

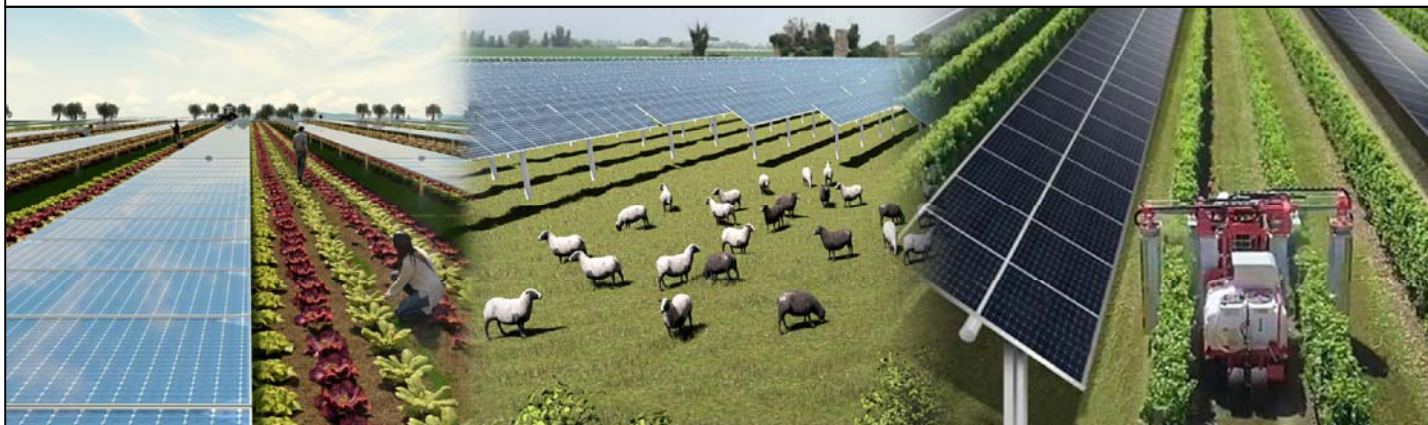


REGIONE CAMPANIA

PROVINCIA DI CASERTA

COMUNE DI CASTEL VOLTURNO

Progetto di un impianto agro-fotovoltaico per la produzione di energia elettrica ubicato nel Comune di Castelvoturno (CE) in Località Parco del Castello della potenza nominale di 14361,84 kW dotato di un sistema di accumulo dell'energia di 7200 kW, per una potenza in immissione di 12000 kW (due lotti da 6000 kW ciascuno) comprensivo delle opere di rete per la connessione dell'impianto alla rete elettrica nazionale



PROGETTO DEFINITIVO DELL'IMPIANTO DI PRODUZIONE COMPRESIVO DELLE OPERE DI RETE PER LA CONNESSIONE

ELABORATO **Relazione geologica, idrogeologica e di modellazione sismica del sito di costruzione**
(DPR 328/01, art. 41; D.M. 17/01/2018, 3.2.2, 6.2.2)

DATA: Dicembre 2021

Scala:

Nome file: D8 - SCI

PROPONENTE

Nextpower Development Italia S.R.L.
Via San Marco, n. 21 20121 Milano
(MI)

Partita IVA 11091860962
PEC:ndpitalia@legalmail.it

NextPower Development Italia S.r.l.
Via San Marco, 21
20121 Milano
P. IVA / C. F. 11091860962



ELABORATO DA:



Ing. Aniello Romano - Geol. Mattia Lettieri - Geol. Antonio Viggiano
Via Firenze, 41 - 84085 Mercato San Severino (SA) tel. e fax. 089826537

Il geologo
dott. Mattia Lettieri

Il geologo
dott. Antonio Viggiano



revisione	descrizione	data	Elab. n. D6
A			
B			
C			

INDICE

1. Premessa.....	4
2. Individuazione geografica e cartografica dell'area	8
3. Caratterizzazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica	14
3.1 Caratteri litologici e strutturali generali dell'area di studio	14
3.2 Caratteri litologici del territorio di Castel Volturno	19
3.3 Idrologia ed idrogeologia generale dell'area in esame.....	20
3.4 Idrometria	23
4. Pericolosità geologica dell'area di studio	27
4.1 Piano Stralcio Difesa Alluvioni Basso Volturno	27
4.2 Carta della zonizzazione ed individuazione degli squilibri e norme di attuazione	27
4.3 Compatibilità geologica del progetto	32
5. Indagini e caratterizzazione geologica e geotecnica	33
5.1 Programmazione ed esecuzione delle indagini geognostiche in sito.....	33
5.2 Assetto stratigrafico dell'area di studio.....	37
5.3 Prove penetrometriche statiche del tipo C.P.T. (Cone Penetration Test)	40
5.4 Prove penetrometriche dinamiche continue.....	46
5.5 Prelievo del campione di terreno indisturbato.....	50
5.6 Prove geotecniche di laboratorio	51
6. Modello geologico e caratteristiche geotecniche medie dei terreni.....	52
6.1 Unità litotecniche riscontrate e caratteristiche geotecniche dei terreni	52
7. Modellazione sismica ed indagini geofisiche.....	55
7.1 Prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves)	55
8. Considerazioni sul rischio sismico	73
8.1 Indicazione della zona sismogenetica.....	73
8.2 Inquadramento geologico-geofisico della Campania	80
8.3 Stratigrafia ed assetto morfo-strutturale della Piana Campana.....	83
8.4 Sismicità storica dell'area di studio.....	86
8.5 Classificazione sismica di Castel Volturno	91

8.6	Zonazione del territorio comunale in prospettiva sismica	97
9.	Risposta sismica locale.....	98
9.1	Categoria di sottosuolo	99
9.2	Categoria topografica	104
9.3	Condizioni di amplificazione stratigrafica e topografica	104
10.	Caratterizzazione sismica secondo le N.T.C. 2018 (D.M. 17.01.2018)	106
11.	Verifica delle pericolosità dovuti agli effetti cosismici	116
11.1	Stabilità nei confronti della liquefazione	117
12.	Compatibilità geologica, idrogeologica e geomorfologica del progetto proposto.....	125
13.	Considerazioni conclusive	129

Allegati alla relazione fuori testo:

- *Tavola D6.1: Planimetrie di inquadramento territoriale e zonizzazione PUC. Scale varie*
- *Tavola D6.2: Carta Tecnica Numerica Regionale. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.3: Carta geolitologica. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.4: Carta geomorfologica e della stabilità. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.5: Carta idrogeologica. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.6: Carte del Piano di tutela delle acque Regione Campania. Scala 1:50.000*
- *Tavola D6.7: Carte dell'ex Autorità di bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.8: Carta di ubicazione delle indagini eseguite in sito e di quelle del PUC. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.9: Carta di ubicazione delle indagini in sito ed elaborato fotografico. Scala 1:1.000*
- *Tavola D6.10: Carta della zonazione sismica e della categoria di sottosuolo scala 1:2.000*
- *Tavola D6.11: Sezioni di correlazione litostratigrafica e litotecnica. Scala 1:100/1:1.000*
- *Tavola D6.12: Fascicolo delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite in sito e disponibili*
- ✓ *Certificati delle prove penetrometriche statiche C.P.T.*
- ✓ *Rapporto delle prove penetrometriche statiche C.P.T.*
- ✓ *Certificati delle prove geotecniche di laboratorio*
- ✓ *Rapporto delle prove penetrometriche dinamiche continue*
- ✓ *Indagini disponibili realizzate per il PUC di Castel Volturno*

1. Premessa

Su incarico ricevuto dalla soc. **NEXTPower DEVELOPMENT ITALIA S.r.l.**, con sede in Milano alla Via San Marco n°21 – P.IVA 11091860962, i sottoscritti geologi dott. Mattia Lettieri, iscritto all'Albo dei Geologi della Regione Campania con n° 1448 e dott. Antonio Viggiano, iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Campania con n° 2397, con studio in Mercato San Severino (SA) alla Via Firenze n°41, redigono la presente relazione geologica, idrogeologica, di compatibilità idrogeologica e di modellazione sismica del sito di costruzione (DPR 328/01, art. 41; D.M. 17/01/2018, 3.2.2, 6.2.2;) per il progetto denominato "Impianto agro-fotovoltaico agro-fotovoltaico per la produzione di energia elettrica ubicato nel Comune di Castel Volturno (CE) in località Parco del Castello della potenza nominale di 14361,84 kW dotato di un sistema di accumulo dell'energia di 7200 kW, per una potenza in immissione di 12000 kW (due lotti da 6000 kW ciascuno) comprensivo delle opere di rete per la connessione dell'impianto alla rete elettrica nazionale.

Come si evince dalla documentazione tecnica progettuale fornita agli scriventi dalla committenza, il progetto prevede la realizzazione di un impianto agro-fotovoltaico, ovvero un impianto caratterizzato da un utilizzo "ibrido" di terreni che saranno infatti utilizzati sia per la produzione agricola che per la produzione di energia elettrica del tipo ad inseguitori monoassiali, con sistema di accumulo (energy storage system), sito nel Comune di Castelvolturno (CE) in Località Parco del Castello.

Per quanto riguarda l'impianto di produzione, esso è suddiviso in due lotti di impianto e avrà potenza nominale complessiva di 14361,84 kW, pari alla somma delle potenze nominali dei moduli fotovoltaici installati, comprensivo delle opere di connessione alla rete di E-Distribuzione spa ricadenti nel medesimo comune di Castel Volturno. L'area dove sorgerà l'impianto fotovoltaico ha un'estensione di circa 19,5 ettari, è attualmente utilizzata ai fini agricoli e ricade in aree a destinazione Agricola e dell'edilizia diffusa esistente secondo il PUC del Comune di Castel Volturno.

L'impianto è configurato con un sistema ad inseguitore solare monoassiale di tilt. L'inseguitore solare orienta i pannelli fotovoltaici posizionandoli sempre nella direzione migliore per assorbire più radiazione luminosa possibile. Prevede l'installazione di 142010 pannelli fotovoltaici bifacciali da 610 W per una potenza complessiva di generazione di 86.626,10 kWp, raggruppati in stringhe e collegate ai rispettivi inverter. L'impianto è configurato con un sistema ad inseguitore solare monoassiale di tilt. L'inseguitore solare orienta i pannelli fotovoltaici posizionandoli sempre nella direzione migliore per assorbire più radiazione luminosa possibile. Prevede l'installazione di 23.544 pannelli fotovoltaici bifacciali da 610 W per una potenza complessiva di generazione di 14361,84 kWp, raggruppati in stringhe e collegate ai rispettivi inverter.

Per l'impianto saranno realizzate n. 6 cabine elettriche per la conversione DC/AC e per l'elevazione della potenza a media tensione 20 kV.

Sono previste inoltre cabine storage per il sistema di accumulo, cabine ad uso promiscuo e locale tecnico, cabine ad uso locale O&M (gestione e manutenzione) a servizio dell'intero impianto, e le cabine utente e di consegna per la connessione alla rete elettrica nazionale. In un'ottica di efficientamento degli impianti e degli investimenti, il progetto prevede la realizzazione di un sistema di accumulo agli ioni di litio di 7,2 MW di potenza (3,6 MW per ciascun lotto) e con una capacità di 24,4 MWh. Il sistema di accumulo, alloggiato in nove cabine del tipo container standard ISO 20', sarà alimentato sia dall'impianto di produzione che dalla rete di e- distribuzione.

L'impianto sarà idoneamente dotato dei dovuti sistemi di allarme e videosorveglianza. Saranno realizzati una rete di cavidotti interrati interni al campo fotovoltaico per la distribuzione della corrente continua e per la distribuzione della corrente alternata in bassa tensione per l'alimentazione dei servizi ausiliari. Saranno realizzati una rete di cavidotti interrati interni al campo fotovoltaico in media tensione ed esterni al campo fotovoltaico per la connessione dell'impianto alla Cabina Primaria di E-Distribuzione.

È prevista la costituzione di una fascia arborea-arbustiva perimetrale di 10 metri con la finalità di mitigazione e schermatura paesaggistica. L'allaccio alla rete di distribuzione dell'impianto di produzione prevede per ciascun lotto di impianto la realizzazione di una nuova cabina di consegna collegata in antenna da CP Castel Volturno con nuova LMT 20KV in cavo sotterraneo AL 185 mmq di circa 2,5 km, e richiusura MT su linea dedicata all'altro lotto. Per ciascun lotto di impianto la potenza richiesta in immissione è pari a 6 MW.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnici questo studio geologico-tecnico è stato redatto secondo le disposizioni della L.R. 9/83 "Norme per l'esercizio delle funzioni regionali in materia di difesa del territorio dal rischio sismico", nonché in accordo con quanto previsto dalle più recenti normative in materia di rischio sismico (D.G.R. 5447/02 "Aggiornamento della classificazione sismica dei Comuni della Regione Campania", O.P.C.M. n. 3274/03 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"; D.M. 17.01.2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni") e con le disposizioni del D.M. 11.03.88 e relativa Circolare Applicativa.

Inoltre il presente studio è stato effettuato anche in ottemperanza alle indicazioni del Piano Stralcio Assetto Idrogeologico - rischio frane (PSAI – Rf) dei territori dell'ex Autorità di Bacino Liri-Garigliano e Volturno, Bacino Liri- Garigliano e Volturno, approvato con D.P.C.M. del 12/12/2006 (Gazzetta Ufficiale del 28/05/2007, n.122) e successivamente con D.P.C.M. del 07/04/2011 approvato per i comuni di cui all'allegato B (pubblicato su Gazzetta Ufficiale del 15/11/2011, n.266), nonché a quelle Piano Stralcio Assetto Idrogeologico – rischio idraulico (PSAI-Ri) dei territori dell'ex Autorità di Bacino Liri-Garigliano e Volturno, Bacino Liri-Garigliano approvato D.P.C.M. del 12/12/2006 (pubblicato su Gazzetta Ufficiale del 28/05/2007 n.122).

La presente analisi fornisce un inquadramento geologico, geomorfologico, idrogeologico e geotecnico dell'area oggetto di studio ed è supportata dalle risultanze delle indagini geognostiche

eseguite dagli scriventi nell'area oggetto d'intervento, nonché dagli studi tematici effettuati dall'ex citata Autorità di Bacino e dal Comune di Castel Volturno per la redazione del PUC.

Questo lavoro si prefigge, quindi, di evidenziare le possibili problematiche connesse alle condizioni di assetto idrogeologico in cui versa attualmente il territorio indagato fornendo tutti i suggerimenti necessari per eseguire le scelte tecniche operative più idonee. L'indagine eseguita si è articolata nelle seguenti quattro fasi di studio principali:

1. *Fase preliminare*: la prima fase ha riguardato la raccolta di tutti i dati disponibili presso gli enti pubblici preposti (Comune di Castel Volturno, ex Autorità di Bacino Liri-Garigliano e Volturno) e del materiale bibliografico riguardante l'area in esame.
2. *Fase conoscitiva di base*: durante la seconda fase è stato effettuato il riconoscimento dei lineamenti geologici, geomorfologici e dell'assetto strutturale della zona, dello stato idrogeologico superficiale e sotterraneo, controllo, integrazioni o aggiornamenti delle cartografie di base già redatte per la zona di studio dal dott. Geologo Giuseppe Doronzo per la redazione del P.U.C del Comune di Castel Volturno e da altri enti pubblici.
3. *Fase degli accertamenti di dettaglio*: la terza fase si è svolta prima mediante il rilevamento geologico di campagna, al fine di verificare e aggiornare con rilievi di dettaglio gli aspetti geologici e geomorfologici relativi al territorio in studio, e successivamente con l'analisi delle indagini geognostiche eseguite e disponibili con la successiva elaborazione ed interpretazione dei dati.
4. *Elaborazione dei dati*: infine si è pervenuti alla stesura della relazione geologica, idrogeologica e di modellazione sismica del sito di costruzione, che illustra le conclusioni cui si è approdati in fase di sintesi al fine di verificare la compatibilità dei lavori di progetto in relazione alla stabilità della zona ed alle condizioni di assetto idrogeologiche attualmente presenti.

I contenuti della presente relazione geologica e idrogeologica, di compatibilità idrogeologica e di modellazione sismica del sito di costruzione, sono i seguenti:

- inquadramento geologico, idrogeologico e geomorfologico dell'area;
- analisi e considerazioni sulle indagini geognostiche e sismiche eseguite sui siti di specifico interesse e su quelle disponibili per l'area di studio;
- caratterizzazione dei parametri geotecnici medi dei litotipi del sottosuolo in esame;
- indicazione della zona sismogenetica, della classificazione sismica regionale e della sismicità storica dell'area di studio;

- indicazione della fattibilità dell'intervento in relazione all'assetto idrogeologico della zona ed in base ai risultati ottenuti dai punti precedenti.

L'obiettivo finale che si vuole raggiungere con il presente studio è quello di valutare la Risposta Sismica di Sito che ha avuto lo scopo di definire, in tutti i suoi dettagli, le caratteristiche del sito di fondazione e del sottosuolo significativamente interessato dalle opere di progetto definendo, come previsto nella nuova normativa per le costruzioni in zona sismica, la Categoria di sottosuolo e le condizioni topografiche. L'attenzione alle caratteristiche geolitologiche, geosismiche e geotecniche a livello di sito, nasce dalla constatazione ormai ben nota che un deposito incoerente, poggiate su un basamento rigido, può modificare sostanzialmente la composizione spettrale ed il livello energetico dell'evento sismico determinando l'amplificazione di alcune frequenze.

La definizione di tali amplificazioni è essenziale per valutare la pericolosità di un sito potendo essa essere di livello anche molto maggiore di quello relativo alle stesse differenziazioni energetiche legate alla Classificazione. Il Rischio per una struttura sottoposta ad uno stress sismico dipende, infatti, non solo dalla vulnerabilità propria della struttura edilizia, ma anche, e forse principalmente, dall'intensità delle componenti a varie frequenze contenute nel segnale sismico ed in particolare quello relativo alle onde S, che, emergendo in genere verticalmente, producono sollecitazioni orizzontali alle costruzioni.

Per la ricostruzione del modello geologico, geotecnico e sismico del sito di specifico interesse, è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche in sito consistente nella realizzazione di n°3 prove penetrometriche statiche del tipo CPT, n°2 prove penetrometriche dinamiche continue e n°2 prospezioni sismiche M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh*).

Ad integrazione delle suddette indagini sono state prese in considerazione anche le indagini geognostiche realizzate dal Comune di Castel Volturno per la redazione del P.U.C. su terreni simili ed appartenenti alle stesse formazioni geologiche dell'area di studio, consistenti in sondaggi a carotaggio continuo per la ricostruzione della stratigrafia della zona, prove S.P.T. in foro di sondaggio e prove di laboratorio per la determinazione dei parametri geotecnici dei terreni.

Tali attività hanno permesso di ricostruire il modello geologico del sito di studio e, nel contempo, di ricavare i principali parametri dei terreni del sottosuolo di interesse geotecnico e sismico, al fine di conoscerne e studiarne il comportamento in relazione alle caratteristiche strutturali e dimensionali dell'opera di progetto.

L'insieme dei dati acquisiti, a parere degli scriventi, risulta sufficiente a riconoscere e descrivere i parametri necessari ad inquadrare la tematica trattata e consente di giungere responsabilmente al parere di competenza, in ordine all'incarico ricevuto.

2. Individuazione geografica e cartografica dell'area

Il territorio del Comune di Castel Volturno si estende per una superficie di mq. 72.230.000 ed è attraversato dal più grande fiume regionale, il Volturno, affiancato dal corso del Savone e dai Regi Lagni. In riferimento alla cartografia Ufficiale, geograficamente il territorio esaminato ricade nella Carta Topografica Programmatica della Provincia di Caserta, prodotta dalla regione Campania in scala 1:25.000, nella TAV. N.14 – Mondragone (Quadrante 171-II) e nella TAV. N. 15 – Grazzanise (Quadrante 172-III) (Fig.1).

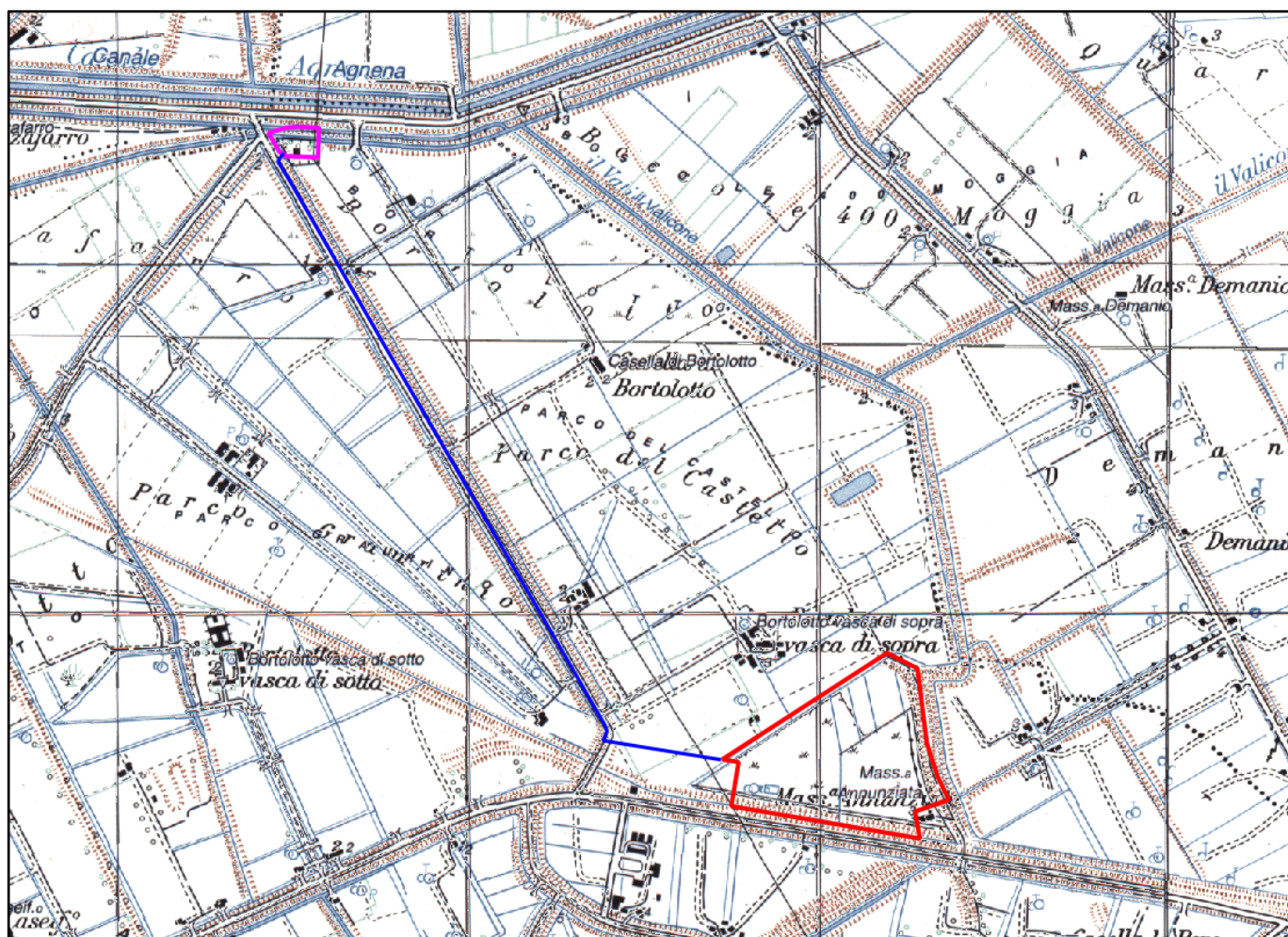





Fig. 1 – Stralcio della Carta Topografica Programmatica della Provincia di Caserta - Base cartografica 1:25.000

Legenda

-  Sito dell'area dell'impianto agro-fotovoltaico da realizzarsi in località Parco del Castello
-  Percorso elettrodotta interrato
-  Cabina Primaria di Castel Volturno

Topograficamente la zona in esame si sviluppa ad una quota media di circa 2,5 m s.l.m. su un'area pianeggiante posta nel settore nord-ovest del territorio comunale, in destra orografica del Fiume Volturno, a sud del Canale Agnena e a nord del Canale Vena Grande.

Nell'ambito della Carta Tecnica Numerica Regionale, in scala 1:5.000, la zona di studio è compresa nei seguenti quadranti (Fig. 2):

- Elementi n°429121 – Casella di Bortolotto; n°429122 – Centro Sperimentale Agricolo.

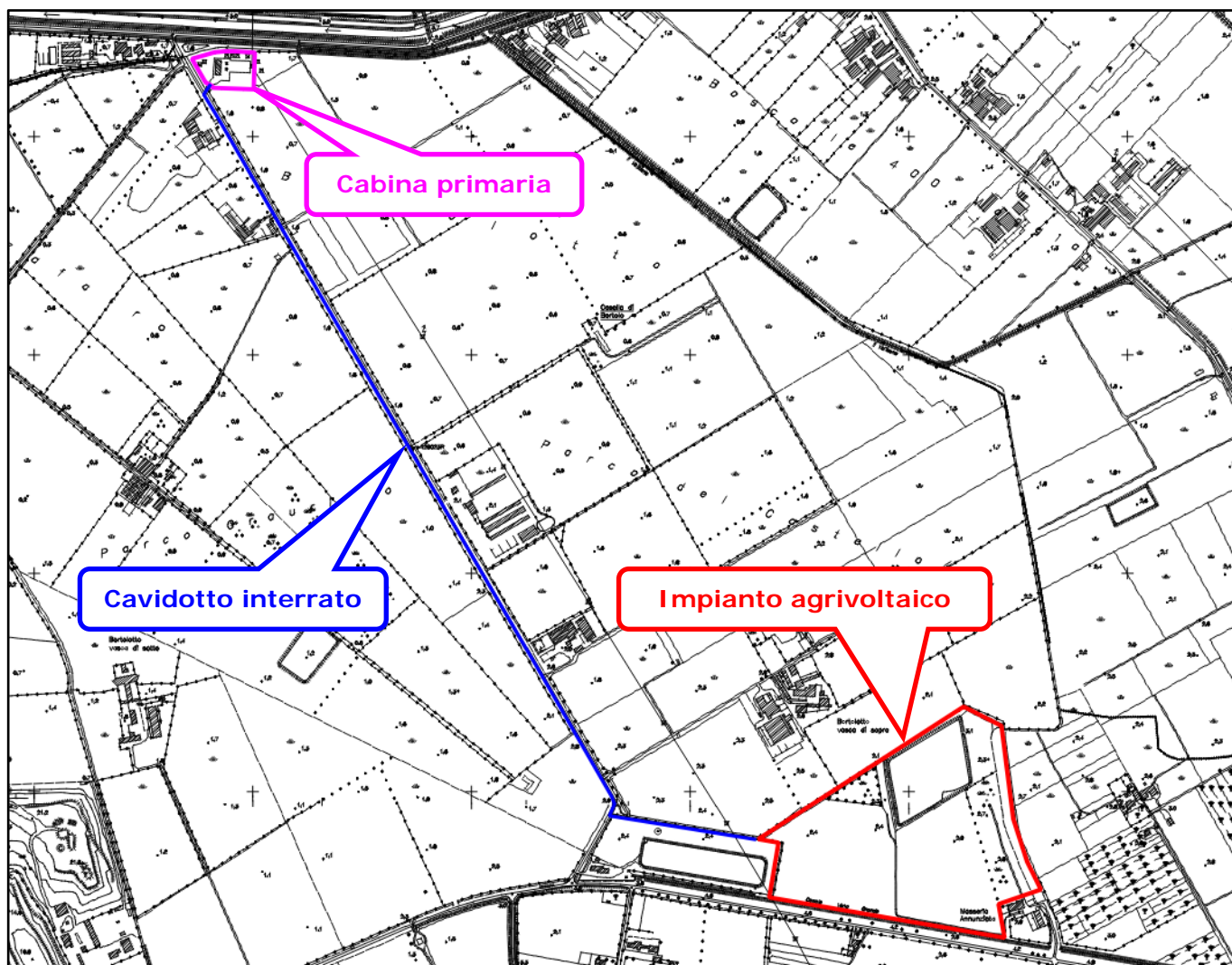
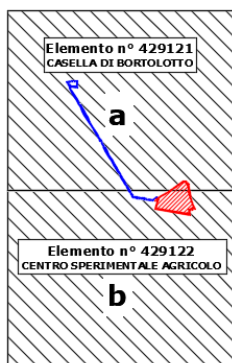


Fig. 2 - Stralcio aerofotogrammetrico della Carta Tecnica Numerica Regionale



Il Comune di Castel Volturno ha adottato con Delibera di Giunta n. 49 del 17 giugno 2021 il Piano Urbanistico Comunale. Il Puc è lo strumento urbanistico generale del Comune e disciplina la tutela ambientale, le trasformazioni urbanistiche ed edilizie dell'intero territorio comunale, anche mediante disposizioni a contenuto conformativo del diritto di proprietà.

