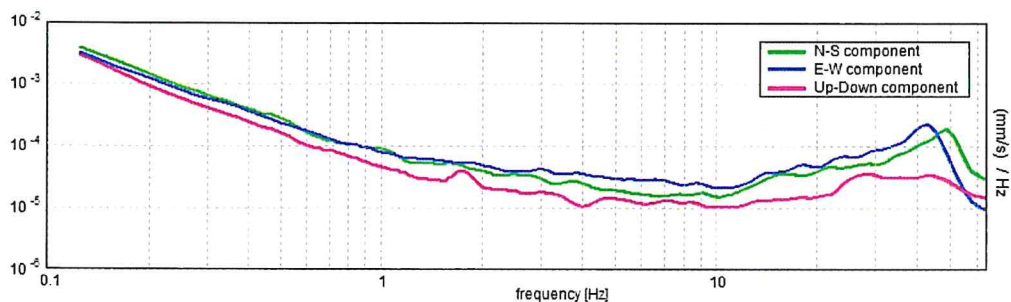
SERIE TEMPORALE H/V



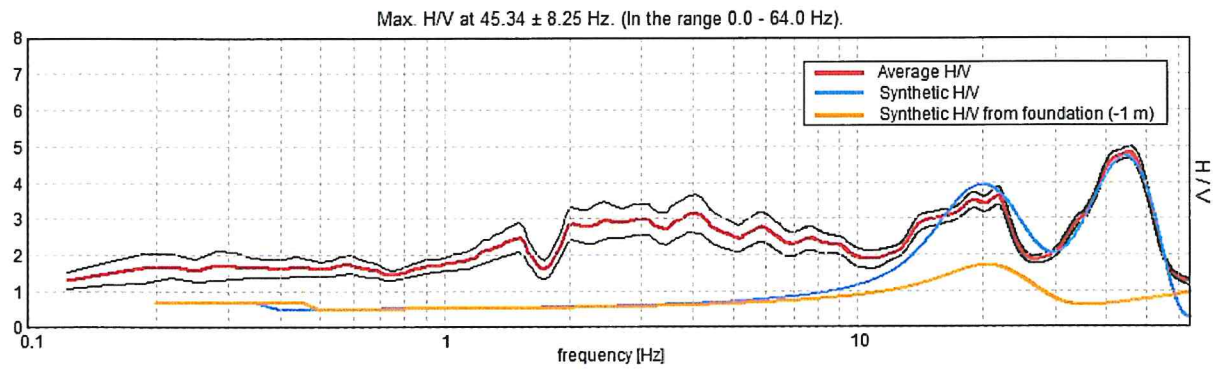
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

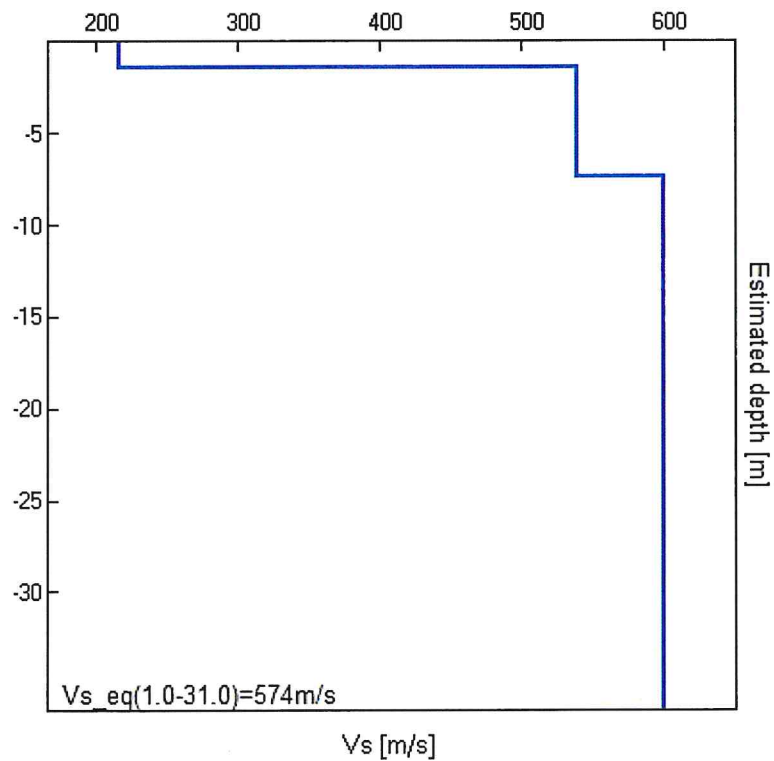


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.40	1.40	217	0.40
7.40	6.00	540	0.30
31.40	24.00	600	0.25
inf.	inf.	600	0.25