L'area di impianto e le opere connesse ricadono in Zona E - area agricola e dell'edilizia diffusa esistente (Elaborato H.1.2 Piano Operativo – Zonizzazione del territorio comunale) (Fig. 3).

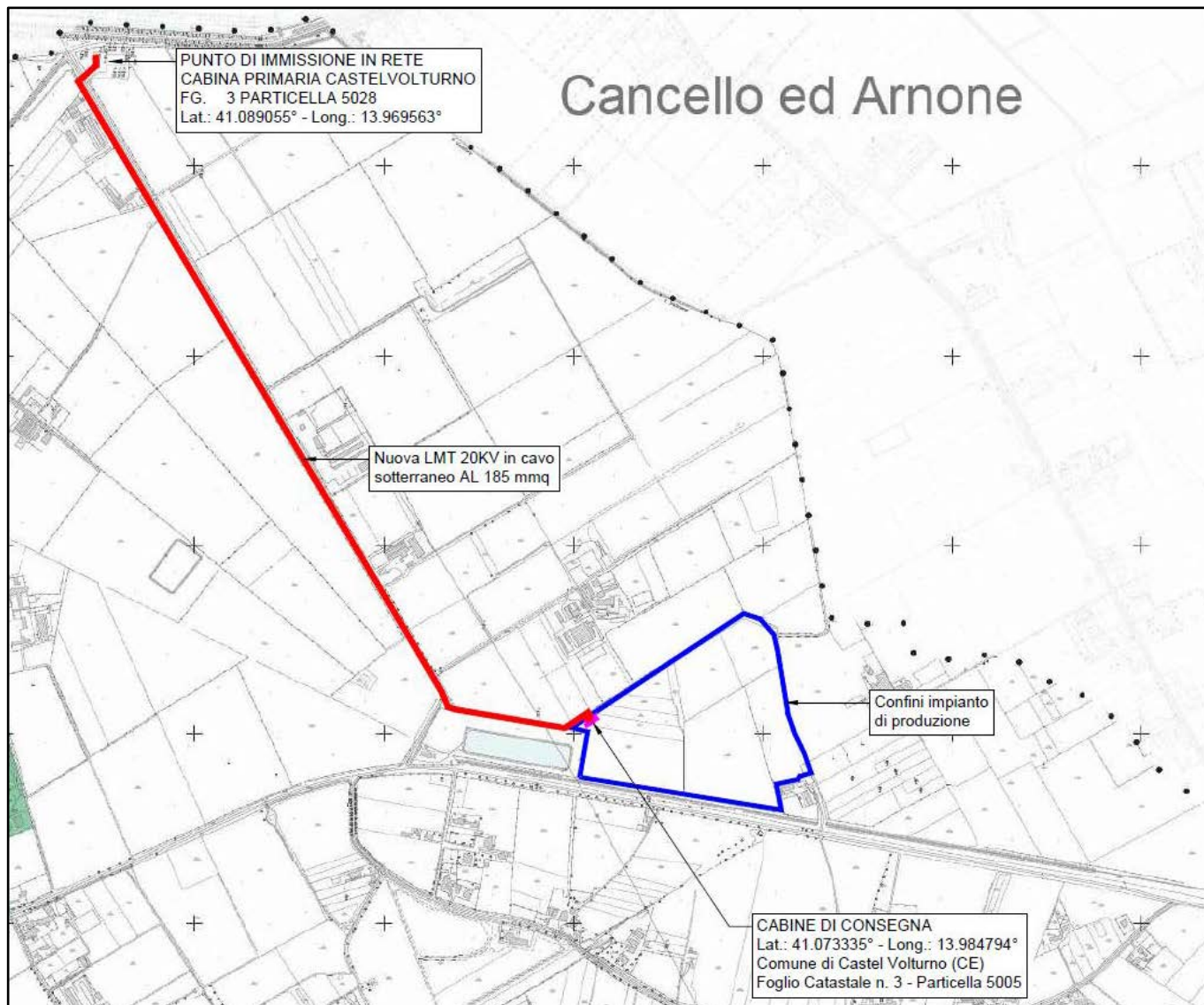


Fig. 3 - Stralcio della Zonizzazione del PUC di Castel Volturno

Legenda



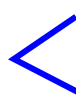
Zona E - area agricola e dell'edilizia diffusa esistente

L'impianto fotovoltaico sarà realizzato in località Parco del Castello su un lotto di terreno avente una superficie di circa 19,5 ha (Figg. 4-5-6) e riportato in catasto al Foglio n°3 con particella n°5005. Il sito può essere identificato alle seguenti coordinate geografiche: Lat. 41° 4'24.26"N – Long. 13°59'16.41"E (Foto 1-2).



Fig. 4 - Ortofoto delle aree di studio ubicate nel Comune di Castel Volturno - Fonte Google Satellite

Legenda

 **1** Punto di scatto della foto e relativo numero



Sito dell'area dell'impianto agro-fotovoltaico da realizzarsi in località Parco del Castello



Percorso elettrodotto interrato



Cabina Primaria di Castel Volturno



Fig. 5 – Layout dell'impianto agrovoltaico previsto in località Parco del Castello del Comune di Castel Volturno



Fig. 6 – Particolare di un inseguitore monoassiale est-ovest in un sistema agro-fotovoltaico



Foto 1 – Panoramica di una zona che sarà interessata dall’impianto fotovoltaico



Foto 2 – Panoramica di una zona che sarà interessata dall’impianto fotovoltaico

3. Caratterizzazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica

3.1 Caratteri litologici e strutturali generali dell'area di studio

Dal punto di vista geologico generale l'area in esame è rappresentata nel Foglio 172 "Caserta" della Carta Geologica d'Italia in scala 1/100.000 (Fig. 7).

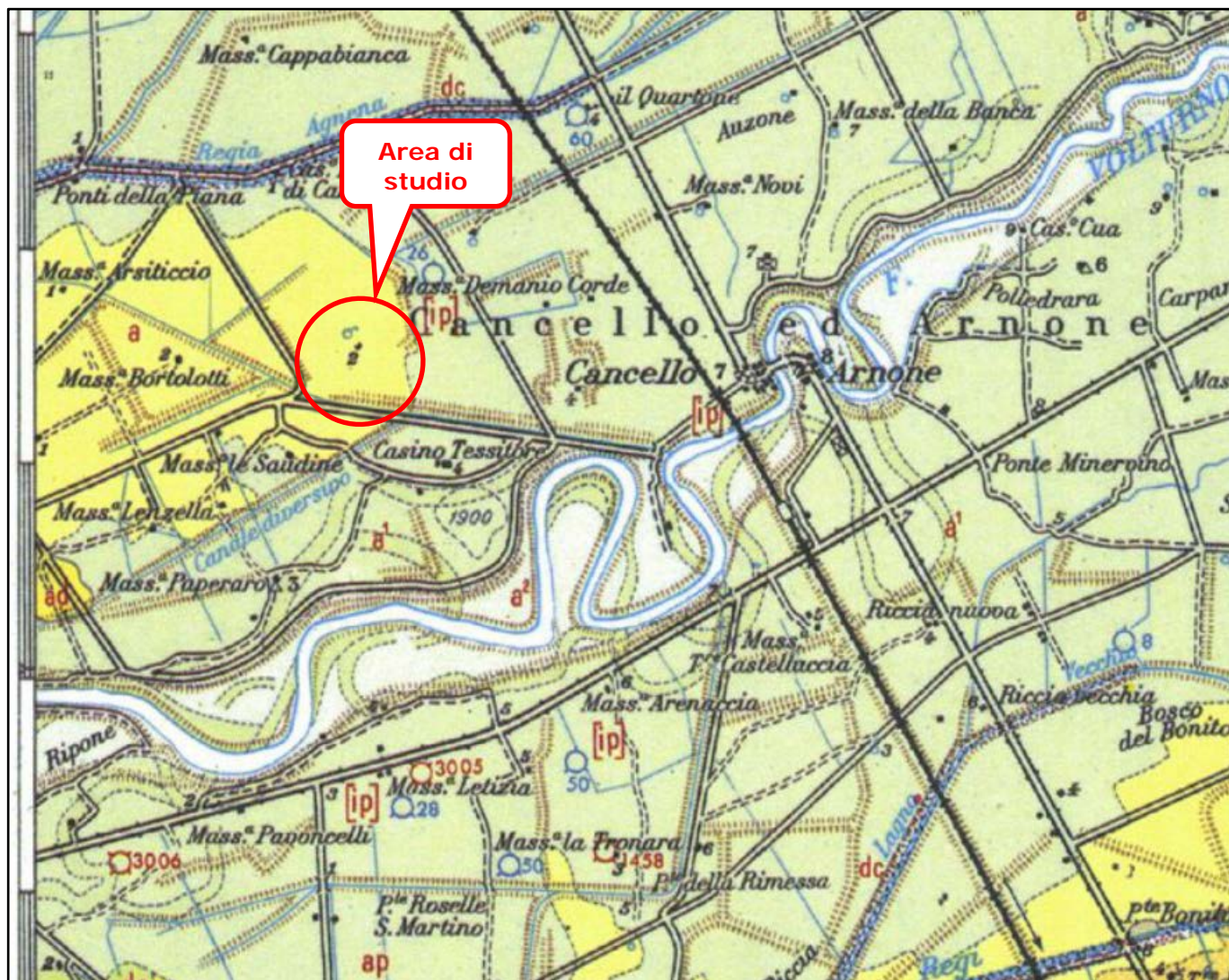
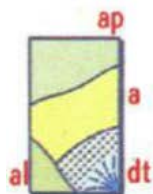


Fig. 7 - Stralcio (fuori scala) della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000
Foglio n°172 "Caserta"

Legenda



Terreni umiferi scuri e di colmata della bonifica del basso Volturno: terreni limosi ed argillo-limosi grigi e verdognoli della pianura (da 10 a 38 m di spessore), con sottostanti lapilli pomicei ed intercalazioni di torba in lenti allungate (Lagno Vecchio a SE di Cancellone, Pantano della Riccia, F. Savone), lenti arenitiche e di ciottolini (Grazzanise), terre nere ed alluvioni recenti di Pietramelara e Pietravairano (**ap**); argille sabbiose, limi, sabbie scure con lapilli e pomici dilavate, lenti ciottolose (**a**), ricoprenti, a Sud, depositi salmastri (**al**); detrito di falda sciolto o debolmente cementato e coni di deiezione (**dt**).

Il territorio comunale di Castel Volturno è ubicato in un'area pianeggiante in piena piana alluvionale della parte terminale del Volturno quota variabile, da circa 6 m a circa - 2 m s.l.m.

L'area, di forma poligonale allungata in senso SSE-NNO, presenta una morfologia, determinata dalla storia tettonica recente e dalla messa in posto (della serie ignimbratica flegrea) di materiale di deposizione alluvionale nonché dall'evoluzione della linea di costa. Si evidenziano sempre pendenze di molto inferiori al 1% ad esclusione delle marginali aree dunali, delle scarpate e/o gli argini degli alvei e degli innumerevoli specchi di acqua presenti (sia essi naturali che di origine antropica). Le pendenze si attestano, in queste piccole aree, su valori del 6-8 %

La morfologia, come detto, è subpianeggiante con quote che non superano i 9 m s.l.m. (verso SSE) e che in taluni casi arrivano a circa - 2 m s.l.m. in alcune zone depresse. E' da considerare che la quasi totalità del territorio comunale è compresa in una fascia altimetrica tra m. 0,0 e 3,0 m s.l.m. ed è da segnalare la presenza un'area leggermente in "rilievo" (3÷9 m s.l.m.), parallela alla linea di costa e larga circa 1 km, corrispondente al cordone dunare. I morfotipi caratterizzanti il territorio sono rappresentati essenzialmente da quelli tipici della morfologia costiera, quelli legati alla dinamica fluviale e quelli di origine antropica.

Per quanto attiene alla morfogenesi della costa è acclarato che il settore di Piana attraversata dal F. Volturno, grazie ad una generale tendenza alla subsidenza, ha conosciuto ambienti marini estesi fin sotto le pendici dei monti di Caserta sino a circa 130.000 anni fa (ROMANO et alii, 1964; CINQUE & ROMANO, 2001). Successivamente si realizzarono condizioni favorevoli alla sua crescita come area emersa. I ritmi della subsidenza tettonica si ridussero sin quasi ad azzerarsi e l'area venne investita dai prodotti piroclastici da flusso e da caduta di provenienza flegrea e p.p. vesuviana.

Nel settore della Piana Campana di precipuo interesse gli elementi che maggiormente, ed in tempi più recenti, hanno improntato la morfologia dell'area sono stati:

- *l'arrivo della potente coltre ignimbratica del Tufo Grigio Campano*
- *l'azione deposizionale esercitata del F. Volturno.*

Il Fiume Volturno penetra nella Piana Campana attraverso la stretta di Triflisco (a nord-est di Capua) e prima che le attività antropiche intervenissero significativamente sul suo corso, il fiume trascinava elevate quantità di materiale solido; si trattava però di elementi dalle dimensioni assai ridotte in quanto quelli più grossolani (sabbie e sabbie grosse) si erano già depositati nella piana di M.te Verna a est di Triflisco (BIGGIERO et alii, 1994). I sedimenti trascinati dalla corrente idrica e scaricati a mare hanno determinato imponenti fenomeni di protrazione della foce.

Negli ultimi 150 anni quest'ultima ha però subito una progressiva regressione, per fattori legati alla realizzazione di dighe lungo il corso del fiume (che di fatto trattengono pressochè totalmente il trasporto solido) e al prelievo di inerti dal letto fluviale (attività durate dalla fine degli anni '50 al 1974). Durante la fase di protrazione della foce si verificavano anche formazioni di barre dunari

e, talvolta, l'occlusione degli sbocchi a mare delle acque superficiali nelle aree in sinistra e in destra rispetto al dosso del Volturno.

Si segnala altresì che gran parte della costa risulta in arretramento ed in particolare quasi tutta la porzione posta a meridione della foce del Volturno, escludendo l'area immediatamente in destra e sinistra della foce dei Regi Lagni ove si evidenzia un avanzamento della linea di costa. Da aggiungere che lì dove sono state realizzate opere di difesa litoranee (siano esse longitudinali che trasversali) il fenomeno è stato contrastato e si evidenzia un avanzamento. Continuando verso meridione e fino ai limiti comunali si segnala un tratto litoraneo ancora in arretramento.

Attualmente negli ambienti costieri ora descritti troviamo i morfotipi caratteristici cioè quelli di duna (con la tipica deposizione sabbiosa) e interdunali lagunari che si conservano in pochi tratti, ovviamente a ridosso della linea di costa ed in larga parte nella porzione Sud Est del territorio.

Riguardo i morfotipi legati alla dinamica fluviale si riconoscono: aree golenali, cuspidi deltizie e meandri abbandonati. Ovviamente le aree golenali sono presenti nelle immediate vicinanze del Volturno, mentre per i Regi Lagni e Canale Agnena il corso è rettilineo e nel primo caso risulta ampiamente cementificato sulle sponde. Si rilevano, all'interno dell'area golenale (quindi ovviamente nei dintorni del Volturno) vari meandri abbandonati che in alcuni casi presentano specchi d'acqua (lago di meandro anche dell'ordine di un ettaro di superficie) ed in altri fanno oramai parte integrante del paesaggio agricolo predominante.

Una volta giunte nella Piana Campana, le acque del Volturno procedevano incassate e con tendenza a divagare. Le esondazioni delle portate di piena dall'alveo provocarono nel tempo il sopralzo dei terreni limitrofi: attualmente il Volturno si presenta pertanto, da Capua fino al mare, con l'alveo incassato nel tratto più alto di un largo ed esteso conoide da lui stesso realizzato nel corso dei millenni. Si sono evidenziati, per taluni tratti del Fiume Volturno, fenomeni di erosione delle sponde che sono stati segnalati nella carta geomorfologica.

Si evidenziano, inoltre, una serie di morfotipi di origine antropica che sono stati realizzati per varie motivazioni. Per quanto riguarda la bonifica operata nella piana (sistema di canali) è noto come l'area in questione, e più in generale intere porzioni della Piana Campana, da sempre sia stata interessata da vasti impaludamenti.

Gli interventi di bonifica più decisivi furono avviati dai Borboni, come l'inalveazione delle acque alte (cioè affluenti dai rilievi) per evitare che esondassero nella piana, reti di colatori di pianura, colmata di aree basse (impiegando le torbide dei corsi d'acqua), sistemazione delle foci a mare per evitare interrimenti e conseguenti esondazioni a monte.

A seguito del D.R. del 1923 furono realizzati ulteriori interventi di bonifica idraulica mediante opere finalizzate a ridurre il rischio di inondazione dei terreni della piana, per mezzo di un sistema continuo di arginature del Volturno da Capua al mare, al drenaggio delle zone acquitrinose mediante una nuova rete di colatori e, lungo le fasce costiere depresse, al prosciugamento meccanico mediante idrovore.

Altro massiccio intervento antropico è quello relativo alle opere realizzate come difesa per la mitigazione del rischio idrogeologico costituito essenzialmente da argini in terra in molti casi rivestiti in calcestruzzo, come nel caso del Volturno, o alvei ampiamente cementificati, come nel caso dei Regi Lagni.

Sempre esaminando forme antropiche che insistono sul territorio si segnalano una miriade di stagni, anche di grandi dimensioni (in taluni casi con superficie anche di oltre due ettari), concentrati tra il fiume Volturno ed i Regi Lagni a valle della strada a scorrimento veloce posta a monte del centro di Castel Volturno, di fatto in area urbana, creatisi per affioramento della falda in seguito all'intensa attività di escavazione per la realizzazione, in passato, di una serie di cave a fossa per lo sfruttamento, essenzialmente, di litotipi sabbiosi.

Dal punto di vista geologico l'area di studio è ubicata all'interno della Piana Campana. Essa è una vasta area pianeggiante, delimitata a Nord dal M.te Massico, a Nord-Est dai M.ti di Caserta, a Est dai M.ti di Sarno, a Sud dai M.ti Lattari e dalla Piana del Sarno e ad Ovest dal Mar Tirreno.

La Piana Campana rappresenta un grande graben, individuatosi probabilmente nel Pliocene superiore, soggetto ad un pronunciato sprofondamento durante il Quaternario.

Le linee tettoniche lungo le quali è avvenuto l'abbassamento sono ben riconoscibili ai bordi della pianura, dove si osservano faglie orientate NE-SW e NW-SE, che determinano il graduale sprofondamento delle rocce carbonatiche, appartenenti a due distinte unità tettoniche sovrapposte, affioranti tutto intorno al graben al di sotto di notevoli spessori di depositi alluvionali e vulcanici quaternari. In superficie, quindi, sono ben osservabili le strutture marginali del graben.

Le strutture recenti principali sono rappresentate da faglie normali orientate NE-SW e NW-SE, che in almeno due fasi del Quaternario hanno determinato rigetti verticali dell'ordine di qualche migliaio di metri. Le strutture mioceniche, osservabili ai margini della Piana, sono connesse ai fenomeni di sovrascorrimento che hanno interessato la copertura sedimentaria triassico-miocenica e non sono legate alle deformazioni attuali del basamento cristallino. Queste ultime hanno orientamento W-E e sono costituite da una serie di monoclinali immergenti a Nord e delimitate a Sud da faglie normali, aventi rigetti verticali fino a mille metri e che tendono ad estinguersi, verso il basso, sulle superfici di sovrascorrimento.

Le faglie recenti, cui sono connessi anche i fenomeni vulcanici del graben della Piana Campana, sono evidenti, con gli stessi orientamenti e sempre con notevoli rigetti verticali, in tutto l'Appennino Campano-Lucano.

Le aree vulcaniche marine, antistanti la Piana Campana (Isole Pontine, Ischia), sono da mettere in relazione principalmente con strutture recenti ed antiche parallele alla catena, lungo una fascia in cui, in profondità al di sotto dei depositi del Miocene superiore, Pliocene e Quaternario, si ha il probabile contatto tra la crosta assottigliata del tipo tirrenico e quella deformata ed ispessita sottostante la catena. Lungo tale fascia, si potrebbe avere la sovrapposizione della crosta del bordo orientale tirrenico sulle unità sedimentarie ricoprenti la crosta deformata del margine

continentale africano. Le strutture principali recenti che hanno controllato il vulcanismo di questa fascia, quindi, sarebbero da collegare principalmente all'assetto strutturale profondo determinatosi dal Pliocene al Quaternario.

I fenomeni vulcanici dell'area Flegrea, del Roccamonfina e del Vesuvio sono connessi a strutture recenti che interessano anche la crosta, deformatasi probabilmente per fenomeni compressivi fino al Messiniano, sostenente le unità sedimentarie della catena.

Queste zone vulcaniche sono ubicate in corrispondenza dei graben delimitati da faglie orientate NE-SW e NW-SE, là dove si individuano le zone di massimo sprofondamento.

I dati pubblicati in letteratura (Celico, 1983; CIVITA et Alii, 1973; Corniello et Alii, 1990; Ortolani & Aprile, 1978; 1985) (De Riso, 1990) indicano, un sottosuolo così articolato, a partire dai terreni più recenti a quelli più antichi:

- terreni prevalentemente sabbiosi, dunari e di spiaggia e depositi limo-argillosi di interduna, affioranti in una fascia larga circa 1-2 km prospiciente il mare;
- depositi limo-sabbiosi fluvio-palustri associati a depositi torbosi, che affiorano nella maggior parte dell'area in esame e raggiungono i massimi spessori (30 m) in prossimità del corso del Volturno;
- tufo grigio campano, spesso sormontato da piroclastiti sciolte, affiorante nel settore a nord del T. Savone; il banco di tufo si approfondisce e si assottiglia via via che ci si approssima al corso del Volturno; infatti lo spessore complessivo varia dai 40÷45 m alle pendici del M.te Massico ai 2÷3 m in prossimità del F. Volturno dove sovente il tufo ha consistenza "terrosa" ed a luoghi è assente per locali fenomeni erosivi;
- terreni sabbioso-limoso-ghiaiosi di ambiente marino, rinvenuti in perforazione alla base del tufo, che talora passano lateralmente o poggiano (in destra Volturno) su terreni granulometricamente affini ma di origine piroclastica; lo spessore è di 50÷60 m;
- terreni a granulometria fine (da limo-sabbiosi a limo-argillosi), anch'essi di probabile ambiente marino, con spessori di qualche centinaio di metri;
- depositi vulcanici antichi (tufi e lave andesitiche e basaltiche attribuibili ad attività preflegrea) con spessori notevoli;
- depositi clastici di età mio-pliocenica (profondità 3÷5 km) affioranti localmente sul versante meridionale del M. Massico;
- terreni carbonatici di piattaforma, affioranti al M.te Massico e mai raggiunti dalle perforazioni profonde eseguite nel settore baricentrico della Piana Campana poichè ribassati da "ripide" gradonate di faglia.

Dall'andamento del tetto del Tufo Grigio Campano, si osserva un aumento della profondità di questo ultimo dalle zone circostanti la Piana Campana verso il corso del fiume Volturno; la massima profondità si raggiunge nella parte terminale del corso (circa -20 m s.l.m.). La morfologia

attuale del suolo riproduce a grandi linee l'andamento del Tufo Grigio a NW dell'allineamento Napoli-Caserta; a SE di tale allineamento ad un'immersione generale del tetto del tufo verso il Vesuvio corrisponde un andamento topografico superficiale opposto.

Nella zona del basso corso del fiume Volturno i terreni di copertura hanno spessore variabile da circa 20 m a circa 40 m. In questa zona, tra Canello Arnone e Villa Literno, a luoghi, non viene rinvenuta la formazione tufacea; questa mancanza è da attribuire all'azione di processi erosivi successivi alla messa in posto dell'ignimbrite (Ortolani & Aprile, 1985).

Osservando la carta delle isopache, si nota chiaramente un andamento dello spessore della formazione ignimbritica decrescente a partire dai monti di Caserta e in un'area compresa tra il Lago di Patria e l'abitato di Giugliano e ad est di questo ultimo.

Queste zone sono di massimo spessore e coincidenti, in pratica, con le zone di minore profondità del tetto. Nell'area compresa tra il M. Massico ed il corso del fiume Volturno, la base del tufo presenta la massima depressione, variando da quota +8 m s.l.m. nei pressi del Massico a circa -30-40 m s.l.m. nei pressi del Volturno. La massima depressione corrisponde alla zona con maggiori spessori dei terreni di ricoprimento.

3.2 Caratteri litologici del territorio di Castel Volturno

Il territorio comunale di Castel Volturno è caratterizzato da una distribuzione spaziale, dei litotipi affioranti, abbastanza varia; essenzialmente sono sette le unità presenti.

Nella zona litorale, con un'estensione di 2,22 Km² circa, pari al 2,97% dell'area, sono presenti le spiagge attuali (*SA_ATT*) costituite da sabbie fini sciolte equigranulari grigie e giallastre di vario spessore. Spostandosi dalla zona litorale parallelamente alla costa e per tutto l'allineamento spostandosi verso la parte orientale del territorio comunale si passa a terreni che obbediscono, in maniera rigorosa, ai meccanismi e le modalità deposizionali delle dune litorali. Tale membro (*SA_DUN*) risulta costituito da sabbie fini e sabbie argillose, da sciolte a poco addensate con abbondanti resti di molluschi. Tali terreni, che racchiudono il 26,45% della superficie comunale, pari a 19,82 Km², e si rinvengono in superficie ad una quota tra i 0 e i 9 m s.l.m..

Procedendo ancora verso est dalla zona litorale parallelamente alla costa e solo in sinistra foce Volturno si individuano delle sabbie grigie e giallastre da poco addensate a mediamente addensate di retroduna (*SA_RETRODUN*) che rappresentano il 9,73% della superficie comunale, pari a 7,29 Km². Considerando ora il corso del Volturno, la prima evidenza è rappresentata dalle alluvioni in golena del fiume costituite da sabbie grigie sciolte ed argille grigio-azzurrognole poco consistenti (*ALL_A_GOL-V*). Tali terreni si rinvengono in una fascia posta a cavallo del fiume per circa 9,11 Km² in destra e sinistra orografica per circa costituendo circa il 12,16% del territorio comunale.

Si passa ad un'ulteriore fascia esterna rispetto a questa ora descritta e sempre, grossomodo, allineata all'asse del corso del Volturno costituita da alluvioni recenti del Volturno costituite da argille marroni e grigio-blauastre, da poco a mediamente consistenti con abbondanti resti vegetali

lignei e molluschi, e sabbie grigie poco addensate con inclusi elementi pomicei e scoriacei. Torbe (*ALL_R_V*). Costituiscono una gran parte del territorio di Castel Volturno rappresentandone il 14,50% per un'estensione di circa 10,87 Km².

Spostandosi ulteriormente ad una fascia ancora più esterna rispetto al corso del Volturno ma sempre, grossomodo, allineata all'asse del corso del fiume si segnalano depositi di transizione costituiti da argille grigie da poco a mediamente consistenti e sabbie grigie poco addensate (*AG_SA_TR*). Tali depositi di transizione raffigurano il 15,76% per un'estensione di circa 11,81 Km² del territorio comunale.

Il rimanente 18,42% del territorio, pari a 13,80 Km², che comprende anche l'area di specifico interesse oggetto della realizzazione dell'impianto fotovoltaico in località Bortolotto, è caratterizzato da argille sabbiose grigio azzurrognole marroni da poco a mediamente consistenti con resti di molluschi, argille torbose poco consistenti. Torbe. (*AG_SAAG_T_P_L*).

Questi ultimi litotipi affiorano nelle aree più depresse del territorio comunale caratterizzate da facies deposizionali di tipo lagunare palustre ossia quelle oggetto di bonifica.

In tale contesto litostratigrafico, connesso alla morfologia poc'anzi descritta, non si segnalano nell'area in esame, al momento, fenomeni di instabilità geomorfologica connessi a eventuali movimenti di massa dei terreni e non sono state individuate cavità sotterranee.

3.3 Idrologia ed idrogeologia generale dell'area in esame

La stratigrafia del sottosuolo della Piana Campana è nota con sufficiente dettaglio attraverso i dati di perforazioni eseguite in passato per vari scopi (ricerche di idrocarburi e di forze endogene; ricerche d'acqua).

In particolare è stata accertata, nelle zone prossime ai massicci carbonatici che si snodano con continuità dal "casertano" al "sarnese", la presenza, al di sotto di uno spessore di materiale piroclastico (prima) e limo-sabbioso-ghiaioso (poi), di un substrato prevalentemente calcareo che tende ad approfondirsi abbastanza rapidamente dai -100/150 m dal p.c. (nelle zone pedemontane o nelle valli interne) ai -300/400 m dal p.c. (nelle zone distanti 2-3 Km dal piede dei rilievi).

Man mano che ci si sposta verso Ovest, esso sprofonda a varie migliaia di metri, tanto vero che non è stato raggiunto dalle perforazioni eseguite in passato per ricerche di idrocarburi nel basso Volturno. (Fig. 8-9)

Quindi, dal punto di vista idrogeologico la Piana Campana, in cui è inserita la zona esaminata, è un'unità idrogeologica costituita da una spessa coltre di depositi vulcanici, alluvionali e marini, con caratteristiche litologiche ed idrogeologiche molto diverse tra loro.

Questa configurazione lito-stratigrafica connessa alla presenza delle strutture vulcaniche dei Campi Flegrei e del Somma-Vesuvio, porta all'instaurarsi di flussi sotterranei complessi con presenza di più falde sovrapposte e molte volte intercomunicanti.

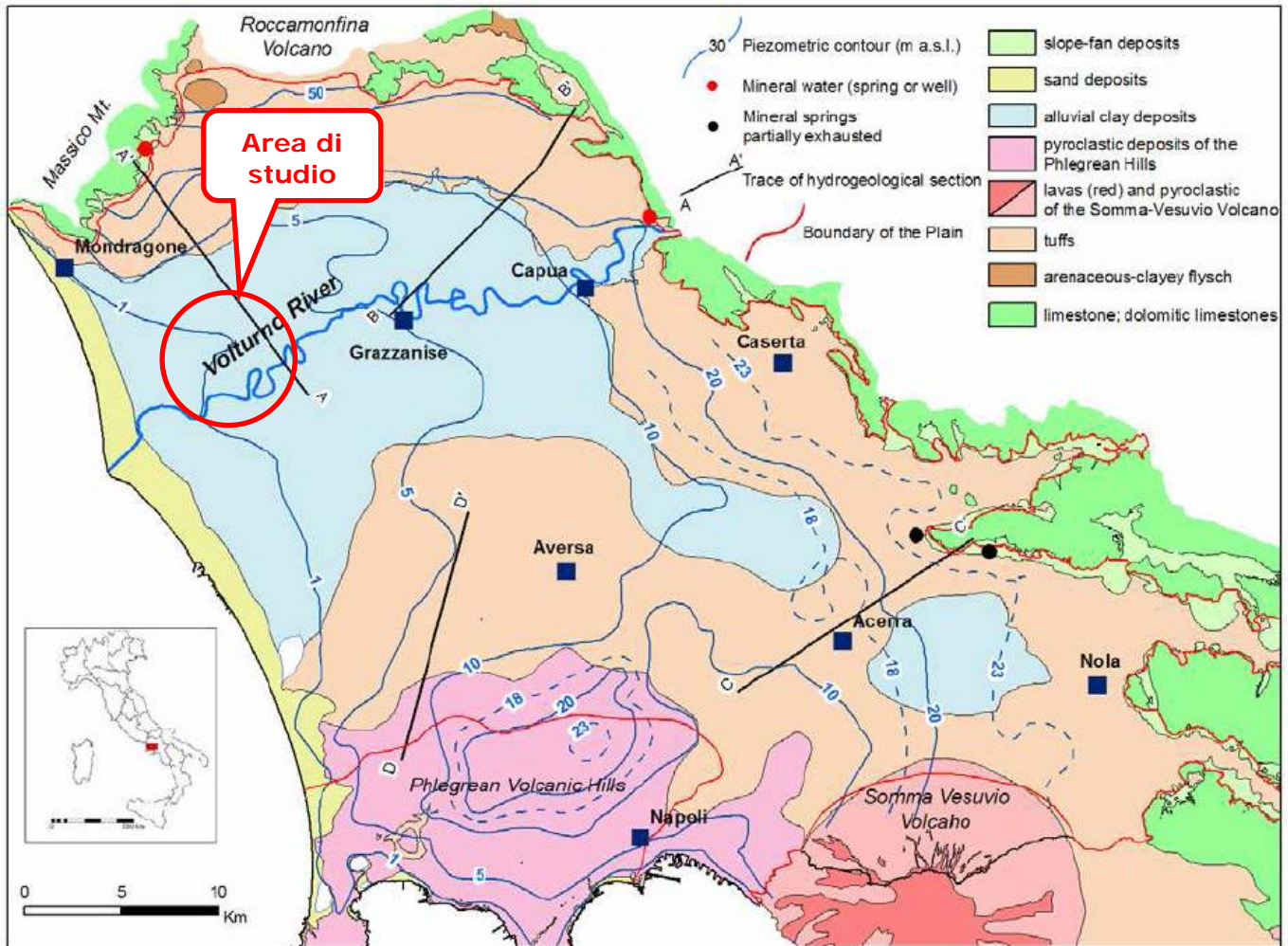


Fig. 8 - Carta idrogeologica della Piana Campana (da Ducci, 2007)

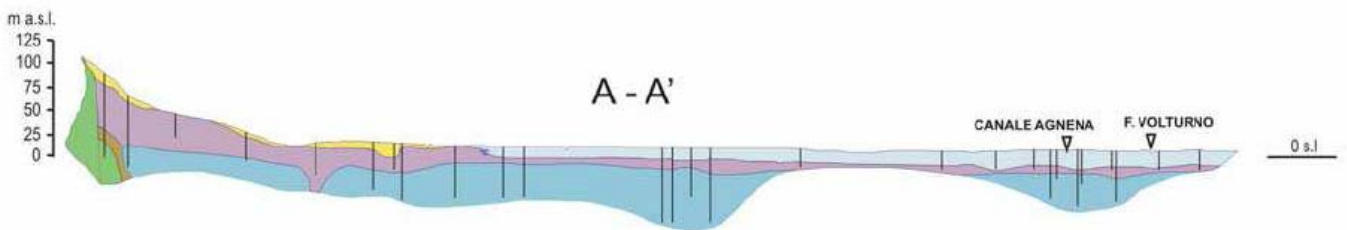
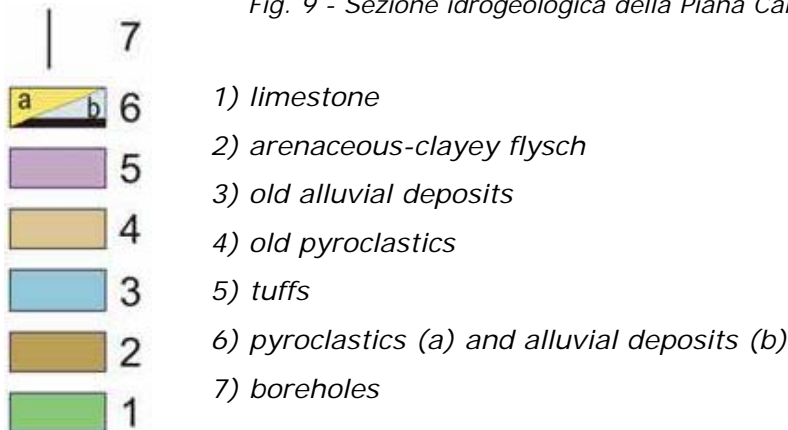


Fig. 9 - Sezione idrogeologica della Piana Campana (da Corniello - Ducci, 2007)



I corsi d'acqua principali che si riscontrano nell'area d'indagine sono:

- Il F. Volturno che ha una lunghezza di circa 180 km con un bacino esteso per complessivi 5.615 kmq ed è il corso d'acqua più importante dell'Italia Meridionale. Considerando il tratto da Ponte Annibale (18 m s.l.m.) alla foce, il fiume si dipana per circa 50 km, con una pendenza media dello 0,36%. In questo tratto gli spartiacque naturali del bacino del F. Volturno corrono paralleli e delimitano una fascia larga 2-4 km entro cui l'alveo è caratterizzato da numerosi meandri, con un tratto quasi rettilineo fra i centri abitati di Grazzanise e Cancellò Arnone. Attualmente l'alveo del corso d'acqua scorre, da Capua al mare, fra argini costruiti dal Consorzio di Bonifica del F. Volturno.
- Il canale Regia Agnena, raccoglie le acque sorgentizie (prevalenti) e superficiali della dorsale di M. Maggiore fino a Ponte Annibale. Questo canale, lungo circa 30 km con una pendenza media inferiore allo 0,1%, ha un bacino di circa 300 kmq e drena le aree depresse (quote anche di -1 m÷ -2 m s.l.m.), comprese fra il F. Savone ed il F. Volturno, con l'ausilio delle idrovore di Mazzasette e Mazzafarro, rispettivamente in sponda destra e sinistra del canale.

La Regia Agnena è stata modificata nel corso dei secoli con il progredire delle tecniche di bonifica idraulica. Nel 1846 era ormai completata la sistemazione dei terreni non depressi della piana prosciugabili per scolo naturale. Durante il periodo borbonico, l'alveo della Regia Agnena fu ampliato e rettificato, munito di argini e di controfossi al fine di separare le acque "alte" provenienti dai monti circostanti, dalle acque "basse" dovute alle precipitazioni dirette, e fu predisposta una rete di canali in cui convogliare le torbide del F. Volturno allo scopo di bonificare per colmata le aree poste al di sotto del livello del mare.

Nel periodo fra le due guerre mondiali, nell'ambito della "bonifica integrale", si decise di procedere con il sistema del prosciugamento meccanico mediante idrovore. Nel dopoguerra, ad opera del Consorzio Generale di Bonifica del Bacino Inferiore del Volturno, sono continuate le opere idrauliche: si procede al ripristino delle canalizzazioni di acque medie della Regia Agnena e dei canali tributari e viene potenziato l'impianto idrovoro di Mazzafarro; inoltre, le acque provenienti dai monti circostanti la piana vengono sottratte alle aree bonificate tramite il Canale Lanzi, che si estende per 25 km dal Rio Lanzi (affluente della Regia Agnena) al F. Savone per poi intercettare il R. Fiumarella.

3.4 Idrometria

Per fornire considerazioni riguardo le caratteristiche idrologiche che di seguito si riportano si è fatto riferimento alla bibliografia scientifica e tecnica esistente. Considerando, per ovvi motivi, il solo F. Volturno si deve valutare come il regime dei deflussi del Fiume sia direttamente collegato all'assetto climatico, e classificabile come regime pluviale. Gli innevamenti sono infatti limitati a piccole zone, la cui superficie è percentualmente irrilevante rispetto a quella dell'intero bacino.

Anche l'apporto sorgentizio riveste nell'insieme un ruolo secondario perchè le copiose sorgenti perenni sono quasi integralmente captate. L'andamento dei deflussi si presenta quindi parallelo a quello delle precipitazioni con un minimo in agosto ed un massimo in febbraio.

Il F. Volturno riceve, a monte di Ponte Annibale, gli importanti afflussi sorgentizi di Triflisco, Fontana Pila e S. Sofia, con portate di magra complessive di circa 3 mc/s. Presso Ponte Annibale (17,5 m s.l.m.) il fiume presenta una portata "naturale" media, ricavata per il periodo 1924-1942, di circa 100 mc/s, pari a 17,5 l/s.kmq, per un bacino di circa 5550 kmq con piovosità media annua di circa 1200 mm, il coefficiente di deflusso è di 0,46. I valori dei deflussi "naturali" misurati a Cannello Arnone (2,6 m s.l.m), 18 km a monte della foce, per il periodo (1931-1942 e 1950-1970), sono lievemente superiori (103 mc/s di portata media, con un coefficiente di deflusso di 0,50) a seguito della azione drenante del F. Volturno rispetto alla piana omonima. Valori nettamente più bassi (83 mc/s di portata media con coefficiente di deflusso di 0,40) si rilevano per le portate effettivamente defluite nel periodo 1954-1970, a causa delle numerose concessioni ad uso idropotabile, irriguo ed idroelettrico a monte di Cannello Arnone.

Attraverso le caratteristiche litologiche dei terreni è possibile dedurre il grado di permeabilità di ciascuno di essi: si è trattata di una distinzione schematica confortata dall'elaborazione e correlazione di numerosi dati ed osservazioni disponibili per l'area di studio. Dall'analisi idrogeologica generale dell'area si ricava la presenza di diversi litotipi che possono, in base alla loro permeabilità, essere suddivisi in differenti complessi idrogeologici di seguito descritti.

Complesso sabbioso (CSA)

Affiora in corrispondenza della zona costiera su una fascia che è larga circa tre chilometri e risulta costituita da sabbie fini sciolte equigranulari grigie e giallastre di vario spessore; da sabbie fini e sabbie argillose, da sciolte a poco addensate con abbondanti resti di molluschi; sabbie grigie e giallastre da poco addensate a mediamente addensate di retroduna. Dai dati stratigrafici si possono riconoscere intervalli prevalentemente sabbiosi e a luoghi da quelli sabbiosi-limosi.

Si riconosce una potenza di circa 16 m nella porzione nord-occidentale del territorio comunale (precisamente a Nord della foce del Volturno). Nella porzione posta a meridione dei Regi Lagni, lo spessore è almeno di 30 m, allontanandosi dalla linea di costa gli spessori vanno calando e a luoghi si segnalano interdigitazioni con terreni di transizione o francamente alluvionali. La

permeabilità è medio-alta per porosità al crescere delle dimensioni dei granuli ed in presenza di scarso.

Complesso alluvionale (C. ALL)

Con tale sigla sono indicati i depositi alluvionali presenti a tetto dell'Ignimbrite Campana e legati agli espandimenti fluviali del Volturno, a fasi palustri (zone della bonifica del basso Volturno), nonché ad episodi marini con terreni francamente sabbiosi. La ricostruzione dei rapporti spaziali delle componenti a diversa granulometria non è nè semplice nè immediata, comunque dal punto di vista areale detto complesso rappresenta una parte preponderante nell'ambito del territorio comunale.

La parte del complesso presente a ridosso del F. Volturno comprende un'alternanza irregolare di materiali di varia granulometria (argille, sabbie e talora lenti di ghiaie spesse fino a qualche metro) legati a deposizione fluviale (durante le ultime migliaia di anni, il Volturno, costretto a divagare dalla quasi raggiunta stabilità del livello di base, ha costruito un tracciato tipicamente pensile ed un piccolo delta a cuspidale).

Gli spessori di questa porzione di complesso sono vari e partendo dal Volturno e procedendo verso sud, questi depositi si osservano in affioramento fino a distanza massima di 1.5 - 2 chilometri dove passano per eteropia ai materiali descritti di seguito. Questa porzione nell'insieme ha una permeabilità piuttosto bassa che tende ad innalzarsi in corrispondenza degli orizzonti più grossolani. Sempre nello stesso complesso si riconoscono terreni riconducibili ad antichi espandimenti alluvionali dei canali dei Regi Lagni a ridosso dei quali in effetti si localizza. Nei sondaggi che lo hanno attraversato si denota: il complesso appare sempre rappresentato da argille e limi, assai spesso associati a livelli torbosi; gli spessori sono fino ad alcune decine di metri; si evidenziano anche i rapporti eteropici tra questo complesso e le alluvioni del Volturno.

Per la granulometria in prevalenza fine dei materiali costituenti, il questa porzione risulta dotata di permeabilità molto ridotta. C'è da aggiungere che i sondaggi hanno rivelato, a diverse altezze stratigrafiche, livelli di materiale torboso, a luoghi caratterizzati da continuità areale e con potenze di circa 2,0 - 2,5 metri. IL passaggio con i termini precedentemente descritti, a luoghi si segnalano con interdigitazioni.

La struttura del complesso è pertanto articolata: i depositi che lo costituiscono presentano, infatti, variazioni granulometriche in senso areale e lungo le verticali. E' pertanto difficile che siano presenti livelli continui di scarsa permeabilità sufficienti a frazionare il complesso in più strati distinti. In questo complesso le acque sotterranee tendono pertanto a digitarsi in più livelli, corrispondenti alla variazione dei materiali presenti e variamente interconnessi, ma conservando sempre carattere di corpo idrico unitario. Quindi complessivamente la permeabilità è in genere medio-bassa, anche se ovviamente tende a crescere con il prevalere locale di granulometrie più grossolane e poco assortite.

Complesso piroclastico (CP)

E' da premettere che il complesso in questione non è mai affiorante ma che si riconosce nei sondaggi in profondità. Esso è costituito da piroclastiti, di granulometria da media a fine (piccole pomici, ceneri, lapilli etc.), quasi sempre sciolte o debolmente cementate. I diversi materiali sono spesso fra loro frammisti, anche se talora possono individuarsi livelli prevalentemente cineritici o pomicei. Nel caso in specie si tratta granulometricamente di sabbie o sabbie-ghiaiose con subordinata frazione limosa. I sondaggi che hanno attraversato il complesso (anche al di fuori delle aree di pertinenza, indicano infatti una notevole variabilità granulometrica sia in senso areale che lungo le verticali investigate. Il complesso è estesamente affiorante soprattutto nella Piana Campana dove è presente con spessori assai significativi.

In termini di area vasta gli acquiferi che si evidenziano costituiscono a grande scala una falda unica (sovente pozzi attestati nei differenti acquiferi hanno fatto registrare le stesse quote piezometriche) con una circolazione idrica talora a pelo libero, talora in pressione laddove la porzione a granulometria più fine dei terreni limo-sabbiosi fluvio-palustri oppure dei livelli continui di tufo lapideo non fratturato tamponano superiormente la falda (De Riso, 1990).

Sempre su area vasta, prove di emungimento effettuate nell'area (De Riso, 1990) e dati di letteratura (Corniello et Alii, 1990) assegnano valori di trasmissività che variano fra $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (pozzi attestati nei depositi prevalentemente sabbiosi) ed $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (pozzi attestati nelle piroclastiti superficiali).

Vi è da puntualizzare, sempre per gli ambiti di macroarea, che nei settori al piede dei rilievi, dove la piezometrica del corpo idrico si colloca in corrispondenza di forti spessori tufacei poco permeabili, la falda ha carattere nettamente confinato; man mano che dai rilievi si procede verso il Volturno, il complesso tufaceo si fa discontinuo, assai meno potente e diagenizzato ed a volte manca del tutto. In questi casi si determina una qualche continuità idraulica tra i materiali piroclastico/alluvionali dell'acquifero ed i sovrastanti terreni alluvionali più recenti.

In ragione delle caratteristiche granulometriche di questi ultimi, la falda assume carattere semiconfinato o libero.

A grande scala, le curve piezometriche:

- individuano una netta area di drenaggio della falda in corrispondenza della zona centrale della piana; infatti a) le direzioni di flusso della falda convergono verso tale zona e b) qui si registra una notevole spaziatura delle curve piezometriche a significare un locale incremento della trasmissività dell'acquifero per aumento della sezione di flusso e/o della permeabilità del mezzo;
- indicano che il recapito definitivo della falda è rappresentato dal mare; la falda affiora anche in corrispondenza del lago di Carinola (qui infatti le portate dell'emissario superano quelle affluenti Comune di Falciano del M., 1996) ed in diffuse venute d'acqua nella depressione della Regia Agnena;

E' da notare la stretta somiglianza che accomuna, a ridosso del Volturno, curve piezometriche ed isoipse. Una somiglianza che si deve ad una causa comune: l'azione del fiume. Il Volturno ha infatti condizionato la morfologia della zona originando, nel corso dei millenni, il lungo conoide sul cui colmo ha impostato il suo corso; da questa posizione, lungo l'alveo, il fiume contribuisce ad alimentare (per assenza impermeabili interposti) la falda sottostante e ne determina l'innalzamento piezometrico in corrispondenza del suo tracciato.

Le caratteristiche idrogeologiche specifiche del sito ubicato in località Parco del Castello dove sarà realizzato l'impianto fotovoltaico e le opere ad esso connesse, in relazione a quanto illustrato nelle pagine precedenti, possono essere sintetizzate come di seguito meglio specificato.

L'acquifero superficiale presente circola a pelo libero ad una profondità dal piano campagna di circa 2.5 metri in direzione Ovest e sud-ovest, verso l'attuale linea di costa e risulta frazionato su più livelli a causa della presenza di lenti e livelli argillosi caratterizzati da permeabilità bassa o medio bassa. L'acquifero, inoltre, è sostenuto alla base dall'unità a bassa permeabilità costituita dall'ignimbrite campana.

Dai numerosi dati bibliografici relativi a studi dell'area, dall'analisi delle stratigrafie dei sondaggi disponibili per il territorio, confermati dalle indagini geognostiche eseguite nel sito di specifico interesse per il presente lavoro, è stato possibile desumere che, in corrispondenza dell'area che sarà interessato dall'impianto fotovoltaico l'unità alluvionale che ospita l'acquifero superficiale abbia localmente uno spessore di circa 20 metri e passi poi all'unità dell'Ignimbrite Campana, i cui caratteri idrogeologici evidenziano una permeabilità bassa o molto bassa.

Lungo le verticali stratigrafiche indagate, inoltre, la presenza di livelli francamente argillosi impermeabili all'interno dell'unità alluvionale, frazione la falda superficiale su più livelli, la cui posizione quindi varia in relazione allo specifico andamento geometrico di questi acquicludi.

In merito ai livelli piezometrici della falda superficiale del sito indagato infine, è opportuno fare alcune considerazioni da tener presente in sede di progettazione strutturale. Tenuto conto che la soggiacenza della falda superficiale è stata misurata nei mesi di agosto (-2,20 m dal p.c.) e dicembre (-2,50 m dal p.c.) 2021, dopo un prolungato periodo di siccità, è possibile ipotizzare che nel corso dell'anno e, soprattutto nel corso delle stagioni maggiormente piovose, essa possa avere delle oscillazioni verso il piano campagna. Quindi è necessario, in fase di progettazione strutturale, tenere conto anche delle oscillazioni nei livelli piezometrici che la falda potrebbe ciclicamente subire nel corso dell'anno idrogeologico.

4. Pericolosità geologica dell'area di studio

4.1 Piano Stralcio Difesa Alluvioni Basso Volturno

Il Piano stralcio per l'assetto idrogeologico Rischio di Frana (PSAI-Rf) e Rischio Idraulico (PSAI-Ri) per il bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno, ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo, tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso del territorio relative all'assetto idrogeologico del bacino idrografico di riferimento. Con DPCM del 21/11/01, pubblicato sulla G.U. n.42 del 19/02/02, è stato approvato il Piano Stralcio di difesa dalle Alluvioni per le aste principali del bacino Volturno denominato comunemente PSDA.

Successivamente è stata redatta una proposta di progetto di variante a tale Piano (*PSDA-bav*) che interessa l'asta terminale del fiume Volturno ed in particolare il tratto arginato da Capua a mare. Le motivazioni che hanno condotto alla predisposizione di tale variante sono derivate dai contenuti degli studi effettuati ed hanno portato a predisporre una nuova disciplina delle aree retroarginali. Tali attività hanno permesso la produzione degli elaborati del PSDA-bav ed in particolare sono state predisposte:

1. nuova carta di Zonizzazione ed individuazione degli squilibri per il basso Volturno (tavola 4.43-bav sostitutiva della tavola 4.43 del PSDA);
2. linee guida per la predisposizione di un Piano intercomunale di Protezione Civile per i comuni di Capua, S. Maria La Fossa, Grazzanise, Cancellò ed Arnone e Castel Volturno: tale piano viene considerato uno strumento necessario ed attuativo del PSDA.bav.
3. norme di attuazione specifiche per il basso Volturno differenziate da quelle vigenti per il restante ambito del PSDA. Tali norme contengono anche una serie di disposizioni per la fascia costiera individuata che vengono adottate come misure di salvaguardia ai sensi del comma 6 ter dell'art. 17 della legge 183/89;
4. individuazione degli interventi strutturali sul corso d'acqua ritenuti prioritari per la messa in sicurezza.

4.2 Carta della zonizzazione ed individuazione degli squilibri e norme di attuazione

La carta di zonizzazione ed individuazione degli squilibri è redatta in scala 1:25.000, ed è indicata come 4.43-bav. Tale tavola sostituisce la precedente 4.43. L'ambito individuato è suddiviso nelle seguenti tre parti:

- a) Fascia A, compresa tra gli argini maestri e del tutto coincidente con quella individuata dal PSDA limitatamente al tratto arginato. Su tale fascia, che conserva il concetto di pericolosità, vengono riportate le condizioni di squilibrio già individuate nel PSDA;

- b) Area R (retroarginale) costituita dall'area di criticità, coincidente con le ex sottofasce B1, B2 e B3 ed in piccolissima parte con la fascia A costiera del PSDA. Per tali aree, individuate come critiche, non è stato possibile allo stato attuale differenziare i differenti livelli di pericolosità, e pertanto le stesse sono state assoggettate a un'unica disciplina specifica riportata nelle norme di attuazione.
- c) Zona costiera coincidente con la ex fascia A costiera ad esclusione della piccola area indicata al punto b. Sulla stessa viene imposta soltanto una norma di salvaguardia, in attesa che venga redatto il Piano stralcio di erosione costiera.

Come già detto il *PSDA-bav* definisce una norma specifica di regolamentazione ed uso del territorio in funzione dei tre elementi territoriali individuati.

Per la fascia A vengono in generale ricalcati i contenuti delle vigenti norme di attuazione del PSDA, pur utilizzando una impostazione formale differente; infatti l'esperienza acquisita con l'applicazione del PSDA, ha evidenziato in alcuni casi dubbi interpretativi.

In particolare, le citate norme indicano attività vietate ed attività consentite nelle fasce fluviali, ingenerando dubbi sulla liceità di ulteriori attività che di fatto non sono né vietate e né consentite dalle norme. Si prevede pertanto, adeguandosi a quanto già fatto nel PSAI-Ri, di indicare le sole attività esclusivamente consentite.