$V_{s_eq}(1.0-32.0)=574\text{m/s}$



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 45.34 ± 8.25 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$45.34 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$54412.5 > 200$	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 1324	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	31.719 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	53.656 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.81 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.18196 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$8.25064 < 2.26719$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1677 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

INDAGINE 3

Strumento: TRZ-0081/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 29/10/21 16:41:35 Fine registrazione: 29/10/21 17:01:36

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 95% tracciato (selezione automatica)

Freq. campionamento: 128 Hz

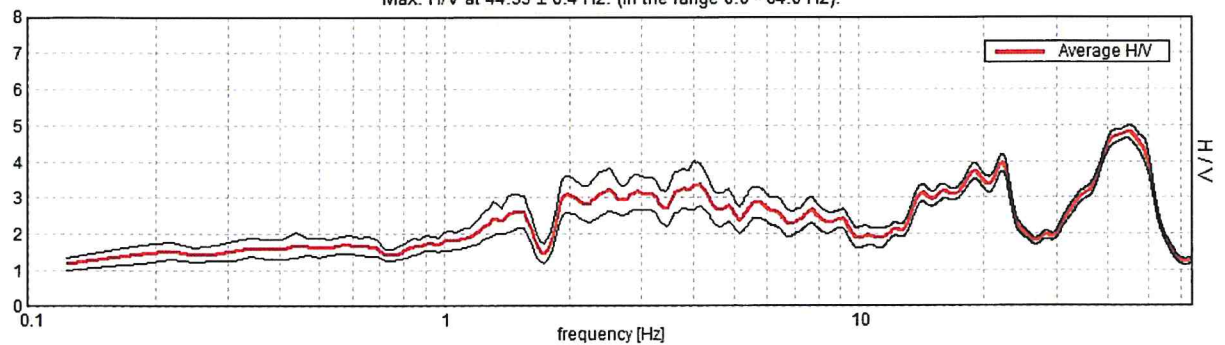
Lunghezza finestra: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

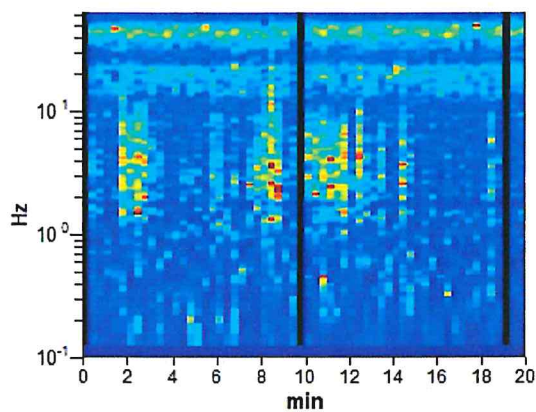
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

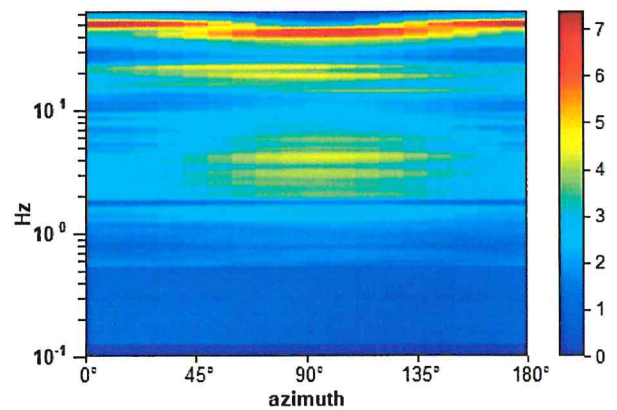
Max. H/V at 44.53 ± 0.4 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