Discorso differente riguarda invece le aree *retroarginali* (aree R), per le quali la norma è stata riscritta, tenendo conto della situazione urbanistico-territoriale attentamente studiata, e con una impostazione meno vincolistica, ma più "programmatoria", e coordinata con gli interventi strutturali e con la Pianificazione d'emergenza, quindi con gli altri elementi di attuazione del PSDA-bav. In particolare è stato riconsiderato il divieto di edificazione sulla scorta di conoscenze specifiche e gli studi di dettaglio effettuati valutando la sostenibilità territoriale e quindi la effettiva necessità di realizzazione di specifici insediamenti.

Relativamente a quanto previsto dalle **Norme di attuazione relative alla Variante al P.S.D.A. Basso Volturno da Capua alla foce**, l'area interessata dalla realizzazione dell'impianto fotovoltaico in località Bortolotto e l'elettrodotto interrato rientrano nella zona perimetrata "**Area retroarginale**" (Fig. 10).

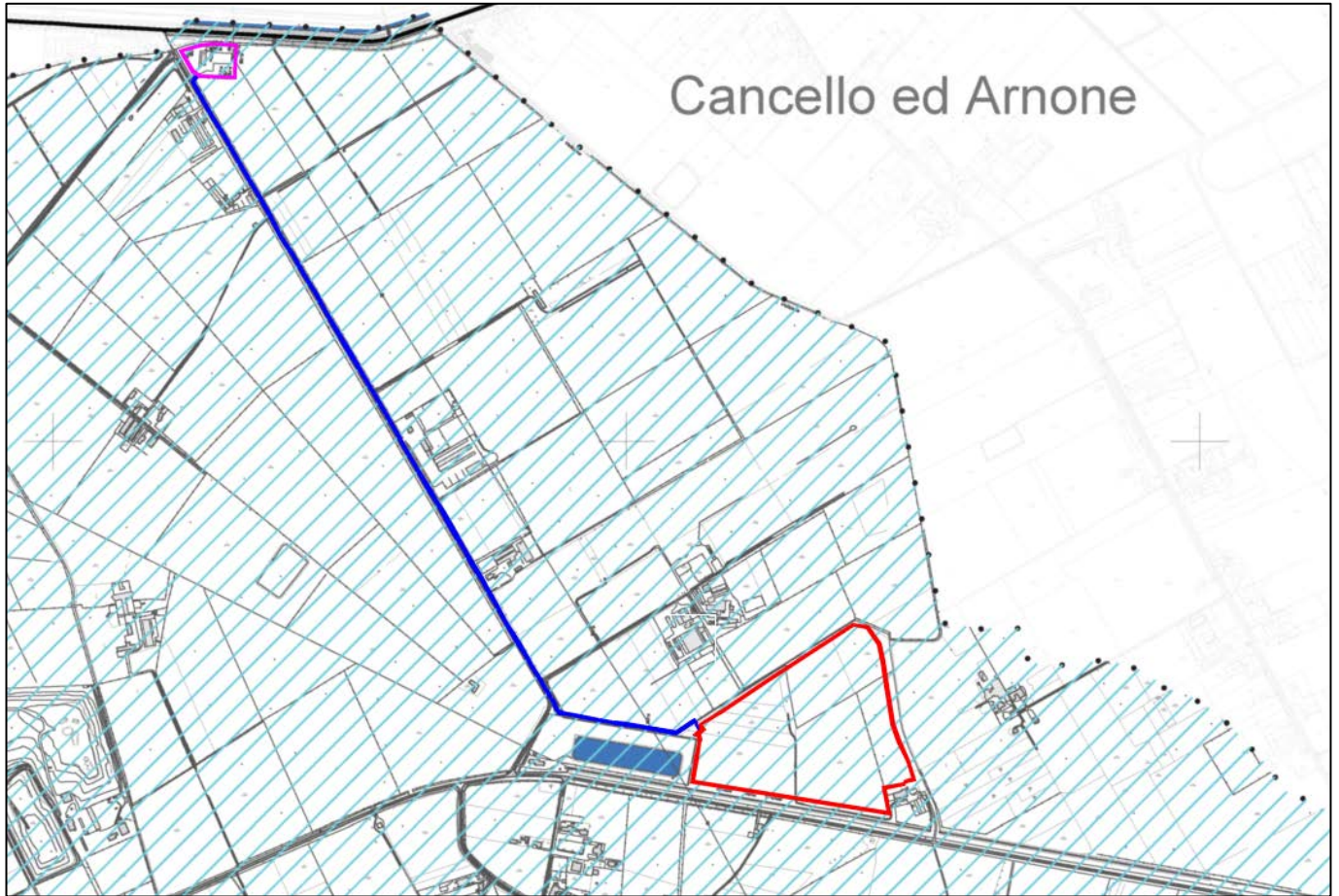


Fig. 10 - Piano Stralcio Difesa Alluvione Basso Volturno
Stralcio della Carta della zonazione ed individuazione degli squilibri

Legenda

DESTINAZIONE D'USO

Centri e Nuclei Urbani	Infrastrutture	Industrie	Abitazioni isolate
Case Sparse	Aree ad Uso Agricolo Non Compatibile	Monumenti Storici ed Architettonici	

ZONIZZAZIONE

Fascia A	Area Retroarginale	Zona Costiera

SQUILIBRI

Moderato	Grave	Gravissimo



Sito dell'area dell'impianto agro-fotovoltaico da realizzarsi in località Parco del Castello



Percorso elettrodotta interrato



Cabina Primaria di Castel Volturno

Le prescrizioni relative all'**Area Retroarginale** sono dettate dall'art. 7 di seguito riportate:

1. *Nelle aree R il Piano persegue gli obiettivi di mitigazione del rischio idraulico attraverso la definizione e la predisposizione degli strumenti di Protezione Civile e l'individuazione e la realizzazione degli interventi strutturali. Contestualmente vengono regolamentate le attività compatibili sul territorio, in rapporto all'uso consolidato ed al contenimento del rischio.*
2. *Nelle aree R sono esclusivamente consentiti:*
 - a) Gli interventi consentiti nella fascia A e riportati al precedente articolo 6;
 - b) La realizzazione di impianti sportivi, per attività all'aperto, e nel rispetto di quanto contenuto nella normativa tecnica riportate all'art. 16. L'utilizzo di tali impianti, in caso di eventi atmosferici di particolare intensità, deve essere espressamente regolamentato dall'Amministrazione Comunale competente o da Commissione istituzionalmente preposta.
 - c) ogni opera a servizio di infrastrutture di trasporto e/o di servizio (caselli autostradali, stazioni ferroviarie, intersezioni, svincoli ecc.), con le prescrizioni contenute nell'allegato C delle Norme di Attuazione del PSDA.
 - d) Per i Comuni dotati di strumento urbanistico vigente:
 - le nuove edificazioni, realizzate in attuazione degli strumenti urbanistici per le porzioni di territorio interessate da agglomerati urbani che rivestono carattere storico-artistico di particolare pregio, per quelle totalmente o parzialmente edificate (zone A, B così come indicate dal D.M. 1444/68) e per quelle da destinare a nuovi complessi insediativi (zone C così come indicate dal D.M. 1444/68) limitatamente a quelle indicate come edilizia economica abitativa;
 - le nuove edificazioni in attuazione degli strumenti urbanistici, diverse da quelle indicate al punto precedente, ad esclusione di quelle ad uso residenziale e produttivo;
 - e) Per i Comuni non dotati di strumento urbanistico:
 - le nuove edificazioni al di fuori del perimetro dei centri abitati con le limitazioni di cui all'articolo 41 quinquies della legge 1150/42 così come modificato dall'art. 4 della legge 10/77; in particolare: l'edificazione a scopo residenziale non può superare l'indice di mc 0.03 per metro quadrato di area edificabile; le superfici coperte degli edifici non possono superare un decimo dell'area di proprietà; gli edifici non possono comprendere più di tre piani; l'altezza di ogni edificio non può essere superiore alla larghezza degli spazi pubblici o privati su cui esso prospetta e la distanza dagli edifici vicini non può essere inferiore all'altezza di ciascun fronte dell'edificio da costruire;
 - f) tutte le opere previste in Piani integrati e sovracomunali nonché le opere pubbliche non delocalizzabili, previo studio di compatibilità idraulica e parere dell'Autorità di Bacino che

si esprimerà, in relazione a quanto definito dalla variante al piano, sulla compatibilità medesima;

g) gli impianti di depurazione e di disinquinamento tesi al miglioramento della qualità delle acque e del suolo, di cui sia dimostrata l'idoneità della localizzazione in rapporto alle condizioni geomorfologiche e al rischio idraulico, l'adeguatezza del dimensionamento, la sicurezza ai fini del rischio tecnologico, nonché gli interventi diretti ad adeguare impianti esistenti alla normativa di sicurezza;

3. *Tutti gli interventi previsti nel precedente comma sono sottoposti alle prescrizioni contenute nella normativa tecnica di cui all'articolo 16, salvo maggiori prescrizioni imposte dai Piani di Protezione Civile.*

4. *In aggiunta a quanto riportato al comma precedente, la realizzazione degli interventi di cui ai punti f e g del comma 2 è ulteriormente subordinata alla presentazione di uno studio geomorfologico che dimostri la presenza di una condizione morfologica compatibile con il rischio idraulico. In tal caso non è obbligatorio il rispetto delle condizioni di cui alle lettere a) e b) dell'articolo 16 comma 1.*

4.3 Compatibilità geologica del progetto

Relativamente a quanto previsto dalle “**Norme di Attuazione variante al P.S.D.A. Basso Voltorno da Capua alla foce**” il lotto di terreno interessato dalle opere di progetto rientra in un’area perimetrata come zona “**Area retroarginale (R)**”.

Nelle aree R il Piano persegue gli obiettivi di mitigazione del rischio idraulico attraverso la definizione e la predisposizione degli strumenti di Protezione Civile e l’individuazione e la realizzazione degli interventi strutturali. Contestualmente vengono regolamentate le attività compatibili sul territorio, in rapporto all’uso consolidato ed al contenimento del rischio (cfr. art.7 comma 1).

Le valutazioni effettuate nella presente relazione sono volte a dimostrare la compatibilità geologica degli interventi di progetto, in accordo con quanto richiesto dalle Norme sopra richiamate. Gli interventi progettuali previsti non rappresentano un fattore predisponente all’instabilità, in quanto non si andranno a modificare né la circolazione idrica sotterranea né quella superficiale, e l’esecuzione delle opere di progetto non turberà l’attuale equilibrio morfologico e quindi sicuramente non andrà ad aggravare le condizioni di stabilità attuali.

In merito alle opere di progetto elencate possono esprimersi le seguenti considerazioni:

- 1) per la realizzazione degli interventi di progetto sommariamente citati in premessa, non sarà modificata la geometria morfologia dell’area con ingenti scavi, tagli, ecc., né saranno create neosuperfici esposte ad elevata pendenza, potenziali sedi d’innesco di movimenti dei terreni di copertura detritica;
- 2) non si apporteranno ulteriori carichi sul sito capaci di creare disequilibri di masse e non sarà compromesso il normale deflusso delle acque superficiali tali da innescare processi di erosione e denudazione che possano evolvere in reali dissesti.

Per i motivi fin qui considerati è possibile esprimere valutazioni positive sulla compatibilità dell’intervento da realizzare con l’assetto idrogeologico dell’area, in quanto lo stesso non pregiudica la stabilità attuale della zona ed è da considerarsi, appunto, compatibile dal punto di vista idrogeologico con la situazione di pericolosità e di rischio da dissesti di versante attualmente sostenibile dal territorio.

Il processo di verifica, valutazione e stima della compatibilità geologica dell’intervento, sommariamente ripercorso in queste pagine, ha portato a stabilire che essa è, appunto verificata, stimata e valutata rispetto allo stato attuale, in quanto non si sono ravvisati condizioni geologiche tali da compromettere la realizzabilità dei lavori di progetto.

5. Indagini e caratterizzazione geologica e geotecnica

5.1 Programmazione ed esecuzione delle indagini geognostiche in sito

Dal punto di vista strettamente operativo questo studio nell'assegnare un peso alla componente geologica e geotecnica nella valutazione della fattibilità di opere ed interventi sul territorio trae i suoi fondamenti dalla **L.R. 7 Gennaio 1983, n. 9 "Norme per l'esercizio delle funzioni regionali in materia di difesa del territorio dal rischio sismico"**. Essa rappresenta un importante strumento concepito per fornire informazioni sulle limitazioni d'uso del territorio derivanti dalle sue caratteristiche geologico-tecniche, morfologiche e dalla valutazione degli effetti delle sollecitazioni sismiche.

Il **D.M. LL.PP. 11/3/88**, concernente le *"norme tecniche relative alle 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"*, prescrive che le scelte di progetto, i calcoli e le verifiche tecniche relative alla progettazione devono fondarsi sempre sulla caratterizzazione geologica e geotecnica del sottosuolo ottenuta con rilievi, indagini e prove.

Con **Delibera di Giunta Regionale n. 5447 del 7 Novembre 2002 "Aggiornamento della classificazione sismica dei comuni della regione Campania"** (B.U.R.C. n. 56 del 18.11.2002) il comune di *Castel Volturno (CE)*, ai sensi e per gli effetti della legge 64/74, è stato inserito nella Categoria Sismica 3, a cui corrisponde un grado di sismicità S pari a 6.

I Comuni classificati sismici dalla Giunta Regionale sono obbligati ad osservare oltre le disposizioni di cui alla Legge 2 Febbraio 1974 n. 64 e successive modificazioni ed integrazioni, le norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996 e le relative istruzioni applicative di cui alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 65 AA.GG. del 10 Aprile 1997, anche le disposizioni della L.R. 7 Gennaio 1983 n. 9.

L'Ordinanza 20 marzo 2003 n. 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'8/5/2003 n. 105, supplemento n. 72, ha approvato i criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica e, con essi, in prima applicazione, la nuova riclassificazione secondo le indicazioni del Gruppo di Lavoro del Dipartimento della Protezione Civile del 1998.

Il **D.M. 14 gennaio 2008 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni"**, pubblicato sul S.O. della Gazzetta Ufficiale n.30 del 04/02/2008, raccoglie in un unico organico testo le Norme tecniche per le costruzioni prima distribuite in diversi decreti ministeriali.

Il **D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni"**, pubblicato sul S.O. alla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20/02/2018, aggiorna e sostituisce le Norme tecniche per le costruzioni approvate con il D.M. 14 gennaio 2008.

Per la ricostruzione del modello geologico, geotecnico e sismico del sito di specifico interesse, è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche in sito consistente nella realizzazione di n°3 prove penetrometriche statiche del tipo CPT, n°2 prove penetrometriche dinamiche continue e n°2 prospezioni sismiche M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh*) (Fig. 11).

Ad integrazione delle suddette indagini sono state prese in considerazione anche le indagini geognostiche realizzate dal Comune di Castel Volturno per la redazione del P.U.C. (Fig. 12) su terreni simili ed appartenenti alle stesse formazioni geologiche dell'area di studio, consistenti in sondaggi a carotaggio continuo per la ricostruzione della stratigrafia della zona, prove S.P.T. in foro di sondaggio e prove di laboratorio per la determinazione dei parametri geotecnici dei terreni.

Tali attività hanno permesso di ricostruire il modello geologico del sito di studio e, nel contempo, di ricavare i principali parametri dei terreni del sottosuolo di interesse geotecnico, al fine di conoscerne e studiarne il comportamento in relazione alle caratteristiche strutturali e dimensionali dell'opera di progetto.

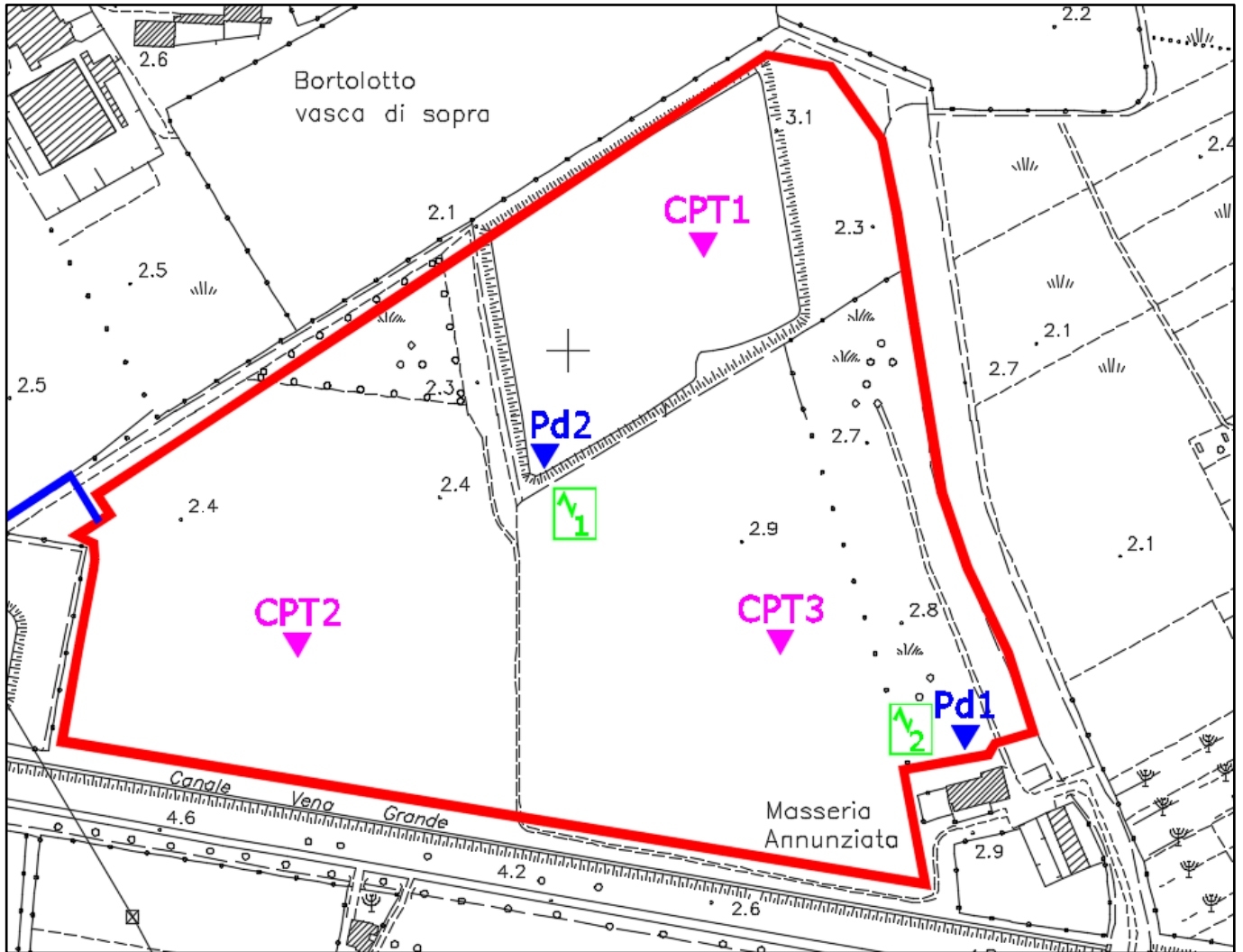


Fig. 11 – Stralcio della Carta di ubicazione delle indagini eseguite in sito in località Bortolotto

Legenda



Sito dell'area dell'impianto agro-fotovoltaico



Prove penetrometriche statiche eseguite in sito



Prove penetrometriche dinamiche eseguite in sito



Prospezioni sismiche M.A.S.W.
(*Multichannel Analysis of Surface Waves*)

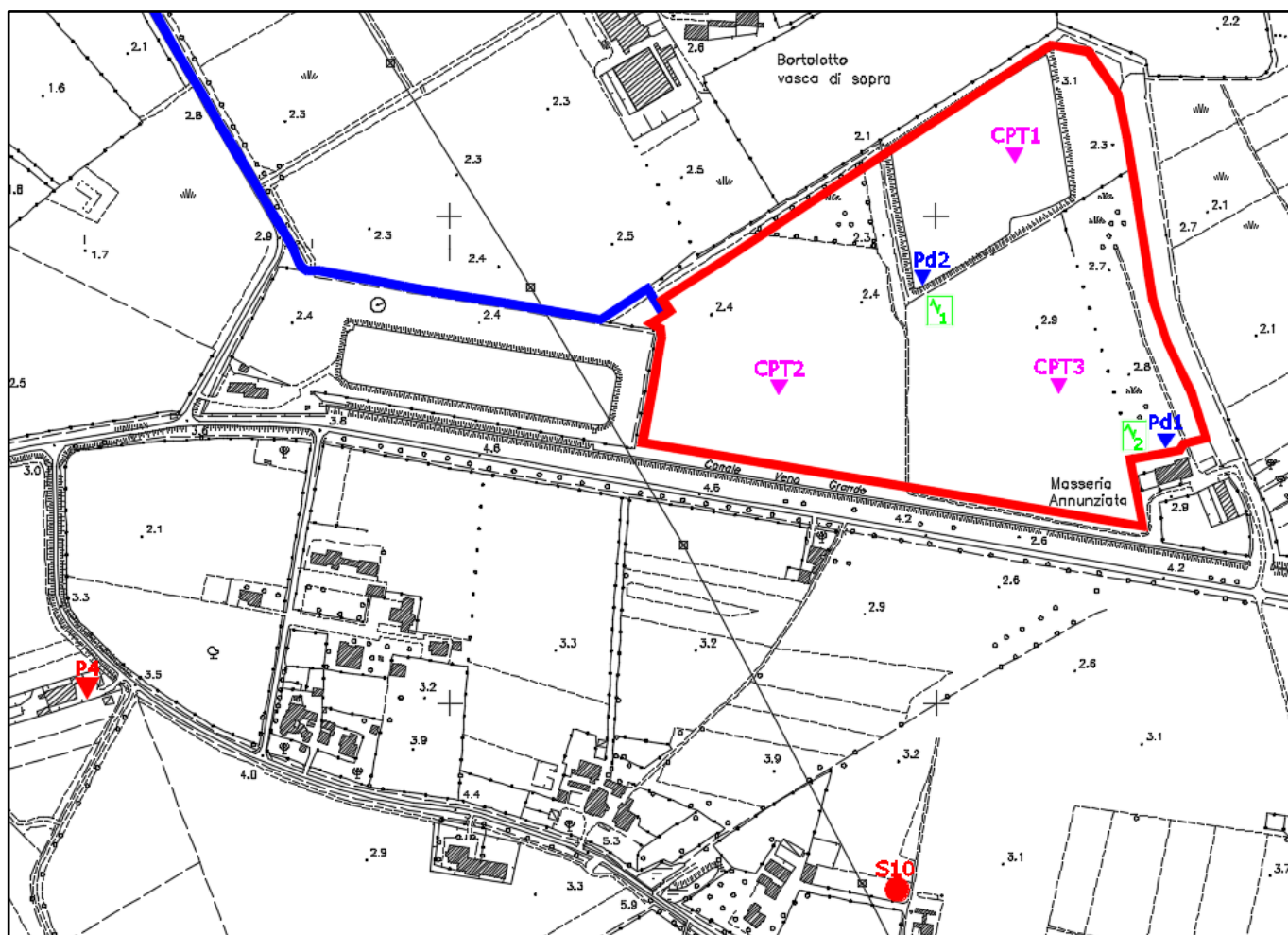


Fig. 12 – Stralcio della Carta di ubicazione delle indagini eseguite e quelle del PUC di Castel Volturno

Legenda



Sito dell'area dell'impianto agro-fotovoltaico



Prove penetrometriche statiche eseguite in sito



Prove penetrometriche dinamiche eseguite in sito



Prospezioni sismiche M.A.S.W.
(*Multichannel Abalysis of Surface Waves*)



Sondaggi a carotaggio continuo del PUC con prelievo di campioni. Sismica in foro (down hole)



Prove penetrometriche dinamiche del PUC

5.2 Assetto stratigrafico dell'area di studio

I dati acquisiti hanno consentito una valutazione delle relative potenzialità ricettive; pertanto, è stato possibile definire un modello teorico per il sottosuolo, rispetto al quale possono essere verificate le diverse soluzioni progettuali.

Il sottosuolo del territorio comunale di Castel Volturno è stato condizionato dalle vicende geologiche che, essenzialmente si riconducono alla morfogenesi della costa in oggetto e dallo sviluppo del Fiume Volturno. Tale area, insieme ad altri grandi porzioni della Piana Campana, ha conosciuto ambienti marini estesi e poi condizioni favorevoli alla sua crescita come area emersa.

A tale quadro di sintesi bisogna aggiungere come l'area vasta venne investita dai prodotti piroclastici da flusso e da caduta di provenienza flegrea e p.p. vesuviana. Vi è da aggiungere la profonda azione deposizionale esercitata del Fiume Volturno. Ne consegue che i terreni che si rinvenivano sono, ovviamente, frutto di tali "vicende" geologiche con conseguente presenza di variazioni sia verticali che orizzontali in special modo nelle aree di transizione.

In accordo con il modello geologico descritto in un paragrafo precedente, i sondaggi realizzati per la redazione del PUC comunale hanno delineato come nella zona litorale, vi siano terreni costituiti da sabbie fini sciolte equigranulari grigie e giallastre di vario spessore.

Spostandosi dalla zona litorale parallelamente alla costa e per tutto l'allineamento spostandosi verso la parte orientale del territorio comunale si manifestano sabbie fini e sabbie argillose, da sciolte a poco addensate con abbondanti resti di molluschi. Procedendo ancora verso est dalla zona litorale parallelamente alla costa e solo in sinistra foce Volturno si accertano delle sabbie grigie e giallastre da poco addensate a mediamente addensate.

Riguardo il corso del Volturno (per una fascia posta a cavallo del fiume) si riscontrano delle sabbie grigie sciolte ed argille grigio-azzurrognole poco consistenti; per poi passare ad un'ulteriore fascia esterna rispetto a questa ora descritta e sempre, grossomodo, allineata all'asse del corso del Volturno costituita da argille marroni e grigio-bluastré, da poco a mediamente consistenti con abbondanti resti vegetali lignei e molluschi, e sabbie grigie poco addensate con inclusi elementi pomicei e scoriacei, nonché torbe.

Spostandosi ulteriormente ad una fascia ancora più esterna rispetto al corso del Volturno ma sempre, grossomodo, allineata all'asse del corso del fiume si segnalano argille grigie da poco a mediamente consistenti e sabbie grigie poco addensate.

Le aree più depresse del territorio comunale, ossia quelle oggetto di bonifica, sono caratterizzate da argille sabbiose grigio azzurrognole marroni da poco a mediamente consistenti con resti di molluschi, argille torbose poco consistenti e torbe.

Durante l'esecuzione dei sondaggi è stata riscontrata la presenza di falda acquifera; la profondità di rinvenimento è riportata nel capitolo relativo alla idrogeologia. Per le correlazioni descritte nel presente capitolo si rimanda alle colonne stratigrafiche allegate.

Come risulta dalla stratigrafia del sondaggio geognostico realizzato per la redazione del PUC del Comune di Castel Volturno in un'area limitrofa a quella di specifico interesse, identificato con la sigla **S10**, la cui scheda è riportata è allegata in calce alla presente, il sottosuolo della zona fino alla profondità di 30,0 m è costituito dai terreni di seguito descritti:

Stratigrafia sondaggio S10

- 0,00 ÷ 0,30 m: Argilla marrone moderatamente consistente.
- 0,30 ÷ 1,50 m: Limo con argilla marrone alterato consistente.
- 1,50 ÷ 3,00 m: Argilla con limo marrone poco consistente.
- 3,00 ÷ 4,00 m: Limo con sabbia argilloso, grigio-verde avana moderatamente consistente. Frazione sabbiosa costituita da elementi lapidei e/o pomicei arrotondati.
- 4,00 ÷ 5,00 m: Argilla grigio scura da moderatamente consistente a consistente.
- 5,00 ÷ 5,50 m: Argilla limosa debolmente sabbiosa grigio-marrone poco consistente con inclusi elementi pomicei da subangolari a subarrotondati.
- 5,50 ÷ 5,90 m: Limo debolmente sabbioso marrone poco consistente.
- 5,90 ÷ 6,20 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa marrone moderatamente consistente.
- 6,20 ÷ 7,00 m: Argilla sabbiosa grigio-verdastra poco consistente.
- 7,00 ÷ 8,00 m: Argilla debolmente limosa grigio-verdastra consistente con inclusi elementi pomicei e rari livelli centimetrici di argilla torbosa.
- 8,00 ÷ 8,50 m: Argilla debolmente sabbiosa marrone da poco consistente a moderatamente consistente.
- 8,50 ÷ 9,20 m: Argilla sabbiosa grigio-plumbea poco consistente.
- 9,20 ÷ 11,4 m: Argilla grigio-plumbea consistente con inclusi elementi pomicei, a letto marrone con livello torboso e abbondanti frammenti di gusci di gasteropodi.
- 11,4 ÷ 12,2 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa marrone da poco consistente a moderatamente consistente con abbondanti gusci di molluschi e a letto resti vegetali lignei.
- 12,2 ÷ 12,5 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa grigia poco consistente.
- 12,5 ÷ 15,0 m: Argilla grigio-bluastro moderatamente consistente con abbondanti gusci di molluschi.
- 15,0 ÷ 17,4 m: Argilla avana poco consistente con inclusi resti di gusci di lamellibranchi e resti vegetali lignei.
- 17,4 ÷ 17,6 m: Argilla torbosa grigio scura poco consistente con inclusi abbondanti resti vegetali lignei.

- 17,6 ÷ 20,0 m: Argilla con sabbia ghiaiosa nero-rossastra poco consistente; frazione ghiaiosa costituita da scorie subangolari (max 4 cm).
- 20,0 ÷ 21,0 m: Sabbia ghiaiosa debolmente limosa rossastra addensata; frazione ghiaiosa costituita da scorie subangolari (max 3 cm).
- 21,0 ÷ 25,6 m: Sabbia ghiaiosa debolmente limosa nera addensata, al letto diventa debolmente argillosa; frazione ghiaiosa costituita da litici scoriacei subangolari (max 4 cm) e rare pomice verdastre millimetriche.
- 25,6 ÷ 26,4 m: Argilla limosa grigio-verdastra estremamente consistente.
- 26,4 ÷ 28,9 m: Argilla limosa giallo-avana alterata poco cementata con inclusi abbondanti elementi pomice millimetrici biancastri.
- 28,9 ÷ 29,5 m: Sabbia fine limosa grigio-avana addensata.
- 29,5 ÷ 30,0 m: Argilla con sabbia grigio-avana poco consistente con inclusi rari elementi pomice.
- 30,0 ÷ 31,0 m: Sabbia grigio-scura da sciolta a poco addensata, a luoghi limosa.

Durante la perforazione sono stati prelevati n°2 campioni di terreno indisturbato alle profondità di 3,00 m e di 5,00 m, nonché è stata effettuata una prova SPT alla profondità di 9,00 m. La falda è stata rinvenuta alla profondità di 4,00 m dal p.c.

5.3 Prove penetrometriche statiche del tipo C.P.T. (Cone Penetration Test)

La prova penetrometrica statica del tipo C.P.T. (di tipo meccanico) consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($v = 2 \text{ cm/s} \pm 0,5 \text{ cm/s}$).

La penetrazione viene effettuata tramite un dispositivo di spinta (martinetto idraulico), opportunamente ancorato al suolo con coppie di coclee ad infissione, che agisce su una batteria doppia di aste (aste coassiali esterne cave e interne piene), alla cui estremità è collegata la punta.

Lo sforzo necessario per l'infissione è misurato per mezzo di manometri, collegati al martinetto mediante una testa di misura idraulica.

Le prove C.P.T. sono state eseguite con un penetrometro Pagani TG 63-200, la cui capacità di spinta di infissione è di 200 KN (Fig. 13).

	BENZINA	DIESEL
A	1567 mm/61,7 inch	1567 mm/61,7 inch
B	2465 mm/97,1 inch	2465 mm/97,1 inch
C	1110 mm/43,7 inch	1110 mm/43,7 inch
D	4600 mm/181,1 inch	4600 mm/181,1 inch
Peso senza accessori	1100 kg/2425 pound	1150 kg/2535 pound
Pressione al suolo (EN 16228-1:2014)	0,28 kg/cm ² - 28,2 kPa 4,01 pound/in ²	0,29 kg/cm ² - 29,2 kPa 4,16 pound/in ²
Pressione al suolo (senza accessori)	0,22 kg/cm ² - 22 kPa 3,13 pound/in ²	0,23 kg/cm ² - 23 kPa 3,27 pound/in ²

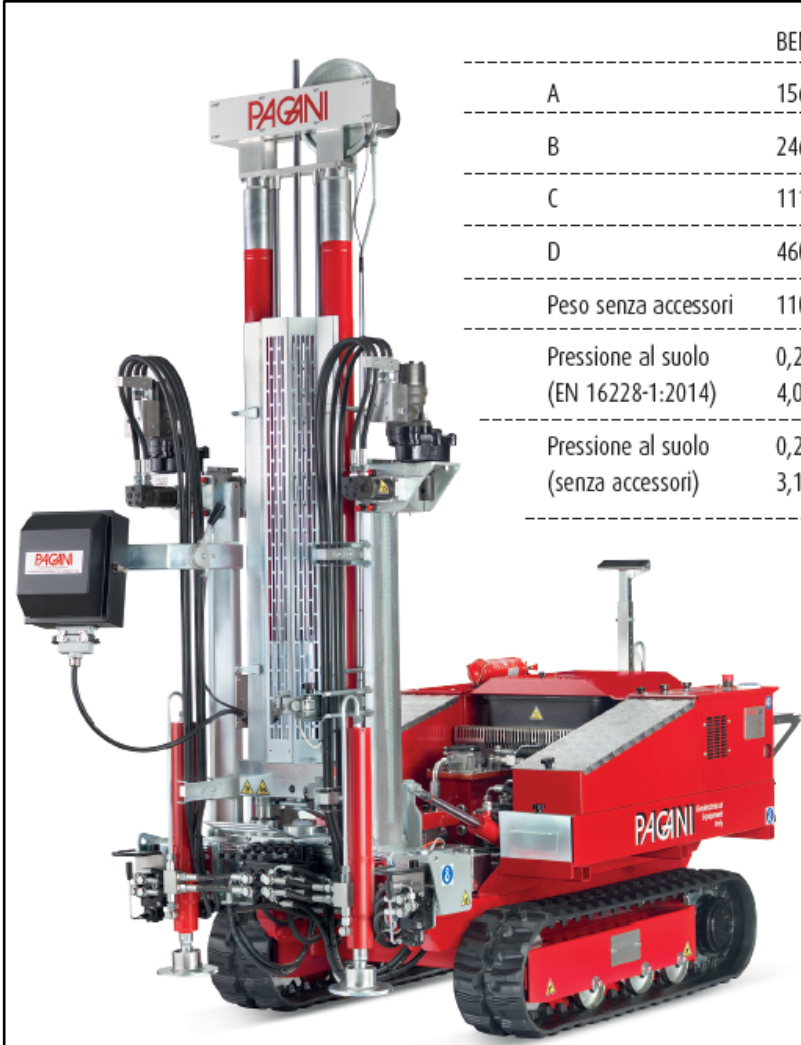


Fig. 13 – Caratteristiche del penetrometro Pagani TG 63-200

La punta conica (del tipo telescopico) è dotata di un manicotto sovrastante, per la misura dell'attrito laterale: punta / manicotto tipo "Begemann" (Fig. 14).

Le dimensioni della punta / manicotto sono standardizzate, e precisamente:

- diametro Punta Conica meccanica \varnothing = 35,7 mm
- area di punta A_p = 10 cm²
- angolo di apertura del cono α = 60 °
- superficie laterale del manicotto A_m = 150 cm²



Fig. 14 – Punta Begemann

Sulla batteria di aste esterne può essere installato un anello allargatore per diminuire l'attrito sulle aste, facilitandone l'infissione.

Una cella di carico, che ha rilevato gli sforzi di infissione, è montata all'interno di un'unità rimovibile, chiamata "selettore", che preme alternativamente sull'asta interna e su quella esterna. Durante la fase di spinta le aste sono state azionate automaticamente da un comando idraulico.

I valori acquisiti dalla cella di carico sono visualizzati sul display di una Sistema Acquisizione Automatico. Le letture di campagna (che possono essere rilevate dal sistema di acquisizione sia in Kg che in Kg/cm²) durante l'infissione sono le seguenti:

- *Letture alla punta LP* = prima lettura di campagna durante l'infissione relativa all'infissione della sola punta.
- *Letture laterale LT* = seconda lettura di campagna relativa all'infissione della punta+manicotto.

- *Letture totale LLTT* = terza lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne (tale lettura non sempre viene rilevata in quanto non è influente metodologicamente ai fini interpretativi).

I dati rilevati della prova sono quindi una coppia di valori per ogni intervallo di lettura costituiti da *LP* (Lettura alla punta) e *LT* (Lettura della punta + manicotto), le relative resistenze vengono quindi desunte per differenza, inoltre la resistenza laterale viene conteggiata 20 cm sotto (alla quota della prima lettura della punta). Trasferiti i dati ad un pc, sono stati elaborati da un apposito programma di calcolo.

Le resistenze specifiche ***Qc*** (Resistenza alla punta ***RP***) e ***Ql*** (Resistenza Laterale ***RL*** o ***fs***, attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) sono state desunte tramite opportune costanti e sulla base dei valori specifici dell'area di base della punta e dell'area del manicotto di frizione laterale tenendo in debito conto che:

- $A_p = \text{l'area punta (base del cono punta tipo "Begemann")} = 10 \text{ cm}^2$
- $A_m = \text{area del manicotto di frizione} = 150 \text{ cm}^2$
- $C_t = \text{costante di trasformazione} = 10$

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica ha consentito di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che ha permesso anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con i sondaggi geognostici a carotaggio continuo per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica ha permesso, inoltre, di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore dei vari strati omogenei e la consistenza in generale del terreno.

I dati di uscita principali sono stati relativi al valore di ***RP*** (*Resistenza alla punta*) e di ***RL*** (*Resistenza laterale o fs, attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione*); inoltre è stato calcolato il rapporto ***RP/RL*** (*Rapporto Begemann, 1965*) e il rapporto ***RL/RP*** (*Rapporto Schmertmann 1978 – FR %*).

I valori sono calcolati con le seguenti formule:

- ***Resistenza alla punta = Qc (RP)*** = $(LP \times Ct)/10 \text{ cm}^2$.
- ***Resistenza laterale = Ql (RL) (fs)*** = $[(LT - LP) \times Ct]/150 \text{ cm}^2$.

dove:

- $Q_c (RP)$ = *Letture alla punta LP x Costante di Trasformazione Ct/Superficie Punta Ap*
- $Q_l (RL) (fs)$ = *Letture laterale LT- Letture alla punta LP x Costante di Trasformazione Ct/Am area del manicotto di frizione.*

Da notare che:

- $A_p = 10 \text{ cm}^2$ e $A_m = 150 \text{ cm}^2$
- *la resistenza laterale viene conteggiata 20 cm sotto (alla quota della prima lettura della punta).*

Di seguito si riportano le coordinate geografiche delle prove C.P.T. eseguite nelle aree esaminate e delle tabelle riepilogative in cui sono indicate la resistenza alla punta e quella laterale per ogni unità litotecnica individuata. Tutte le elaborazioni, invece, sono riportate nell'allegato delle indagini geognostiche.

Numero prova	Latitudine	Longitudine
CPT 1 (Foto 3)	41.074920°N	13.989600°E



Foto 3 – Ubicazione della prova penetrometrica statica CPT1

Prova C.P.T. 1

Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	fs/qc x 100 (Kg/cm ²)	Descrizione
2,60	12,09	0,39	3,35	Argilla sabbiosa e limosa
4,00	51,43	3,02	8,91	Argilla inorganica non sensitiva non fessurata
7,20	10,00	0,47	4,67	Argilla media
14,20	8,51	0,35	4,29	Argilla media
16,20	18,40	0,93	5,43	Argilla molto compatta
19,00	69,77	0,97	1,46	Sabbia
20,00	142,40	2,27	1,56	Sabbia densa o compatta

Numero prova	Latitudine	Longitudine
CPT 2 (Foto 4)	41.072610°N	13.986190°E



Foto 4 – Ubicazione della prova penetrometrica statica CPT2

Prova C.P.T. 2

Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	fs/qc x 100 (Kg/cm ²)	Descrizione
3,00	14,38	0,51	3,58	Argilla sabbiosa e limosa
4,40	54,14	2,91	8,01	Argilla inorganica non sensitiva non fessurata
7,20	14,43	0,70	4,79	Argilla compatta
15,00	10,10	0,27	2,70	Argilla sabbiosa e limosa

Numero prova	Latitudine	Longitudine
CPT 3 (Foto 5)	41.072640°N	13.990170°E



Foto 5 – Ubicazione della prova penetrometrica statica CPT3

Prova C.P.T. 3

Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	fs/qc x 100 (Kg/cm ²)	Descrizione
2,40	9,70	0,24	2,70	Argilla sabbiosa e limosa
4,00	41,75	1,55	6,33	Argilla inorganica non sensitiva non fessurata
7,80	13,22	0,58	4,56	Argilla compatta
15,00	7,53	0,34	4,68	Argilla media

5.4 Prove penetrometriche dinamiche continue

Per l'esecuzione delle prove penetrometriche dinamiche continue (Foto 6-7) si è utilizzato un penetrometro dinamico modello "TG 30/20", prodotto dalla ditta PAGANI, classificato come medio dalla ISSMFE (1988). Il penetrometro dinamico descritto è conforme, nelle caratteristiche tecniche generali, allo standard nazionale D.P.L. (penetrometro dinamico leggero italiano) e a quello internazionale (Fig. 15).

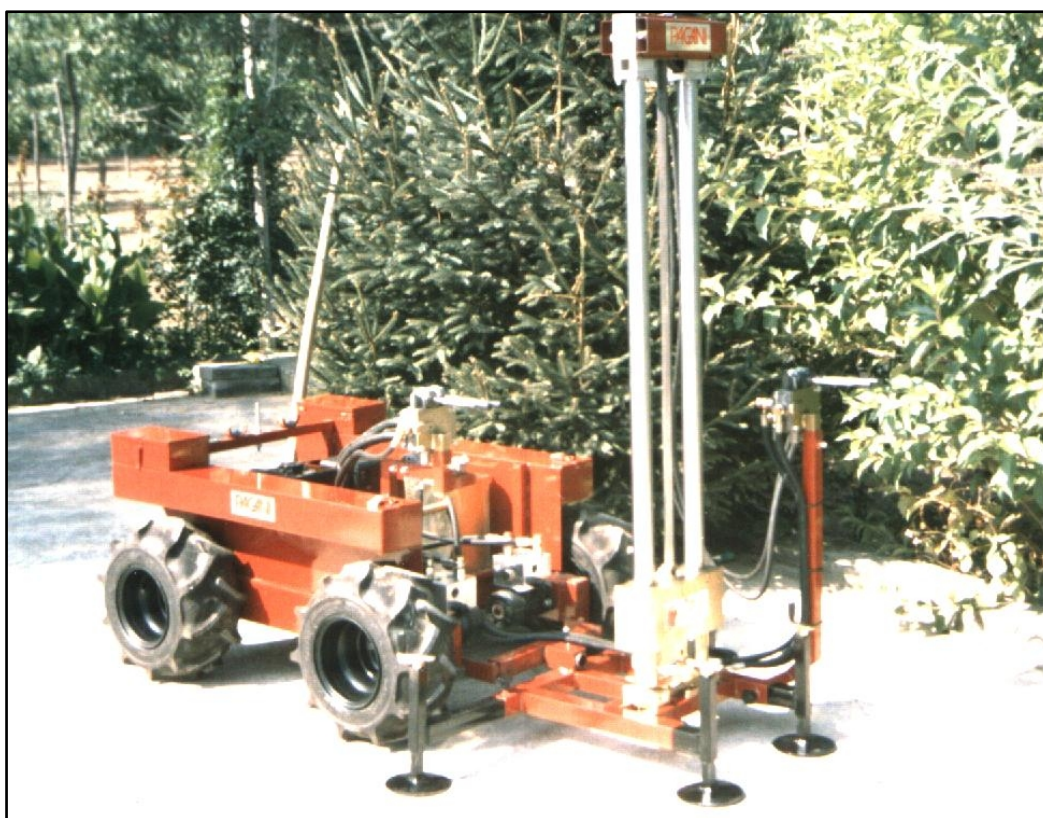


Fig. 15 – Penetrometro dinamico modello "TG 30/20" prodotto dalla ditta PAGANI

Le informazioni che ogni prova ha fornito sono state di tipo continuo, poiché le misure di resistenza alla penetrazione sono eseguite durante tutta l'infissione, ottenendo così una valutazione quantitativa del grado di addensamento e di consistenza dei terreni attraversati.

Durante l'esecuzione delle prove sono stati misurati, per intervalli consecutivi di 10 cm, il numero di colpi necessari per l'attraversamento del litotipo interessato.

I valori del numero di colpi $N_{TG30-20}$ così registrati, sono stati utilizzati per l'elaborazione dei penetrogrammi, per la determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati e per il calcolo della resistenza dinamica alla punta R_{pd} .

È da osservare che, in terreni con caratteristiche simili a quelli che sono presenti nel sottosuolo dell'area indagata, risulta sperimentalmente, che il numero di colpi $N_{TG30-20}$ per infissioni di 10 cm, corrisponde mediamente al numero di colpi N_{SPT} per infissioni di 30 cm.

Poiché la maggior parte delle correlazioni esistenti riguardano i valori del numero di colpi N_{SPT} ottenuto con la prova penetrometrica standard (S.P.T.), si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi di una prova dinamica NT_{G30-20} con N_{SPT} .

Il passaggio viene dato da:

$$N_{SPT} = \beta_t N$$

dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui Q è l'energia specifica per colpo e Q_{SPT} è quella riferita alla prova SPT.

L'energia specifica per colpo viene calcolata come segue:

$$Q = \frac{M^2 \cdot H}{A \cdot \delta \cdot (M + M')}$$

in cui:

- M = rappresenta il peso della massa battente;
- M' = è il peso aste;
- H = l'altezza di caduta;
- A = l'area della base punta conica;
- δ = il passo di avanzamento.

Le elaborazioni sono state effettuate mediante il programma di calcolo automatico *Dynamic Probing* della *GeoStru Software*. Il programma calcola il rapporto delle energie trasmesse (*coefficiente di correlazione con SPT*) tramite le elaborazioni proposte da Pasqualini 1983 - Meyerhof 1956 - Desai 1968 - Borowczyk-Frankowsky 1981.

Una vasta esperienza acquisita, unitamente ad una buona interpretazione e correlazione, permettono di ottenere informazioni utili sulle litologie e sui dati geotecnici dei terreni attraversati lungo le verticali esplorate.

In particolare il programma di calcolo consente di ottenere informazioni su:

- l'andamento verticale e orizzontale degli intervalli stratigrafici,
- la caratterizzazione litologica delle unità stratigrafiche,
- i parametri geotecnici suggeriti da vari autori in funzione dei valori del numero dei colpi e della resistenza alla punta.

Di seguito sono riportati, per ogni profilo penetrometrico analizzato, le profondità dei vari litotipi riscontrati, i valori dei numeri di colpi medi in sito ($N_{TG\ 30/20}$) e quelli normalizzati per ogni strato

(N_{SPT} equivalente), la valutazione della resistenza dinamica alla punta (R_{pd}) determinata con la Formula degli Olandesi.

La Formula degli Olandesi è di seguito riportata:

$$R_{pd} = \frac{M^2 \cdot H}{[A \cdot e \cdot (M + P)]} = \frac{M^2 \cdot H \cdot N}{[A \cdot \delta \cdot (M + P)]}$$

dove:

- R_{pd} = resistenza dinamica punta (area A);
- e = infissione media per colpo (d/N);
- M = peso massa battente (altezza caduta H);
- P = peso totale aste e sistema battuta.

Prova penetrometrica dinamica Pd 1 – Lat. = 41.073635°; Log. = 13.987898°

Strato (n°)	Profondità (m)	Spessore (m)	N TG 30/20 (n°)	Coeff. Corr. con N_{SPT} (n°)	N_{SPT} equiv. (n°)	R_{pd} (Kg/cm ²)
1	3,5	3,5	2,03	0,78	2	7,08
2	4,1	0,6	11,0	0,78	9	35,02
3	7,3	3,2	4,25	0,78	3	12,52
4	13,5	7,7	15,02	0,78	12	37,3



Foto 6 – Ubicazione della prova penetrometrica dinamica Pd1

Prova penetrometrica dinamica Pd 2 – Lat. = 41.072182°; Log. = 13.991351°

Strato (n°)	Profondità (m)	Spessore (m)	N TG 30/20 (n°)	Coeff. Corr. con N _{SPT} (n°)	N _{SPT} equiv. (n°)	Rpd (Kg/cm ²)
1	2,8	2,8	2,18	0,78	3	7,79
2	4,1	1,3	15,92	0,78	17	51,69
3	8,1	4,0	6,0	0,78	5	17,56
4	13,5	6,9	14,93	0,78	9	36,64



Foto 7 – Ubicazione della prova penetrometrica dinamica Pd3

5.5 Prelievo del campione di terreno indisturbato

Per la determinazione sperimentale delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni di fondazione nel corso delle prove penetrometriche è stato prelevato un campione di terreno indisturbato (Foto 8) la cui profondità e modalità di prelievo sono riepilogate nella successiva tabella.

Numero Prova	Profondità di prelievo (m)	Sigla campione	Modalità di prelievo	Classe
CPT3	4,50 ÷ 5,00	C1	Pressione - Shelby	Q5

Il prelievo è stato eseguito mediante campionatore con fustella a pareti sottili (Shelby) che viene infissa nel terreno senza rotazione allo scopo di indurre il minore disturbo possibile al campione. La fustella contenente il campione di terreno estratto, costituita da un tubo in acciaio inox con la base tagliente e con angolo di scarpa compreso tra 4° e 15°, all'atto della estrazione è stata separata dal campionatore e le superfici esposte sono state sigillate con paraffina fusa al fine di preservarne integro il contenuto d'acqua. Il campione è stato catalogato, annotando su un'apposita etichetta, i seguenti dati:

- cantiere;
- numero identificativo del campione;
- quota di inizio e fine prelievo.



Foto 8 – Prelievo del campione di terreno indisturbato

5.6 Prove geotecniche di laboratorio

Il campione prelevato durante le indagini in sito è stato trasportato al laboratorio della società *INGE s.r.l.*, sita in Castel Morrone (CE) alla via Taverna Vecchia n°19, laboratorio - *Autorizzazione del Ministero delle Infrastrutture n° 154 del 19/04/2011 per esecuzione e certificazione di indagini geognostiche, prelievo di campioni e prove in sito ai sensi del D.P.R. 380/2001 art. 59 – Circolare 7619 STC del 08/09/10*, per essere sottoposto alle seguenti analisi e prove geotecniche:

- *caratteristiche fisiche generali;*
- *analisi granulometrica;*
- *prova di taglio diretto consolidata drenata;*
- *prova di taglio diretto non consolidata non drenata;*
- *prova edometrica a gradini di carico.*

Di seguito si riporta una sintesi delle caratteristiche geotecniche determinate sui campioni di terreno indisturbato. Per una visione completa di tutti i risultati si rimanda ai certificati di laboratorio allegati alla presente relazione.

Campione S1C1 Profondità di prelievo 2,50 ÷ 3,00

Determinazione delle caratteristiche fisiche generali

- Contenuto d'acqua naturale = 36,27 %
- Peso di volume naturale = 1,80 g/cm³
- Peso di volume secco = 1,35 g/cm³
- Peso specifico dei grani = 2,73 g/cm³
- Indice dei vuoti = 1,02
- Porosità = 0,51
- Grado di saturazione = 0,97
- Peso volume saturo = 1,85 g/cm³

Analisi granulometrica

Composizione granulometrica percentuale

Ghiaie = 0,52 %; Sabbie = 4,86 %; Limo = 39,56 %; Argilla = 54,76 %

Prova di taglio diretto consolidata drenata

Angolo di resistenza al taglio = 26,61°

Coesione = 0,18 Kg/cm²

Prova di taglio diretto non consolidata non drenata

Coesione non drenata = 1,864 Kg/cm²

6. Modello geologico e caratteristiche geotecniche medie dei terreni

Nel presente capitolo vengono esposti i dati geotecnici dei terreni che costituiscono il sottosuolo indagato ricavati dall'elaborazione delle indagini in sito e di laboratorio, dalla bibliografia e da esperienze compiute su questi materiali.

Considerando il modello geologico del sottosuolo, già più volte evidenziato, e ricordando che è stata rinvenuta un'alternanza di litotipi che avendo avuto fasi di deposizione, trasporto e risedimentazione susseguite nel corso dei tempi (vedi inquadramento geologico) risultano avere una certa variabilità deposizionale sia in senso verticale che orizzontale si possono fare le seguenti considerazioni per ciò che riguarda le principali caratteristiche geotecniche risultate considerando sia le indagini eseguite in sito (prove penetrometriche dinamiche continue) sia quelle disponibili per l'area di studio (sondaggi, prove penetrometriche e prove di laboratorio effettuate per il PUC) ed utilizzando le correlazioni possibili desunte dalla bibliografia scientifica.

6.1 Unità litotecniche riscontrate e caratteristiche geotecniche dei terreni

Nell'area di studio la successione stratigrafica ricostruita dalle indagini effettuate in sito, unitamente a quelle disponibili per il territorio esaminato, è costituita da un'alternanza di terreni marcatamente coesivi che hanno fatto registrare valori del peso di volume naturale compreso tra $1,7 \text{ g/cm}^3$ e $1,9 \text{ g/cm}^3$.

I valori misurati di N_{spt} sono sempre inferiori a 10, tranne che per uno strato di terreno riscontrato mediamente tra le profondità di 2,70 m e 4,00 m costituito da argilla con limo sabbioso inglobante elementi lapidei e/o pomicei che ha fatto elevare il numero di colpi medio N_{spt} delle prove penetrometriche dinamiche e la resistenza alla punta Q_c e laterale f_s delle prove penetrometriche statiche.

I dati scaturiti dal rilevamento geologico di campagna e dall'insieme delle indagini eseguite in sito e dall'analisi di quelle disponibili per l'area di studio, previo opportune elaborazioni ed interpretazioni, hanno consentito di conoscere il modello geologico del sito in esame e di caratterizzare dal punto di vista fisico-meccanico e dinamico i terreni della porzione di sottosuolo di interesse geotecnico. Le unità litotecniche determinate sono le seguenti:

Unità litotecnica A – Spessore medio 2,80 m

- Argilla da poco a moderatamente consistente e limo con argilla alterato.

Unità litotecnica B – Spessore medio 1,30 m

- Argilla con limo sabbioso consistente inglobante elementi lapidei e/o pomicei.

Unità litotecnica C – Spessore medio 3,40 m

- Argilla moderatamente consistente a luoghi debolmente sabbiosa con livelli di limo debolmente sabbioso poco consistente.