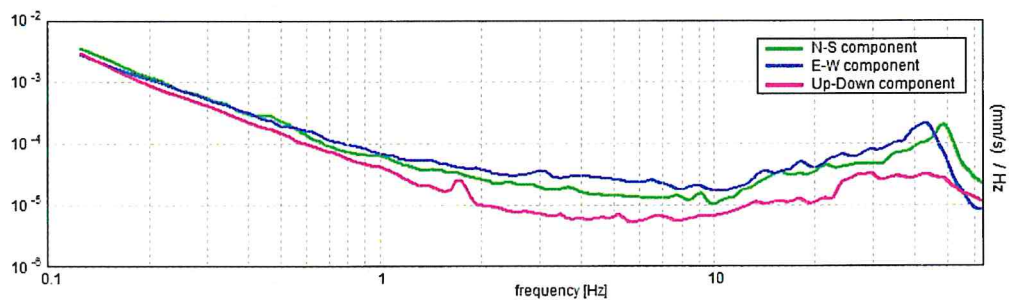
SERIE TEMPORALE H/V



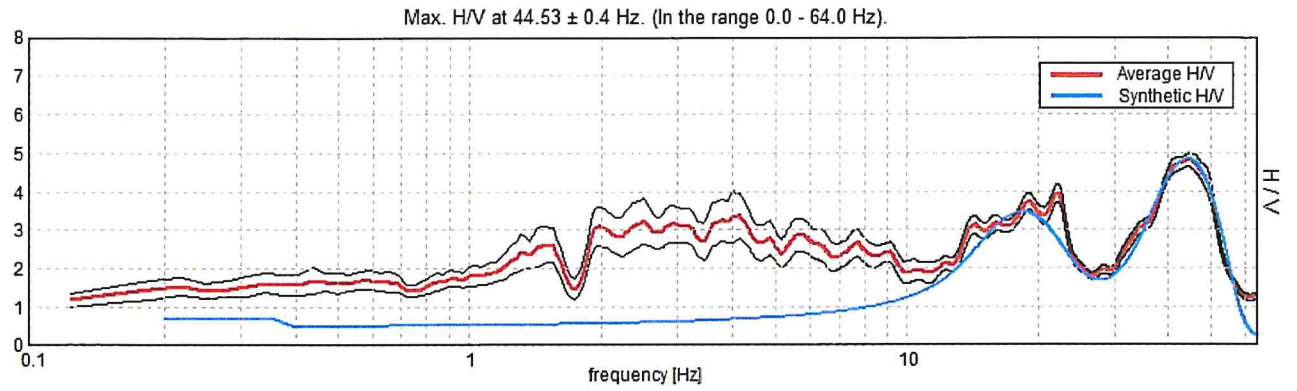
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

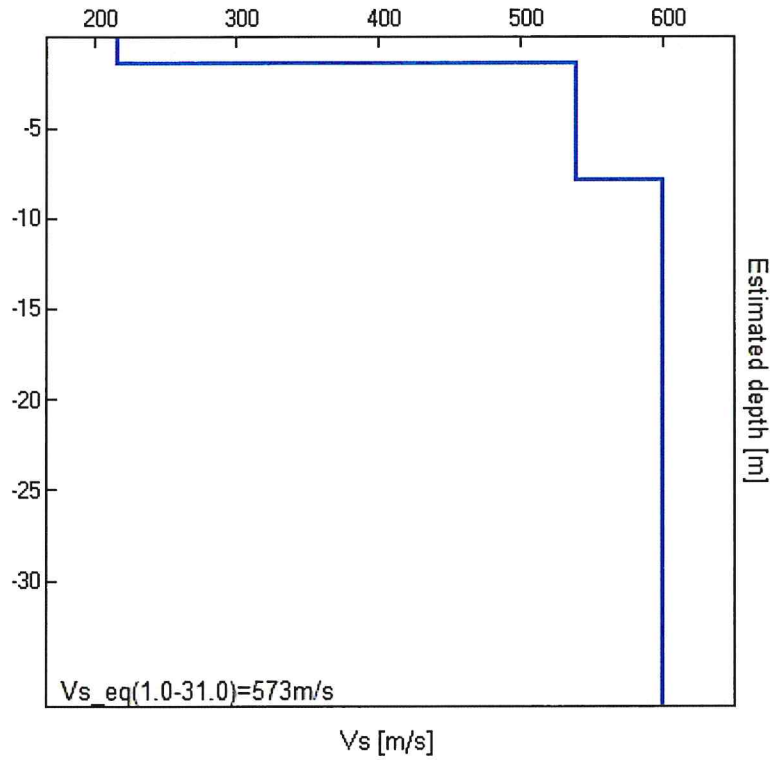


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1.40	1.40	217	0.40
7.90	6.50	540	0.30
31.90	24.00	600	0.25
inf.	inf.	600	0.25

$Vs_{eq}(1.0-32.0)=573\text{m/s}$



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 44.53 ± 0.4 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$44.53 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$50765.6 > 200$	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 1336	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	31.375 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	53.063 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.80 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.009 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.40097 < 2.22656$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1662 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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