Unità litotecnica D – Spessore medio 7,50 m

- Argilla debolmente sabbiosa da poco consistente a moderatamente consistente con inclusi elementi pomicei e livelli di argilla torbosa.

La caratterizzazione fisico-meccanica media dei terreni nell'ambito del volume significativo, dove per volume significativo di terreno si intende la parte di sottosuolo influenzata (direttamente o indirettamente) dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso, è di seguito descritta.

Unità litotecnica A

- Spessore medio = 2,80 m
- Numero dei colpi N_{SPT} = 2
- Resistenza alla punta Q_c = 12,06 Kg/cmq
- Resistenza laterale f_s = 0,38 Kg/cmq
- Densità relativa = 23,53%
- Peso unità di volume = 1,65 t/mc
- Peso di volume saturo = 1,86 t/mc
- Angolo di attrito = 26°
- Coesione drenata = 0,18 Kg/cmq
- Coesione non drenata = 0,47 Kg/cmq
- Modulo elastico = 24 Kg/cmq
- Modulo edometrico = 33 Kg/cmq
- Velocità onde di taglio = 143 m/s

Unità litotecnica B

- Spessore medio = 1,30 m
- Numero dei colpi N_{SPT} = 13
- Resistenza alla punta Q_c = 49 Kg/cmq
- Resistenza laterale f_s = 2,49 Kg/cmq
- Densità relativa = 58,83%
- Peso unità di volume = 1,84 t/mc
- Peso di volume saturo = 1,91 t/mc
- Angolo di attrito = 31°
- Coesione drenata = 0,23 Kg/cmq
- Coesione non drenata = 2,21 Kg/cmq
- Modulo elastico = 120 Kg/cmq
- Modulo edometrico = 140 Kg/cmq
- Velocità onde di taglio = 150 m/s

Unità litotecnica C

- Spessore medio = 3,40 m
- Numero dei colpi N_{SPT} = 4
- Resistenza alla punta Q_c = 12,58 Kg/cmq
- Resistenza laterale f_s = 0,54 Kg/cmq
- Densità relativa = 28,01%
- Peso unità di volume = 1,67 t/mc
- Peso di volume saturo = 1,87 t/mc
- Angolo di attrito = 26°
- Coesione drenata = 0,18 Kg/cmq
- Coesione non drenata = 0,55 Kg/cmq
- Modulo elastico = 36 Kg/cmq
- Modulo edometrico = 37 Kg/cmq
- Velocità onde di taglio = 165 m/s

Unità litotecnica D

- Spessore medio = 7,50 m
- Numero dei colpi N_{SPT} = 10
- Resistenza alla punta Q_c = 8,71 Kg/cmq
- Resistenza laterale f_s = 0,51 Kg/cmq
- Densità relativa = 40,77%
- Peso unità di volume = 1,70 t/mc
- Peso di volume saturo = 1,80 t/mc
- Angolo di attrito = 24°
- Coesione drenata = 0,16 Kg/cmq
- Coesione non drenata = 0,56 Kg/cmq
- Modulo elastico = 67 Kg/cmq
- Modulo edometrico = 45 Kg/cmq
- Velocità onde di taglio = 170 m/s

7. Modellazione sismica ed indagini geofisiche

7.1 Prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Nel sito esaminato sono state eseguite n°2 prospezioni sismiche del tipo **M.A.S.W.** (*Multichannel Analysis of Surface Waves* ovvero *Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh*) al fine di definire le caratteristiche sismostratigrafiche dei litotipi presenti nell'area di studio e classificare sismicamente il suolo secondo la normativa vigente (D.M. 17.01.2018).

Di seguito si riportano le coordinate geografiche delle prospezioni sismiche superficiali M.A.S.W. eseguite nelle aree esaminate.

Coordinate geografiche delle prospezioni M.A.S.W. eseguite presso il Campo 1 Nord

Stendimento	Direzione	Latitudine	Longitudine
Mw 1 (Foto 9)	N-S	41.073765° N	13.987887° E
Mw 2 (Foto 10)	N-S	41.072182° N	13.991351° E

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (Fig. 16) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera.

L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado rispetto alla direzione di propagazione delle onde che vengono generate. Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a $0.92V_s$.

In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e $0.92V_s$. La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).

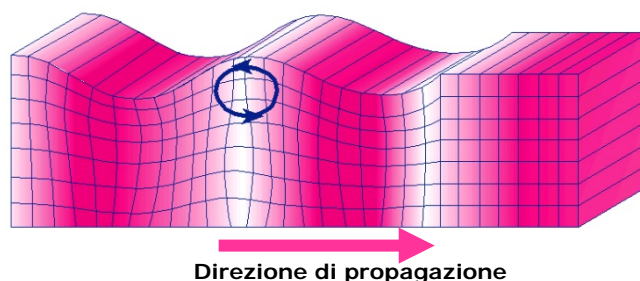


Fig. 16 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

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

Inoltre l'ampiezza delle onde superficiali dipende da \sqrt{r} e non da r come per le onde di volume. In aggiunta, la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_P e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_s , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione sismica di un sito secondo quanto previsto dalle recenti normative antisismiche (O.P.C.M. 3274/03; O.P.C.M. 3431/05; D.M. 17.01.2018).

Infatti, mentre la velocità delle onde P misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde S è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde P , risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle V_s , è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati (Fig. 17).

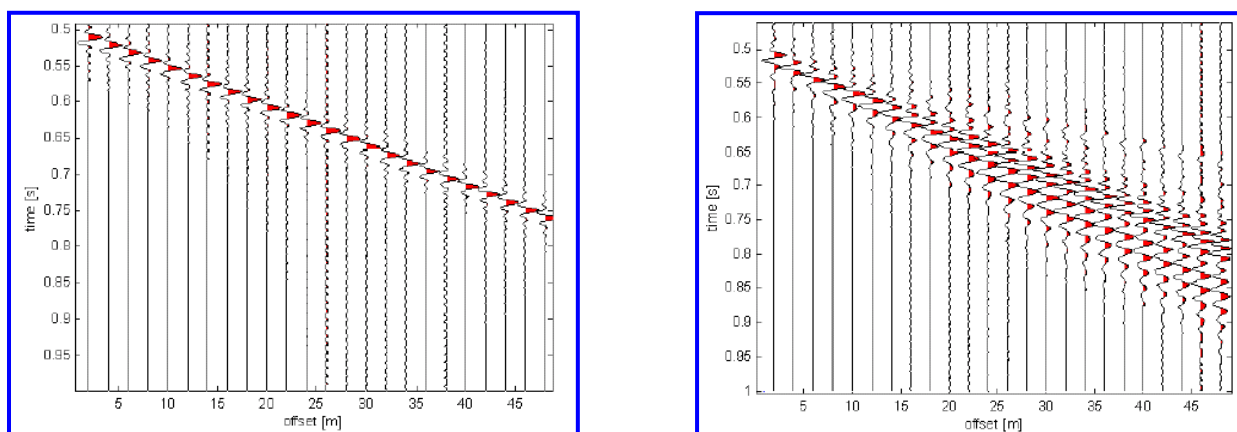


Fig. 17 – Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde superficiali di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh in un mezzo stratificato.

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite processo di inversione (Fig. 18).

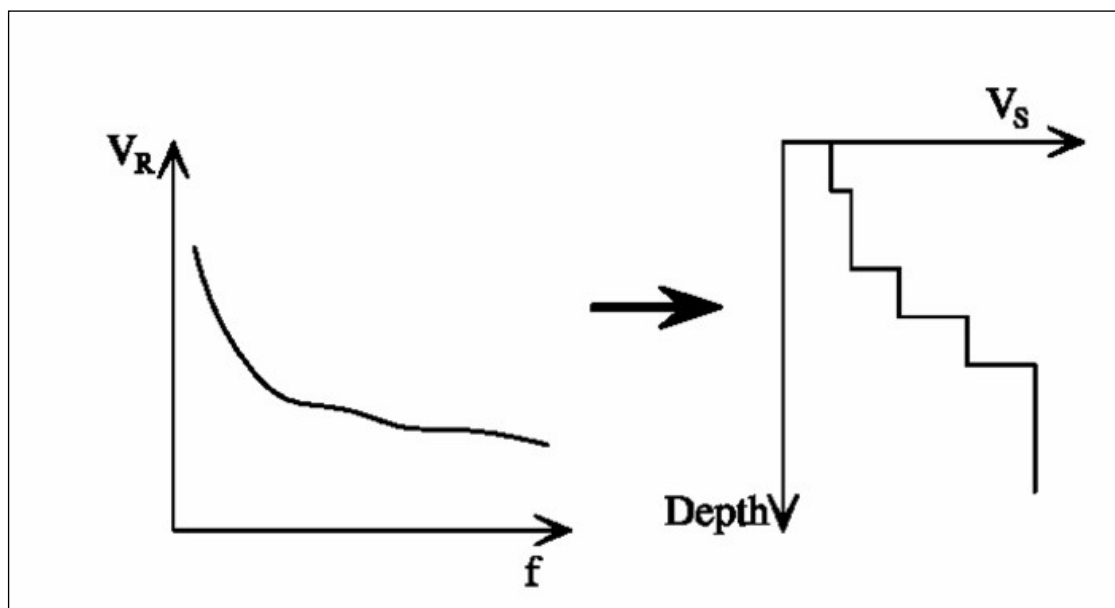


Fig. 18 – Velocità delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (a sinistra) e profilo di velocità delle onde di taglio in funzione della profondità (a destra) ricavato tramite processo d'inversione.

Il metodo MASW (basato sull'analisi della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh) consente una dettagliata ricostruzione della distribuzione della velocità delle onde S nel sottosuolo. L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una efficiente ed accreditata metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio V_s .

Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica SASW, basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW prevede i seguenti passi fondamentali:

1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici, generati da una sorgente energizzante artificiale (maglio battente su piastra in alluminio), lungo uno stendimento rettilineo di sorgente-geofoni.
2. Estrazione del modo fondamentale di oscillazione dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione).
3. Inversione delle curve di dispersione per ottenere un profilo verticale delle V_s nel punto medio di ogni stendimento geofonico).

Lo schema dello stendimento sismico è riprodotto nella seguente figura (Fig. 19).

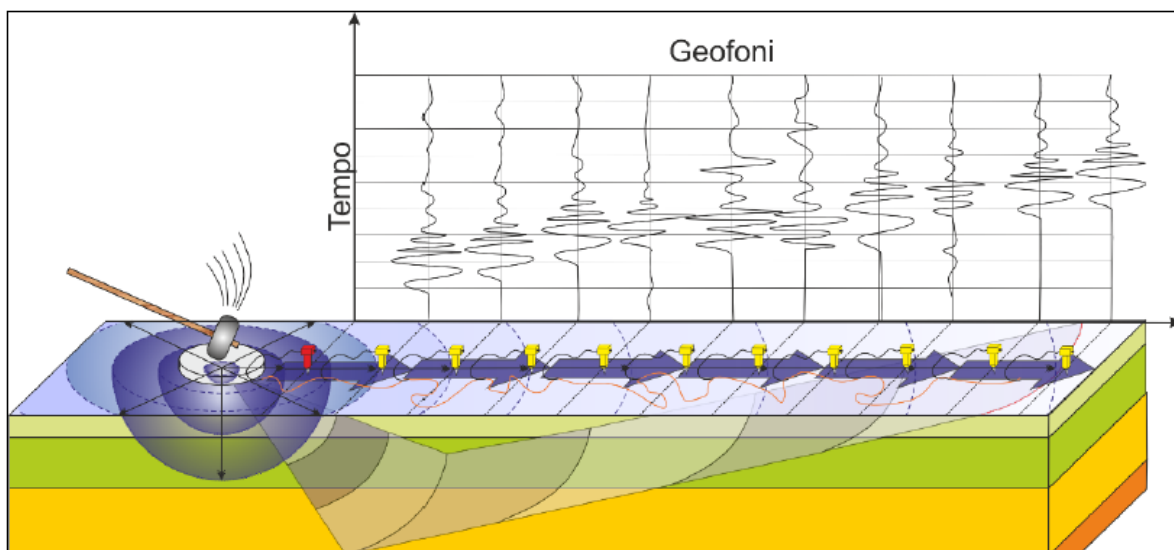


Fig. 19 – Schema dello stendimento sismico

Quando vengono generate onde sismiche usando una sorgente impattante come un martello su una piastra vengono generate sia onde di volume (P ed S), sia onde di superficie (Rayleigh e Love), che si propagano in tutte le direzioni. Alcune di queste onde vengono riflesse e disperse quando incontrano oggetti superficiali o poco profondi (ad esempio, fondazioni di edifici, canali sotterranei, trovanti lapidei, ecc.) e diventano rumore.

Inoltre, vengono quasi sempre rilevate vibrazioni da rumore ambientale proveniente dal traffico veicolare, dall'attività industriale e, in generale, dall'attività umana.

Il vantaggio principale dell'approccio multicanale della tecnica MASW sta nella sua intrinseca capacità di distinguere tutte queste onde dovute al rumore e di isolarle dalle onde superficiali di Rayleigh evidenziando solo il modo fondamentale di oscillazione dei terreni.

L'isolamento del modo fondamentale di oscillazione si basa su molteplici caratteristiche sismiche dei segnali. Le proprietà della dispersione di tutti i tipi di onde (di volume e superficiali) sono visualizzate attraverso un metodo di trasformazione (basato sull'analisi spettrale dei segnali sismici) del campo d'onda che converte direttamente i segnali sismici acquisiti in una immagine dove un modello di dispersione è riconosciuto nella distribuzione dell'energia trasformata in oscillazioni (Fig. 20).

Dispersion Image

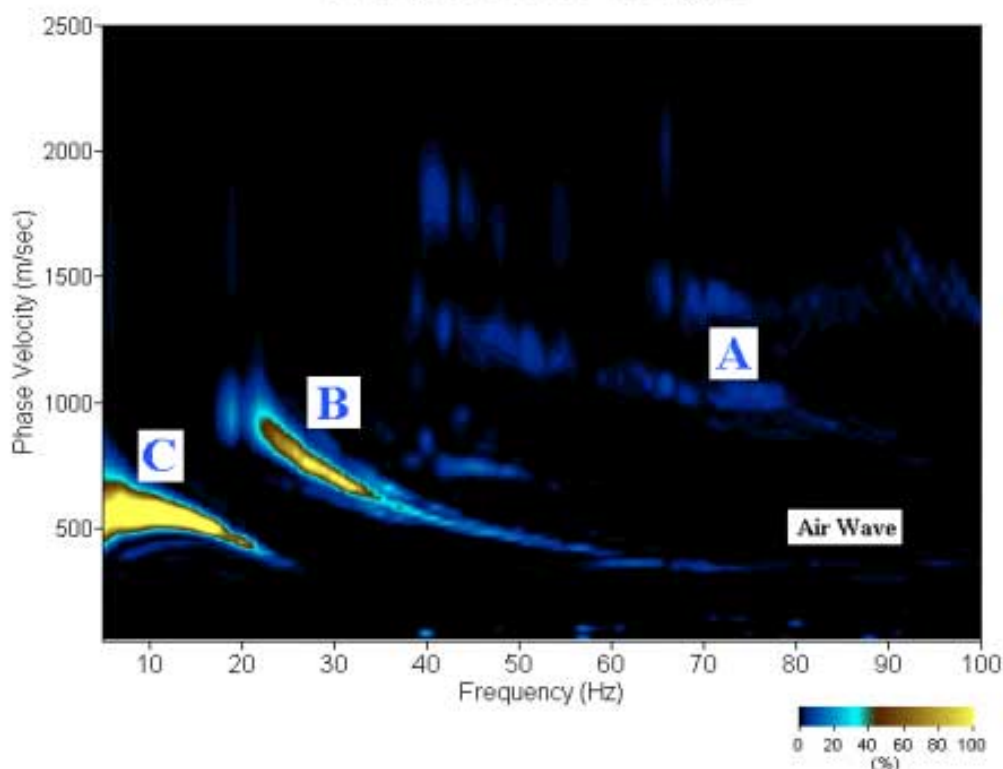


Fig. 20 – Curva di dispersione della velocità di fase in funzione della frequenza delle onde superficiali di Rayleigh relativa ai segnali sismici in Fig. 17. Il picco energetico in corrispondenza di C rappresenta, nel modello della dispersione, il modo fondamentale da estrarre. Il picco energetico in B rappresenta il primo modo mentre quello in A, poco evidente, rappresenterebbe il secondo modo.

Successivamente, il modo fondamentale (proprietà fondamentale della dispersione della velocità di fase delle onde di Rayleigh) viene estratto da un modello specifico. Tutte le altre onde (riflesse, disperse, modi superiori delle onde superficiali, noise ambientale) vengono quindi rimosse durante il processo di elaborazione.

Gli stendimenti delle prospezioni sismiche M.A.S.W. sono stati eseguiti con le seguenti caratteristiche (Tab. 1):

Tab. 1 –Caratteristiche delle fasi di acquisizione relative agli stendimenti eseguiti

Prospezioni sismiche	Geofoni (n°)	Offset (m)	Spacing (m)	Lunghezza complessiva dello stendimento (m)
M.A.S.W. 1	24	1,50	6,00	40,50
M.A.S.W. 2				

Le indagini sono state condotte mediante l'utilizzo di sismografo M.A.E. A6000-S 24 bit 36 canali, strumento compatto e versatile progettato e realizzato appositamente per eseguire indagini di prospezione sismica convenzionali e non convenzionali.

L'elevata dinamica (24 bit di risoluzione) unita alla notevole memoria per l'acquisizione, ne consente l'utilizzo per tecniche di indagine di tipo non convenzionale. Tali indagini risultano particolarmente adatte in aree fortemente antropizzate (aree urbane e industriali) con notevole presenza di rumore di fondo (noise).

La gestione dell'apparecchiatura è notevolmente semplificata dall'interfaccia grafica e dall'interazione con essa tramite il sistema di puntamento touch-screen, che consente di eseguire tutte le operazioni toccando con un pennino gli oggetti interessati direttamente sullo schermo. L'ambiente operativo dello strumento è quello di Microsoft Windows XP embedded.

La sorgente sismica è costituita da un impatto transiente verticale (maglio dal peso di 8 kg che batte su una piastra circolare in alluminio). Come trigger/starter è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14Hz, posto in prossimità della piastra. Le oscillazioni del suolo sono state rilevate da 24 geofoni verticali (Geospace – 4.5Hz) posizionati lungo il profilo di indagine con offset e spacing predefiniti (Tab. 1).

La lunghezza complessiva dello stendimento geofonico è stata sufficiente a determinare la sismostratigrafia dei terreni nel sito prescelto fino alla profondità di 31,00 metri dal piano campagna di riferimento. Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale $T=2.048$ s, sono state effettuate con passo di campionamento $dt=0.5$ ms.

La frequenza di campionamento è data da:

$$f_{\text{campionamento}} = 1/dt = 2000 \text{ Hz}$$

La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da:

$$f_{\text{Nyquist}} = 1/2dt = 1000\text{Hz}.$$

La frequenza minima dei segnali è data da:

$$f_{\text{min}} = 1/T = 0.488 \text{ Hz}.$$

L'elaborazione dei dati e l'inversione delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh sono state effettuate con il programma *MASW 2007* dell'ing. Vitantonio Roma che ha permesso di eseguire l'intero processo di elaborazione di una sezione sismostratigrafica delle onde di taglio V_s .

Gli elaborati relativi alle prospezioni sismiche M.A.S.W. effettuate nel sito di specifico interesse sono di seguito riportati (Figg. 21-33).

Prospezione sismica M.A.S.W. Mw1



Foto 9 – Ubicazione della prospezione sismica M.A.S.W. Mw1

Dati sperimentali Mw1

Distanza tra i sensori: 1,50 m
 Numero di campioni temporali 4096
 Passo temporale di acquisizione 2 ms
 Numero di ricevitori usati per l'analisi 24
 L'intervallo considerato per l'analisi comincia a 0 ms
 L'intervallo considerato per l'analisi termina a 8190 ms

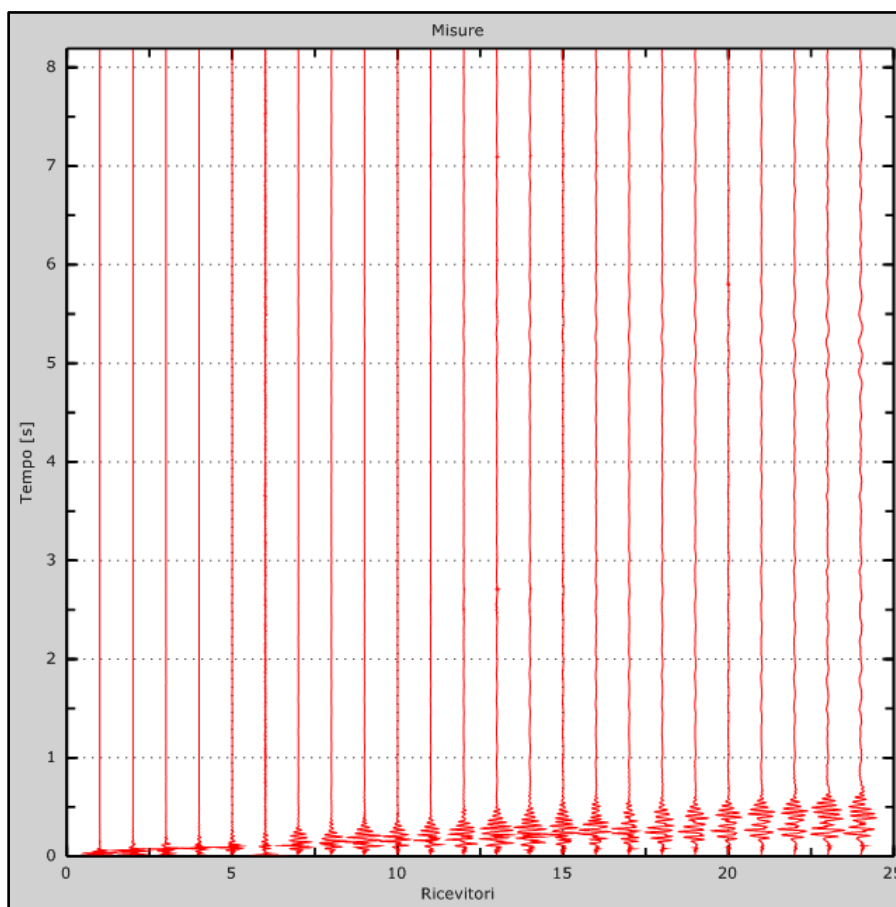


Fig. 21 – Sismogrammi relativi all'indagine Sismica MASW Mw6 (tracce sperimentali)

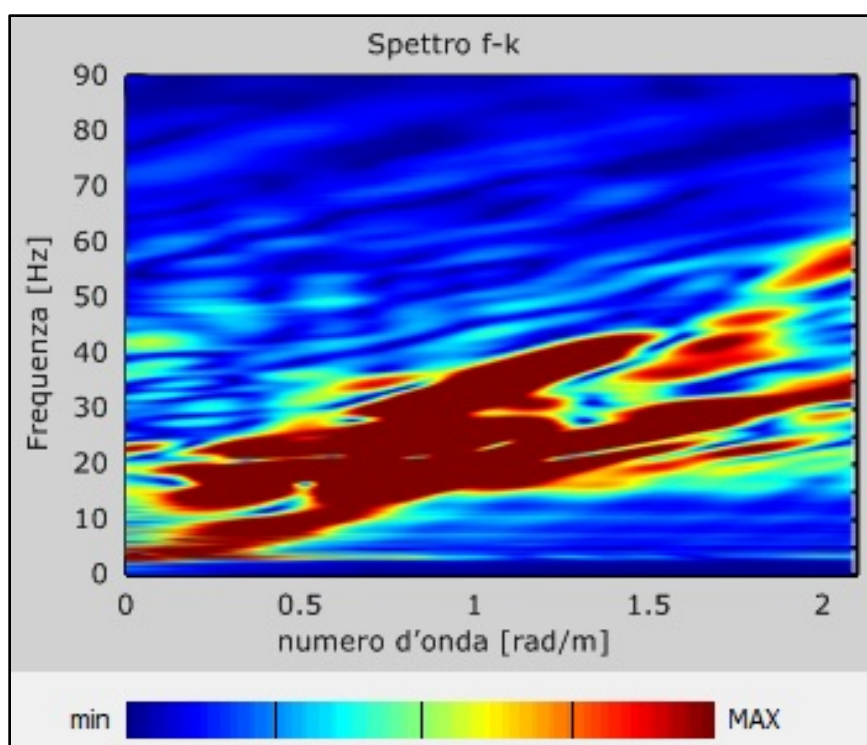


Fig. 22 – Curve di livello dello spettro di risposta sperimentale del suolo

Risultati delle analisi Mw 1

Frequenza finale 70Hz
 Frequenza iniziale 2Hz

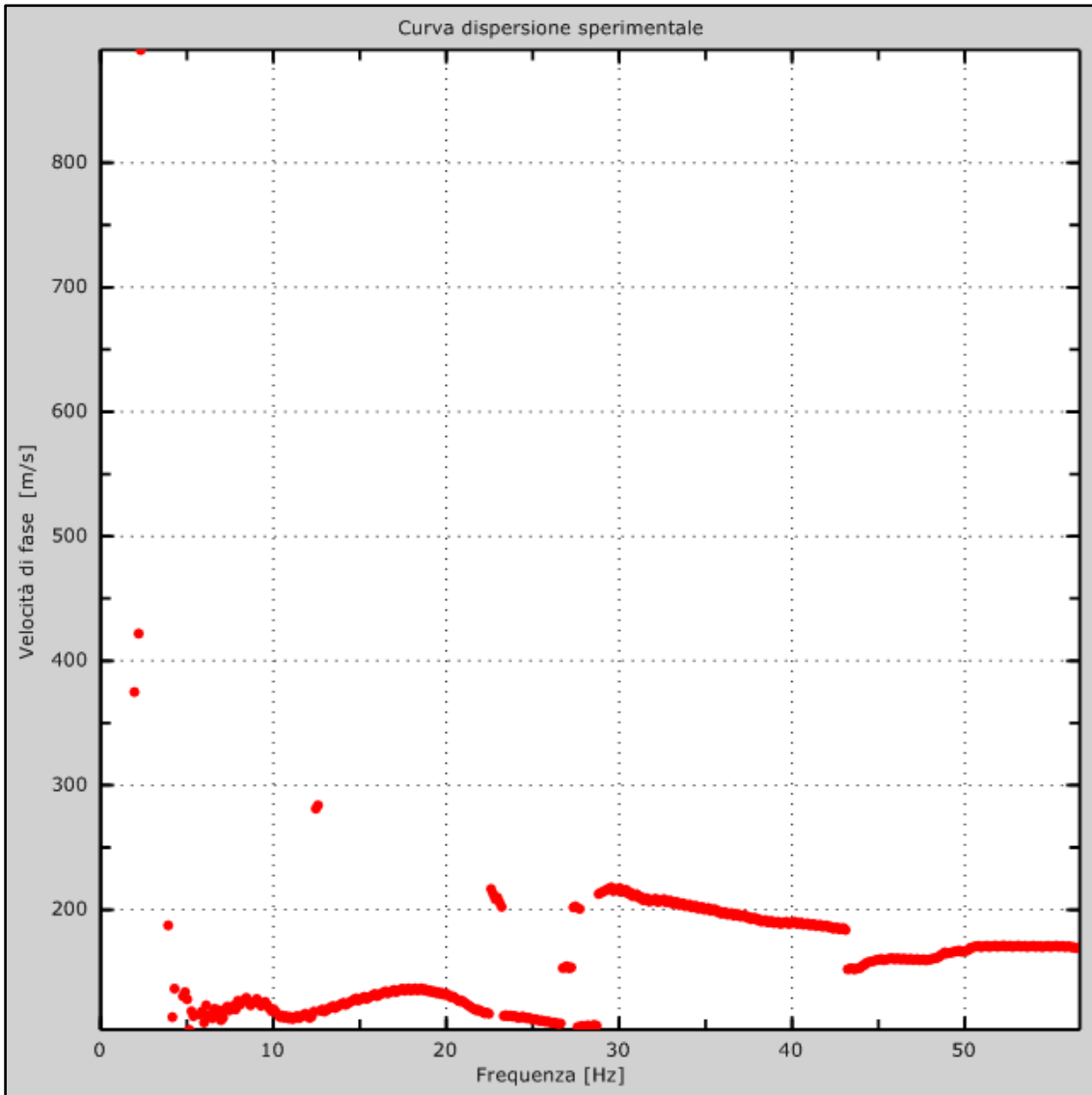


Fig. 23 – Curva di dispersione sperimentale

Curva di dispersione Mw 1

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
2.12041	155.574	148.459	162.689
4.38828	143.122	141.343	144.901
8.66235	137.786	134.228	141.343
15.7276	136.007	130.671	141.343
19.2167	132.449	130.671	134.228
23.1418	118.219	114.661	121.776
28.7243	105.767	100.43	111.103

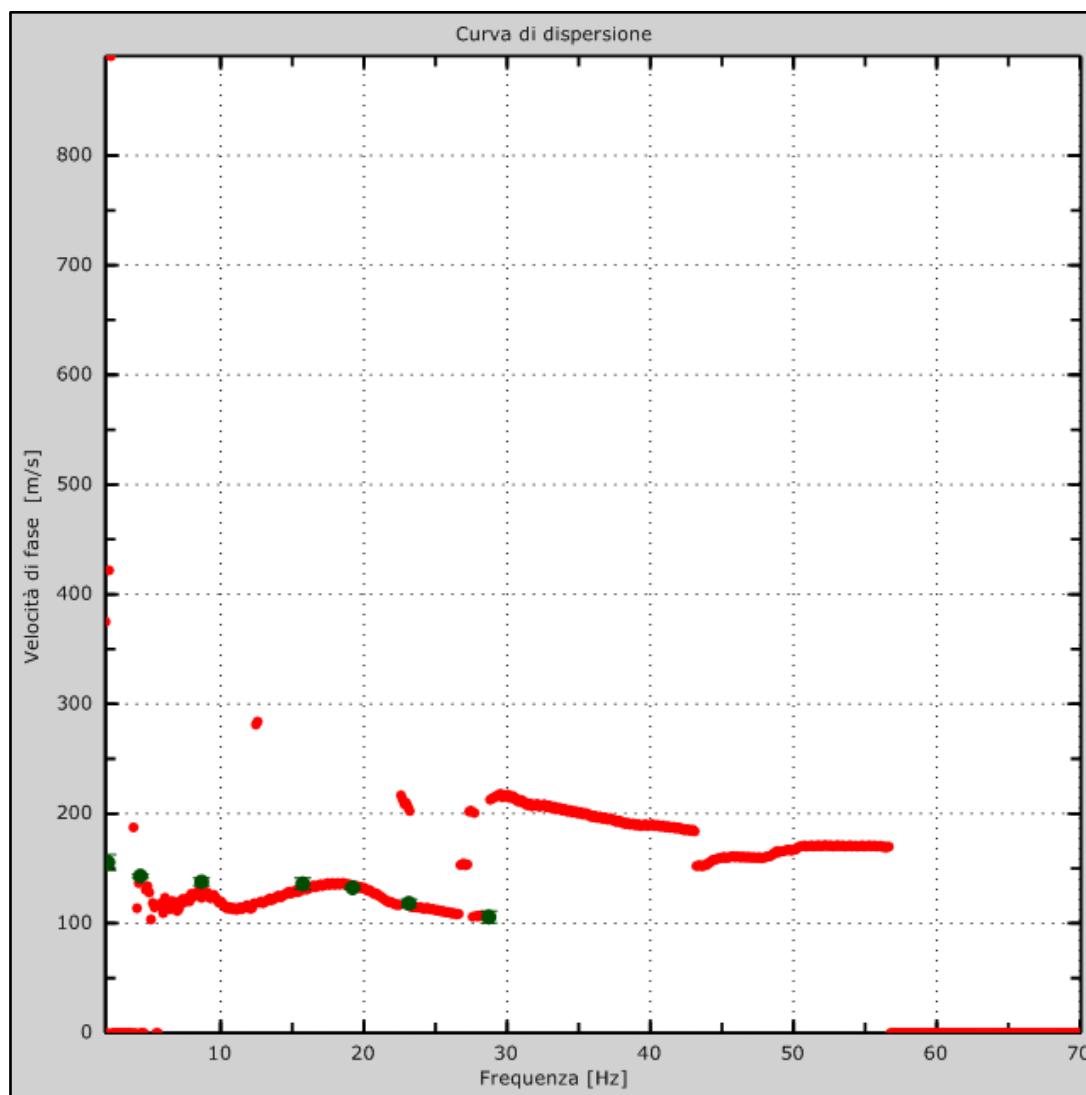


Fig. 24 – Curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh ottenuta dall'indagine Sismica MASW

Profilo in sito Mw 1

Prospetto delle determinazioni dei valori di V_s per i sismostrati riscontrati nella Mw 1

Numero sismostrato	Profondità (m)	Spessore (m)	V_s finale (m/s)	Falda nello strato
S1	0,00 – 3,50	3,50	120	Presente
S2	3,50 – 8,10	4,60	161	Presente
S3	8,10 – 14,40	6,30	168	Presente
S4	14,40 – 21,90	7,50	173	Presente
S5	21,90 – 30,20	8,30	179	Presente

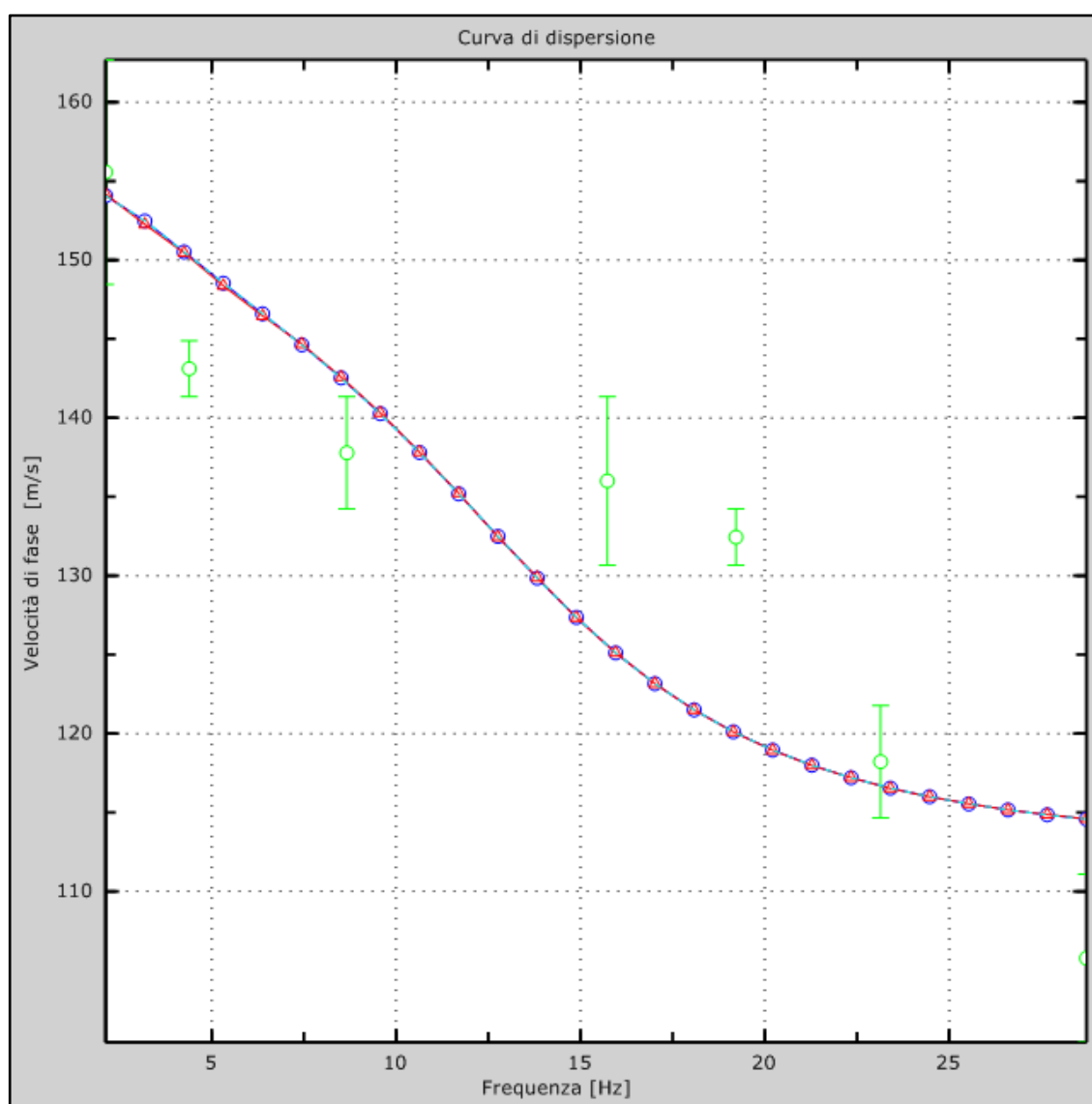


Fig. 25 – Velocità numeriche–punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano), curva apparente (blu), curva numerica (rosso)

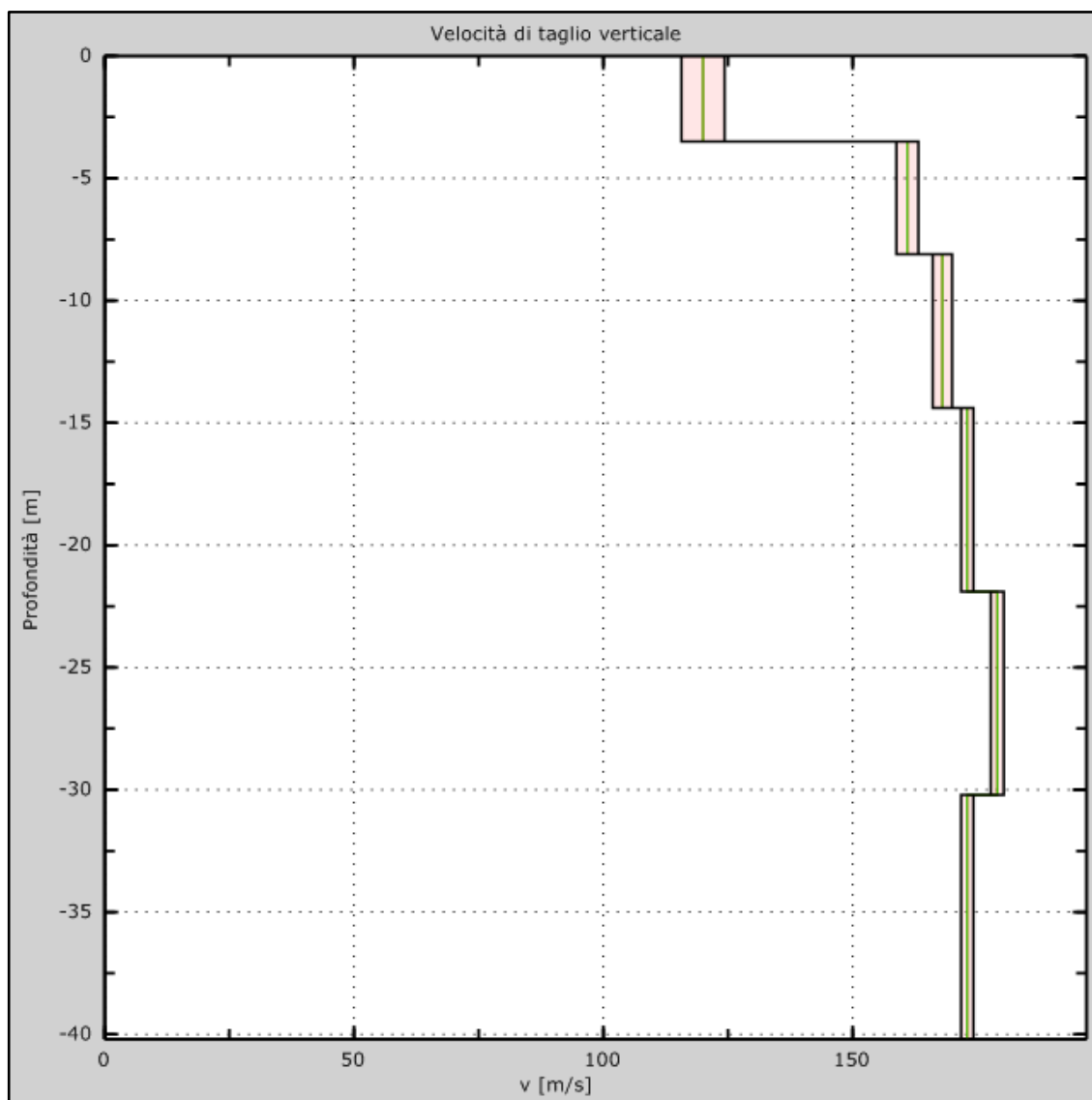


Fig. 26 – Profilo verticale delle V_s (in verde velocità iniziale, in rosso velocità finale) ottenuto dall'inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh

Prospezione sismica M.A.S.W. Mw2



Foto 10 – Ubicazione della prospezione sismica M.A.S.W. Mw2

Dati sperimentali Mw2

Distanza tra i sensori: 1,50 m
 Numero di campioni temporali 4096
 Passo temporale di acquisizione 2 ms
 Numero di ricevitori usati per l'analisi 24
 L'intervallo considerato per l'analisi comincia a 0 ms
 L'intervallo considerato per l'analisi termina a 8190 ms

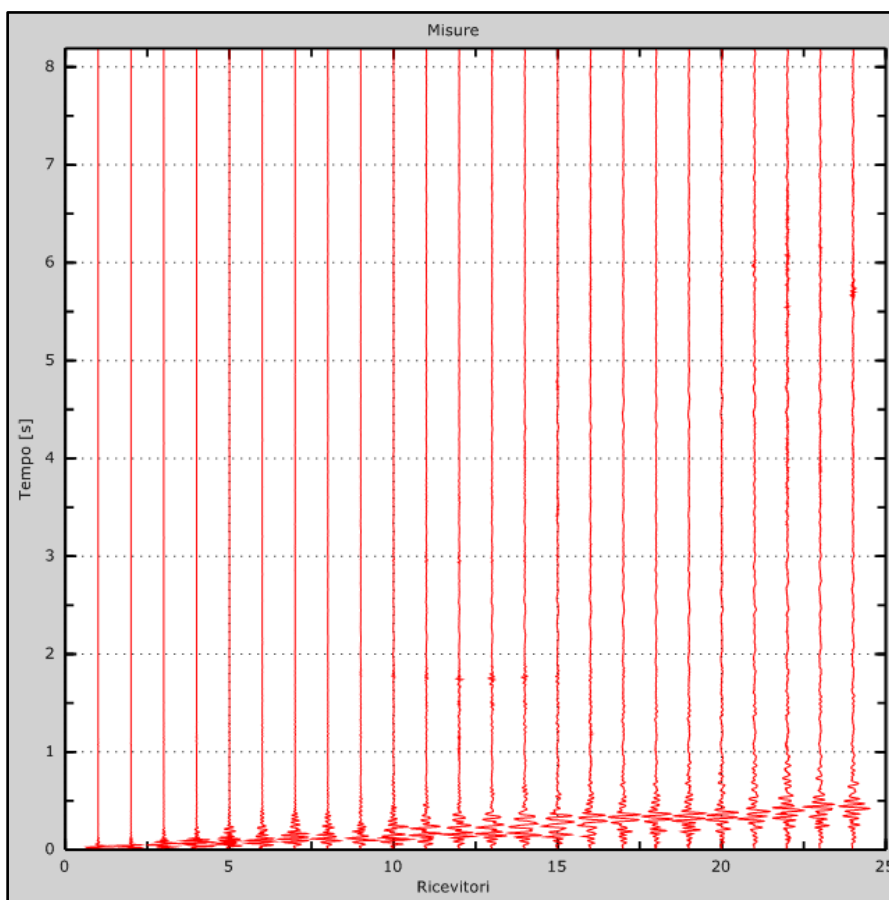


Fig. 27 – Sismogrammi relativi all'indagine Sismica MASW Mw6 (tracce sperimentali)

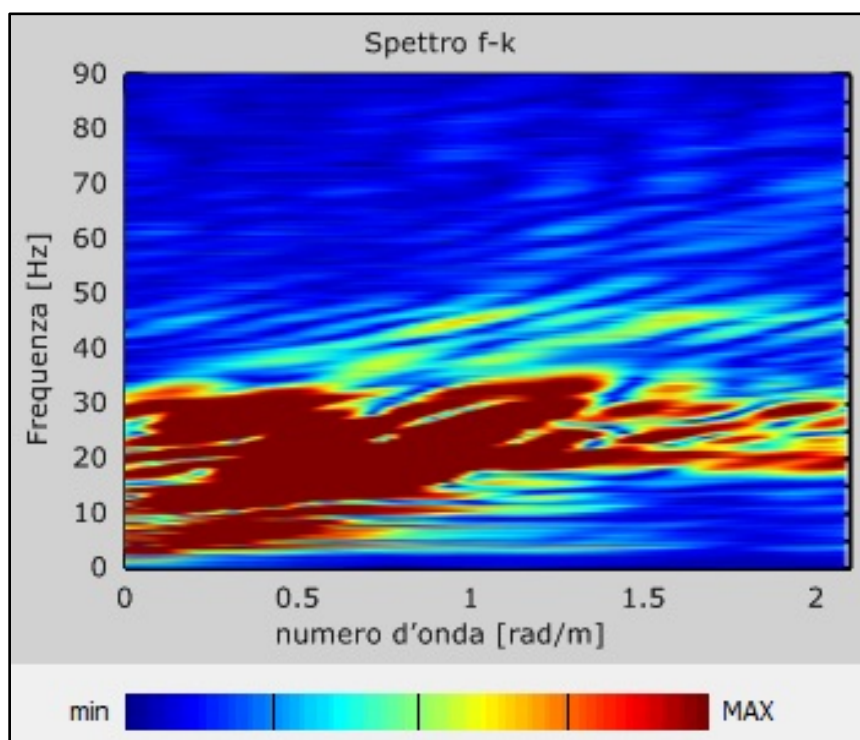


Fig. 28 – Curve di livello dello spettro di risposta sperimentale del suolo

Risultati delle analisi Mw 2

Frequenza finale 70Hz

Frequenza iniziale 2Hz

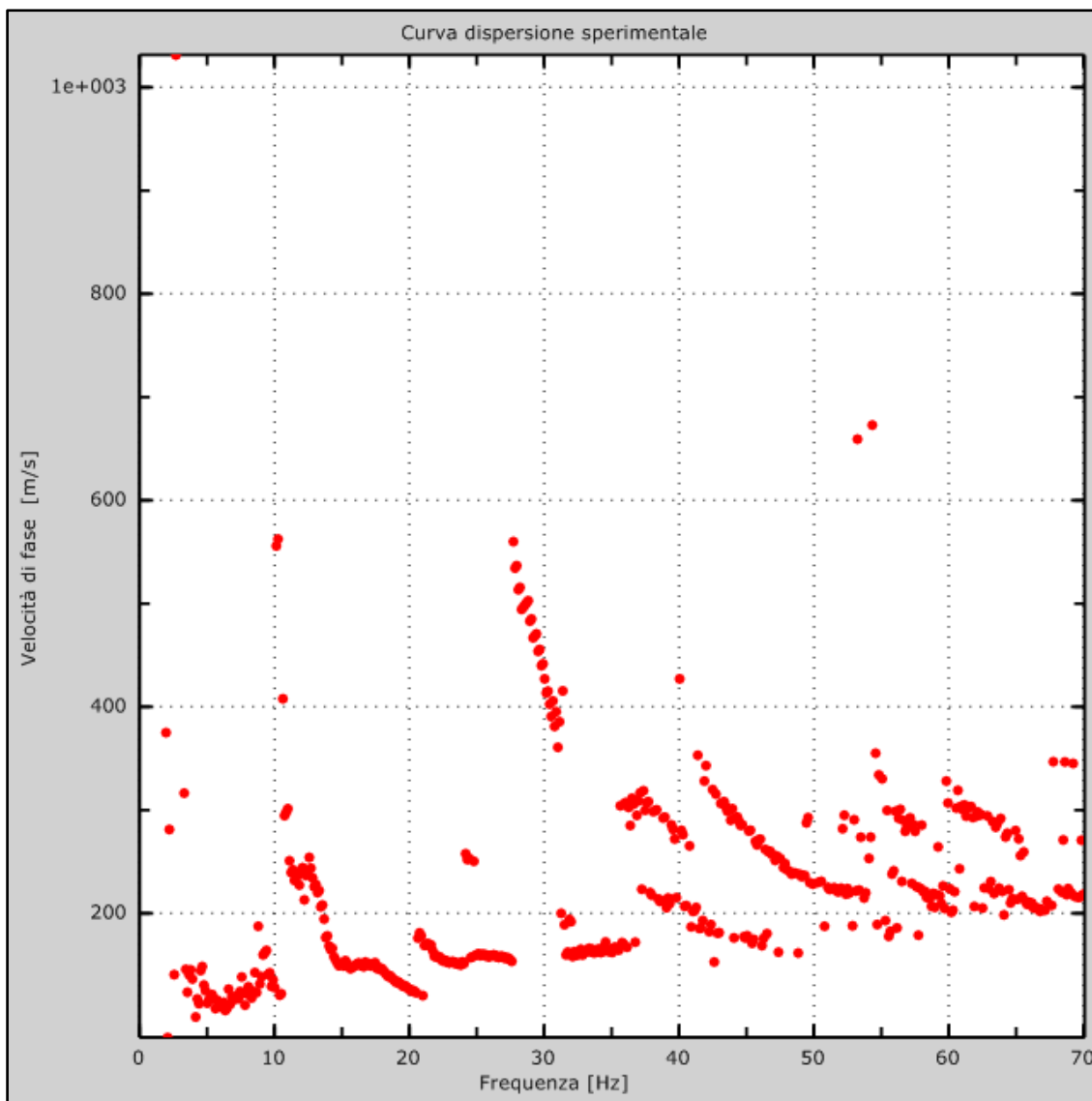


Fig. 29 – Curva di dispersione sperimentale

Curva di dispersione Mw 2

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
2.45685	165.721	157.482	173.959
4.92189	155.422	151.303	159.541
9.32373	153.362	151.303	155.422
14.5179	157.482	153.362	161.601
21.6489	159.541	157.482	161.601
27.7234	157.482	153.362	161.601
33.9741	157.482	151.303	163.661
42.6897	155.422	153.362	157.482

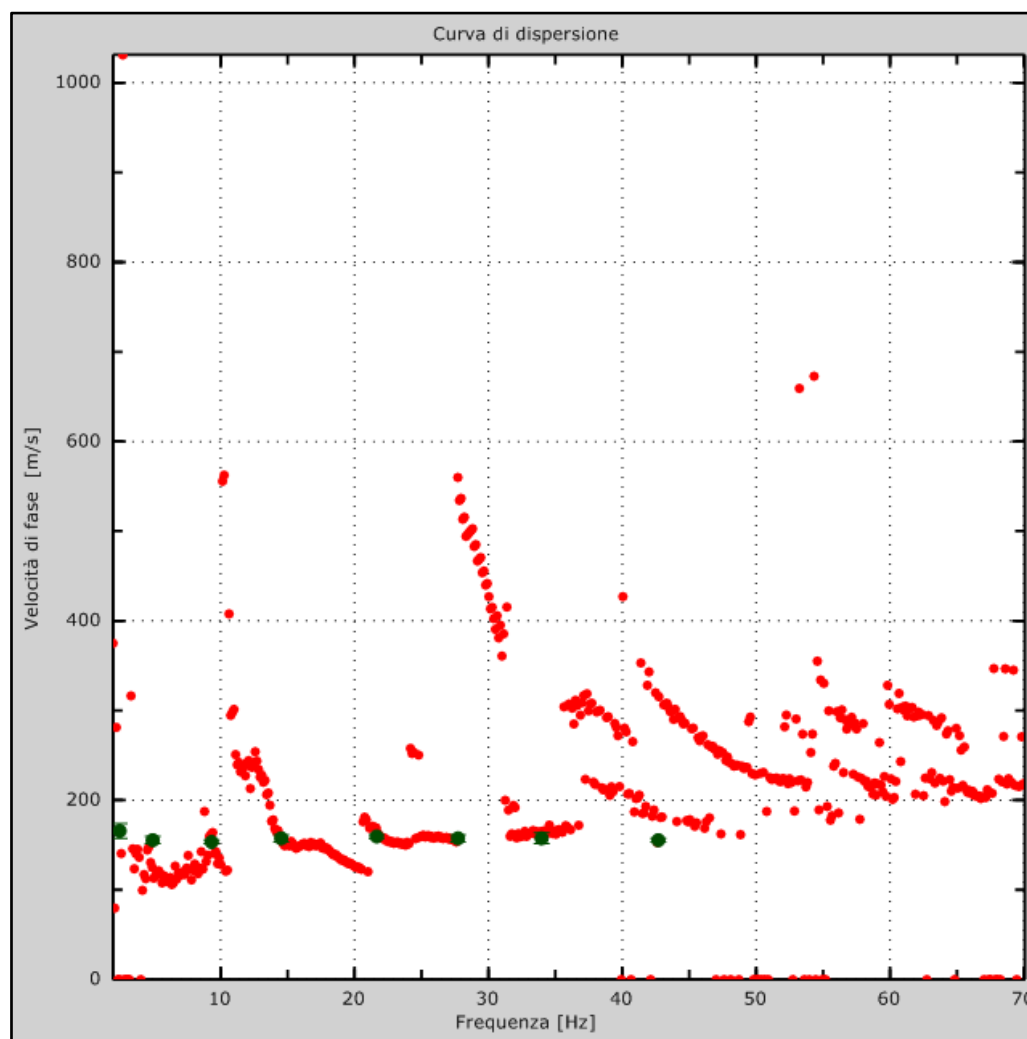


Fig. 30 – Curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh ottenuta dall'indagine Sismica MASW

Profilo in sito Mw 2

Prospetto delle determinazioni dei valori di V_s per i sismostrati riscontrati nella Mw 2

Numero sismostrato	Profondità (m)	Spessore (m)	V_s finale (m/s)	Falda nello strato
S1	0,00 – 2,50	2,50	167	Presente
S2	2,50 – 8,10	5,60	170	Presente
S3	8,10 – 14,30	6,20	173	Presente
S4	14,30 – 22,20	7,90	177	Presente
S5	22,20 – 30,30	8,10	180	Presente

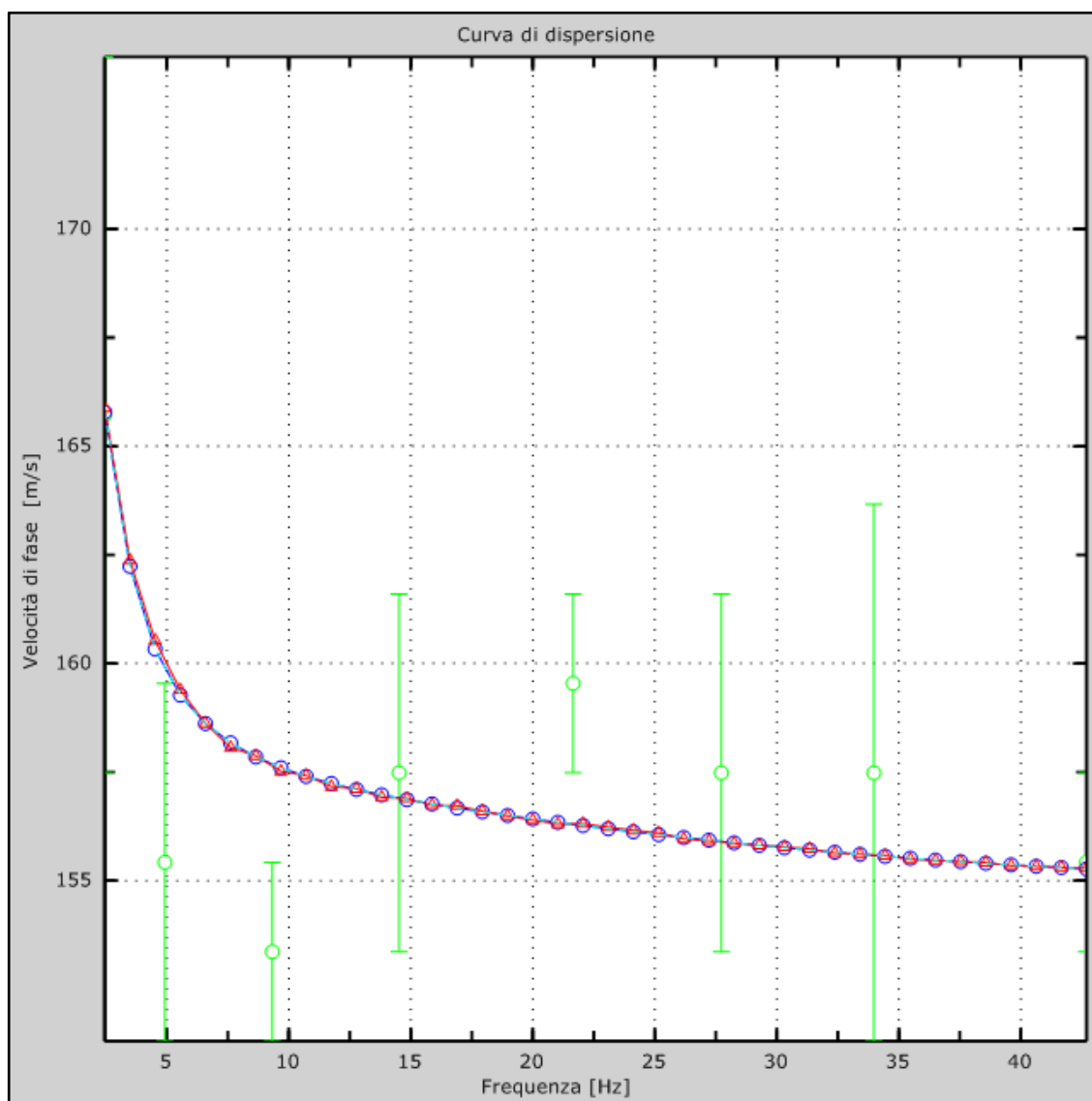


Fig. 31 – Velocità numeriche–punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano), curva apparente (blu), curva numerica (rosso)

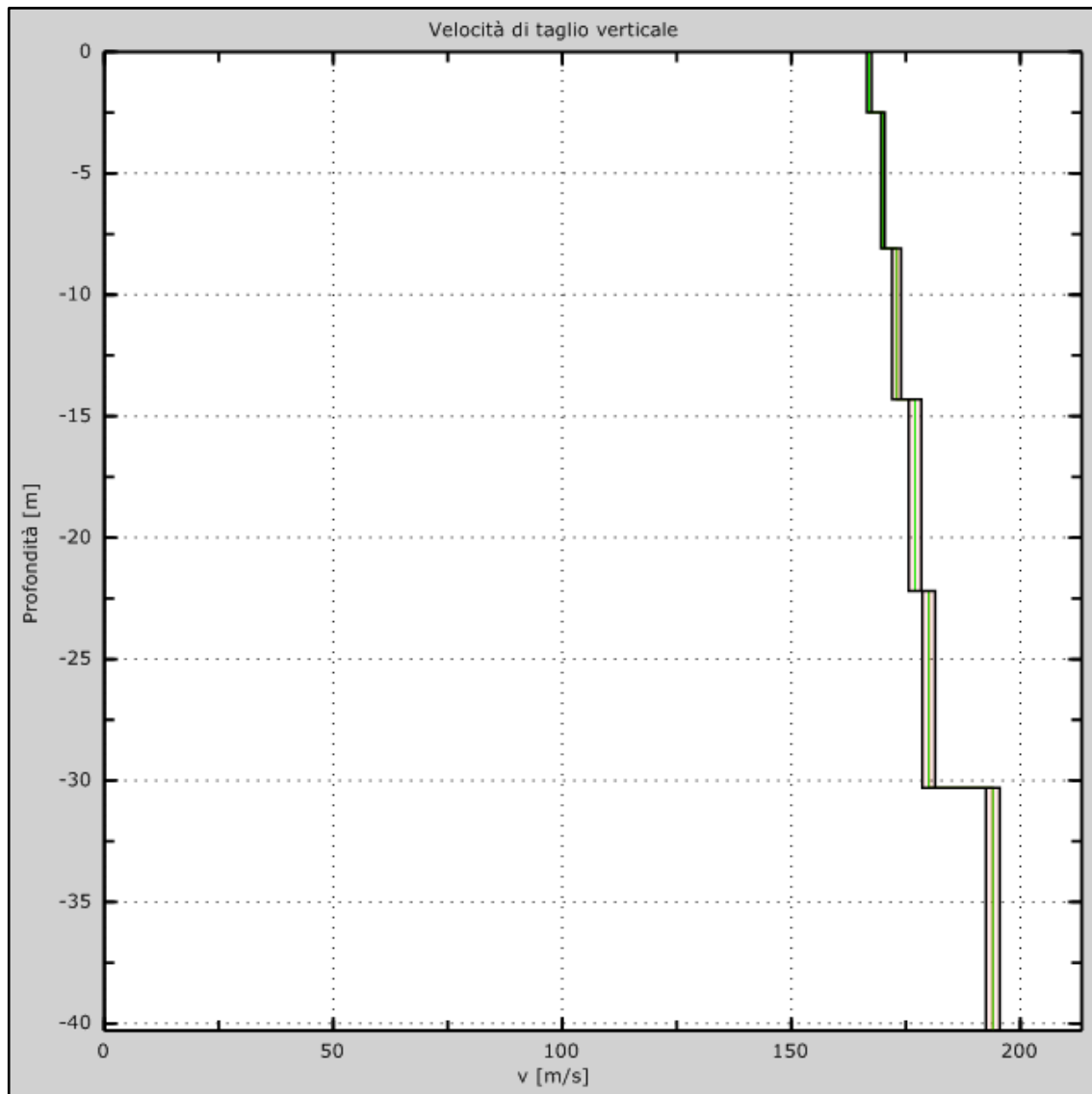


Fig. 32 – Profilo verticale delle V_s (in verde velocità iniziale, in rosso velocità finale) ottenuto dall'inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh

8. Considerazioni sul rischio sismico

8.1 Indicazione della zona sismogenetica

La Zonazione sismogenetica per il territorio nazionale, denominata ZS9, è stata eseguita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Gruppo di Lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Meletti e G. Valensise - marzo 2004) che rappresenta il risultato di modifiche, accorpamenti ed elisioni delle numerose zone della precedente *Zonazione sismogenetica ZS4* (Scandone e Stucchi, 2000) e dell'introduzione di nuove zone (Fig. 33).



Fig. 33 – Zonazione sismogenetica ZS4

L'obiettivo di questa ricerca è stato la realizzazione di un modello più coerente con i nuovi dati e con il quadro sismotettonico oggi disponibile, tenendo in considerazione soprattutto le indicazioni e gli spunti che derivano dall'analisi dei dati relativi ai terremoti più importanti verificatisi successivamente alla predisposizione di ZS4, alcuni dei quali (tra gli altri Bormio 2000, Monferrato 2001, Merano 2001, Palermo 2002, Molise 2002) localizzati al di fuori delle zone-sorgente in essa definite.

La zonazione sismogenetica ZS9 è stata disegnata in maniera tale da soddisfare i seguenti requisiti:

- a) *essere basata sul pregresso modello ZS4;*
- b) *recepire le informazioni sulle sorgenti sismogenetiche italiane alla luce delle nuove evidenze di tettonica attiva e delle valutazioni sul potenziale sismogenetico acquisite negli ultimi anni;*
- c) *considerare ed analizzare i dati relativi a terremoti localizzati al di fuori delle zone sorgente definite in ZS4;*
- d) *essere utilizzabile con i dati di CPT12;*
- e) *fornire una stima di profondità "efficace", definita come l'intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti in ogni zona sorgente, utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale;*
- f) *fornire per ogni ZS un meccanismo di fagliazione prevalente, utilizzabile con le relazioni di attenuazione classiche modificate secondo le procedure di Bommer et al., (2003).*

La Zonazione sismogenetica ZS9 è costituita da 36 zone-sorgente identificate con un numero (da 901 a 936) o con una lettera (da A ad F) (Fig. 34).

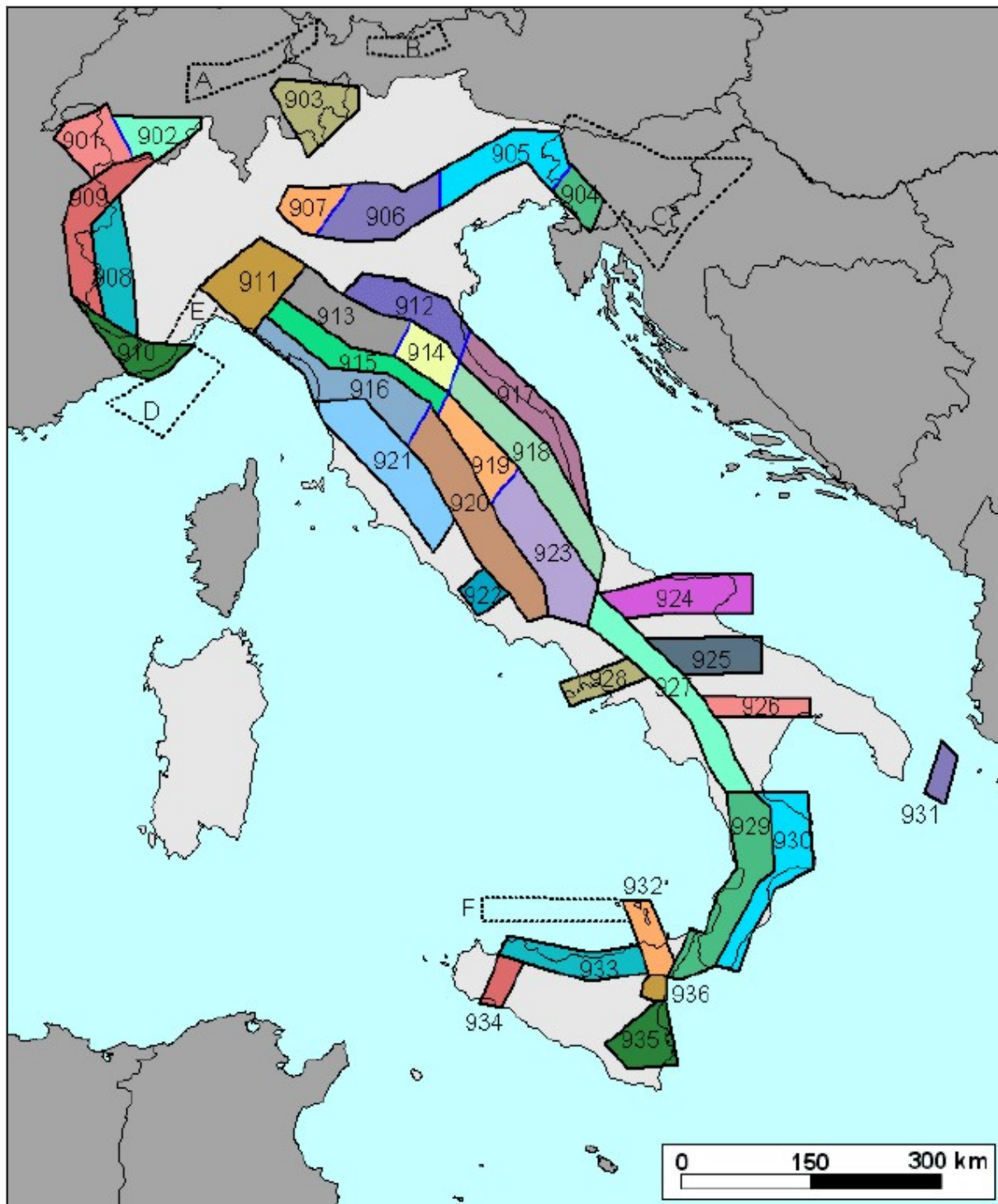


Fig. 34 – Zonazione sismogenetica ZS9

Oltre alla riduzione del numero di zone rispetto alla ZS4, la ZS9 è caratterizzata anche da modifiche dei limiti delle zone, che sono state effettuate tenendo conto dei nuovi dati relativi alle geometrie di singole sorgenti o di insiemi di queste. Si deve però tener presente che i confini geografici di molte zone di ZS9 rappresentano il frutto di un compromesso tra numerosi parametri, di conseguenza, sono affetti da un certo margine di incertezza.

Per far fronte a questa problematica, nella redazione di ZS9 si è fatto ricorso ai “bordi morbidi”, cioè ad una fascia (definita in chilometri) di dimensioni variabili, nella quale si produce uno smussamento della distribuzione della pericolosità, producendo così gradienti meno accentuati ai confini tra le diverse ZS.

La geometria delle sorgenti sismogenetiche della Campania e, più in generale, l'Appennino Meridionale (zone da 56 a 64 in ZS4 e zone da 924 a 928 in ZS9), in seguito alla realizzazione della zonazione sismogenetica ZS9, è stata sensibilmente modificata rispetto a ZS4 (Rapolla, 2005).

La zona 927 include l'area caratterizzata dal massimo rilascio di energia legata alla distensione generalizzata che, a partire da ca. 0.7 Ma, ha interessato l'Appennino meridionale (es. Patacca et al., 1990). Tale zona comprende tutte le precedenti zone di ZS4 coincidenti con il settore assiale della catena, fino al confine calabro-lucano (massiccio del Pollino).

La zona 57 di ZS4, corrispondente alla fascia costiera tirrenica, è stata in gran parte cancellata. Infatti si ritiene che, in caso di zonazione della fascia tirrenica, la sismicità non sarebbe tale da consentire una definizione affidabile dei tassi di sismicità. Peraltro, il contributo che verrebbe alla PGA sarebbe del tutto trascurabile rispetto agli effetti che su questa stessa zona verrebbero dall'attivazione di sorgenti nella zona 927.

La parte rimanente della zona 57, insieme alla zona 56 sono attualmente rappresentate dalla zona 928 (Ischia-Vesuvio), che include l'area vulcanica napoletana, con profondità ipocentrali comprese nei primi 5 km.

Nell'area al confine tra la catena e la Puglia, cioè l'area dell'avanfossa e dell'avampaese apulo, le nuove conoscenze sulla sismicità locale, suggerite dalla sequenza sismica del Molise del 2002 (Di Bucci e Mazzoli, 2003; Valensise et al., 2004), hanno comportato scelte che cambiano notevolmente le caratteristiche sismogenetiche dell'area ed hanno permesso di identificare sorgenti con direzione EW, caratterizzate da cinematica trascorrente.

E' stata così identificata (Fig. 35):

- nell'area garganica una zona 924 (Molise-Gargano) orientata E-W, che include tutta la sismicità dell'area e la faglia di Mattinata, generalmente ritenuta attiva;
- una zona 925 (Ofanto) la cui geometria trae in parte spunto dalla zona 62 di ZS4, ad andamento WNW-ESE;
- la zona 926 (Basento) ad andamento E-W, definita dall'allineamento di terremoti a sismicità medio-bassa nell'area di Potenza.

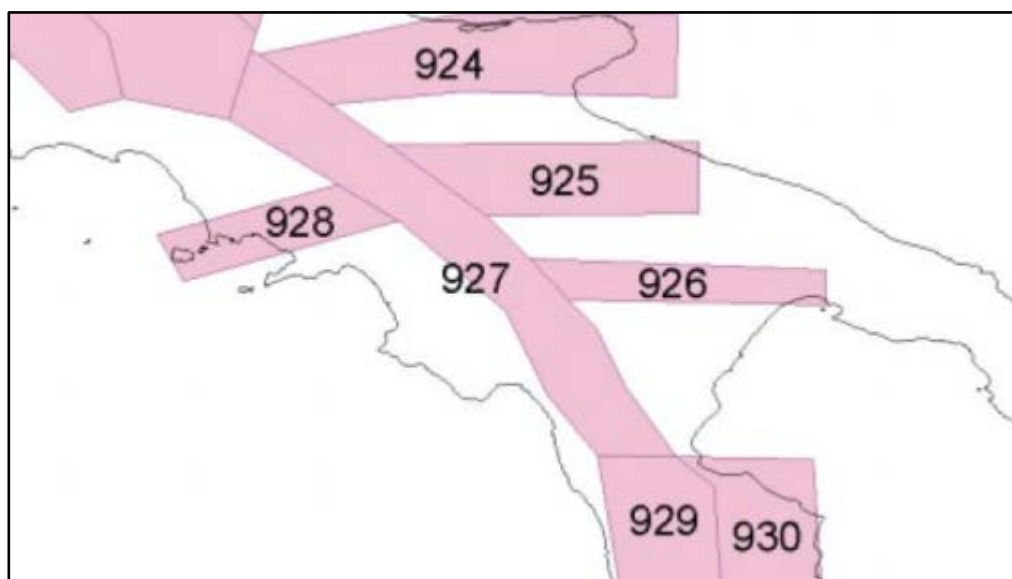


Fig. 35 – Zonazione sismogenetica ZS9 dell'Appennino Meridionale

L'area di studio è prossima alla **Zona 928**. La *profondità efficace*, vale a dire quella profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti che determina la pericolosità della zona, utilizzabile in combinazione con le relazioni di attenuazione determinate su base regionale, per la zona 928 è di 3 Km (Fig. 36).

Il *meccanismo di fagliazione* prevalente per la zona 928, dove per meccanismo prevalente si intende quello che ha la massima probabilità di caratterizzare i futuri terremoti significativi, è di tipo diretto (Fig. 37).

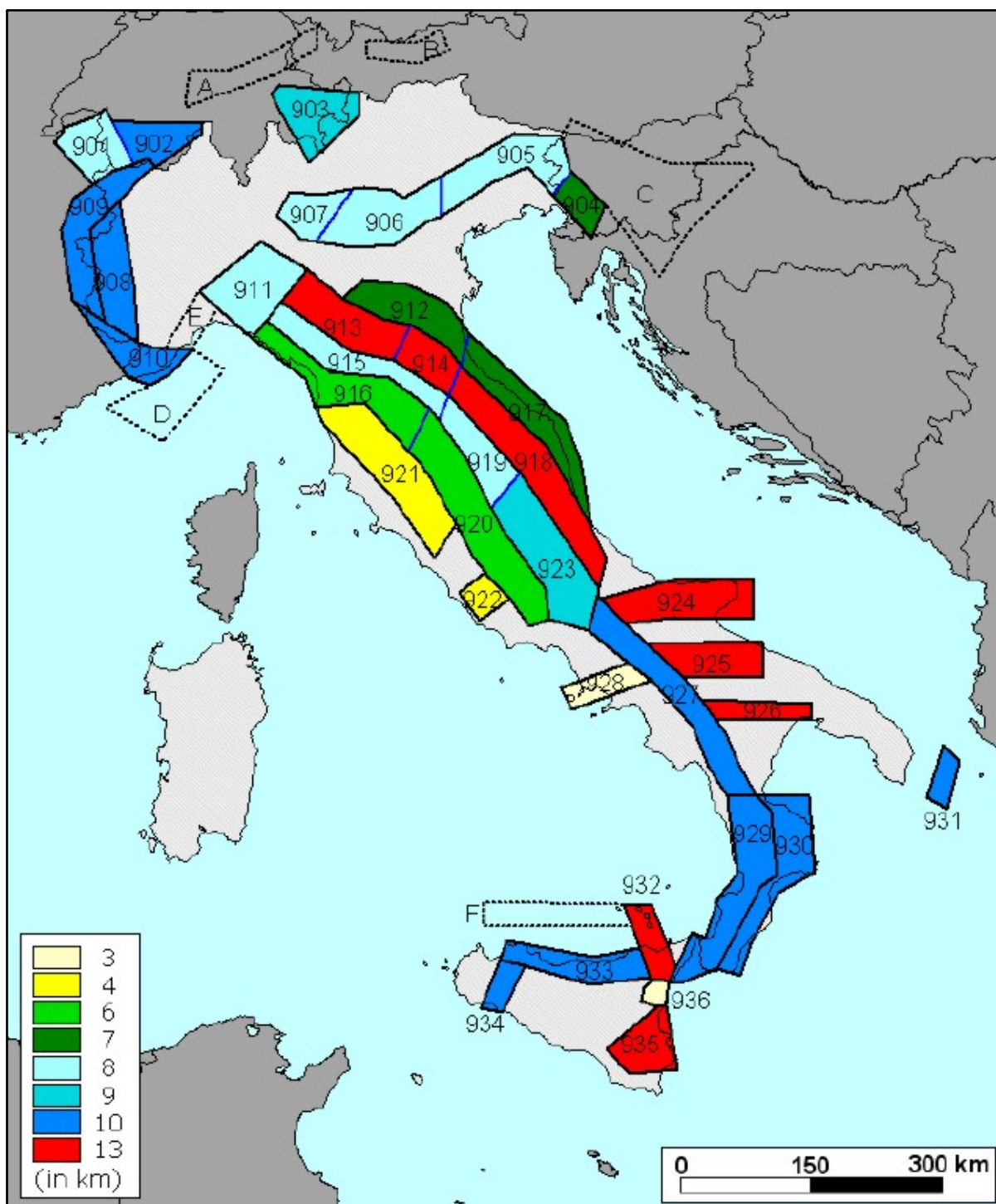


Fig. 36 – Moda delle distribuzioni di frequenza in funzione della profondità dei terremoti riportati nel catalogo strumentale INGV (1983-2002) per tutte le ZS di ZS9

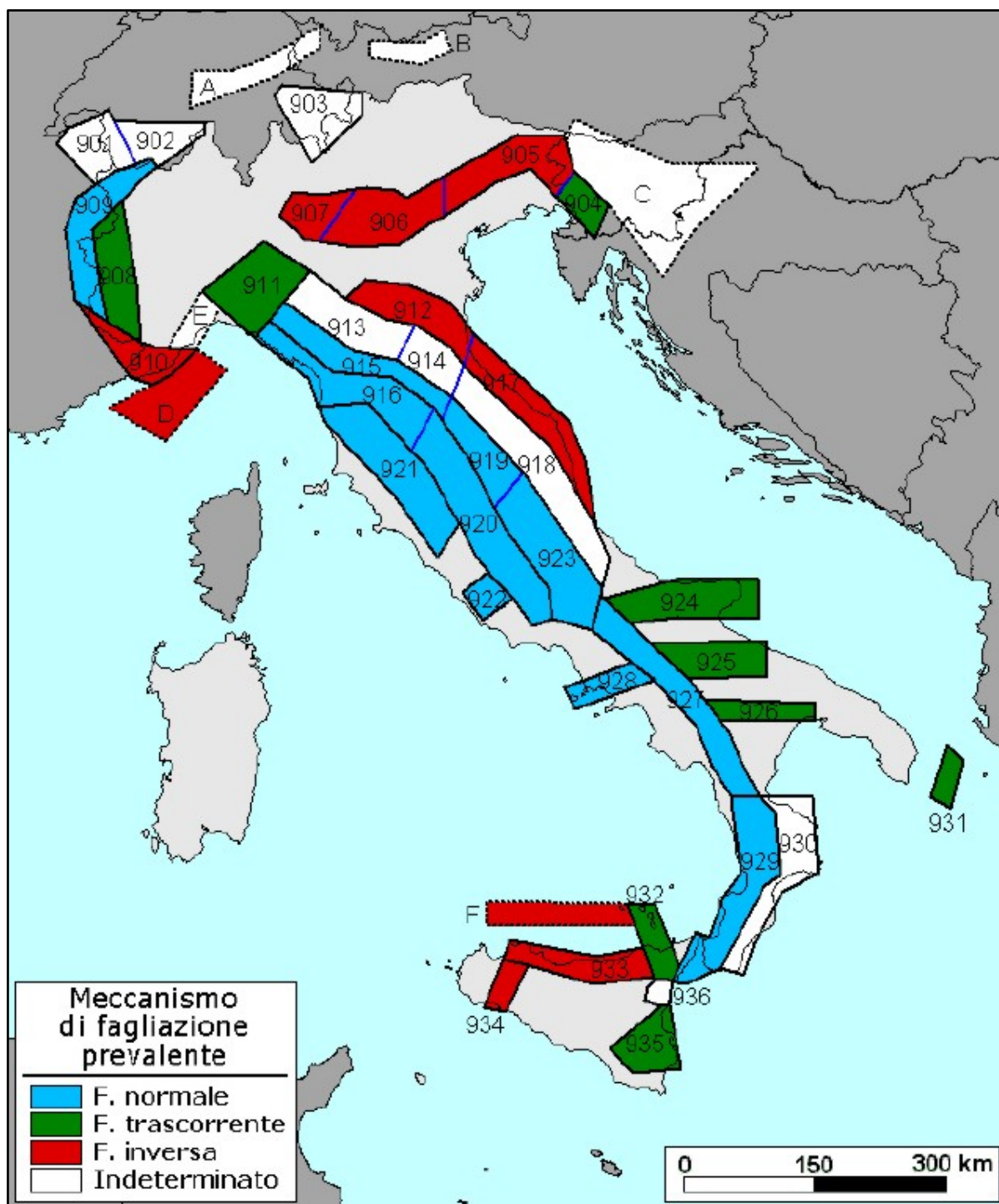


Fig. 37 – Meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse zone sismogenetiche che compongono ZS9.

8.2 Inquadramento geologico-geofisico della Campania

Il territorio comunale di Castel Volturno è situato al margine settentrionale della Piana Campana, un'ampia depressione (graben) che si estende dalle propaggini dell'Appennino fino al mar Tirreno (Fig. 38). La genesi del margine campano si inserisce nella più ampia evoluzione geodinamica dell'Italia e del Mediterraneo caratterizzata dallo scontro della Placca Africana con la Placca Euro-Asiatica, che ha portato alla formazione della catena alpina e successivamente degli Appennini (legati alla subduzione della Placca Africana al di sotto di quella Euro-Asiatica).

In particolare, l'assetto strutturale della Piana Campana è legato alla tettonica distensiva che ha interessato il sistema Appennino - Mar Tirreno (bacino di retroarco) negli ultimi stadi della sua evoluzione, tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene. I bordi della Piana sono caratterizzati da faglie dirette, ad orientamento NE-SW, NW-SE e E - W, delimitanti i massicci carbonatici che costituiscono le strutture marginali del graben.

A queste strutture tettoniche recenti sono connessi anche i fenomeni vulcanici dei Campi Flegrei, del Somma-Vesuvio e del Roccamonfina. Le zone vulcaniche sono ubicate laddove le faglie hanno determinato il maggior rigetto e quindi il massimo sprofondamento.

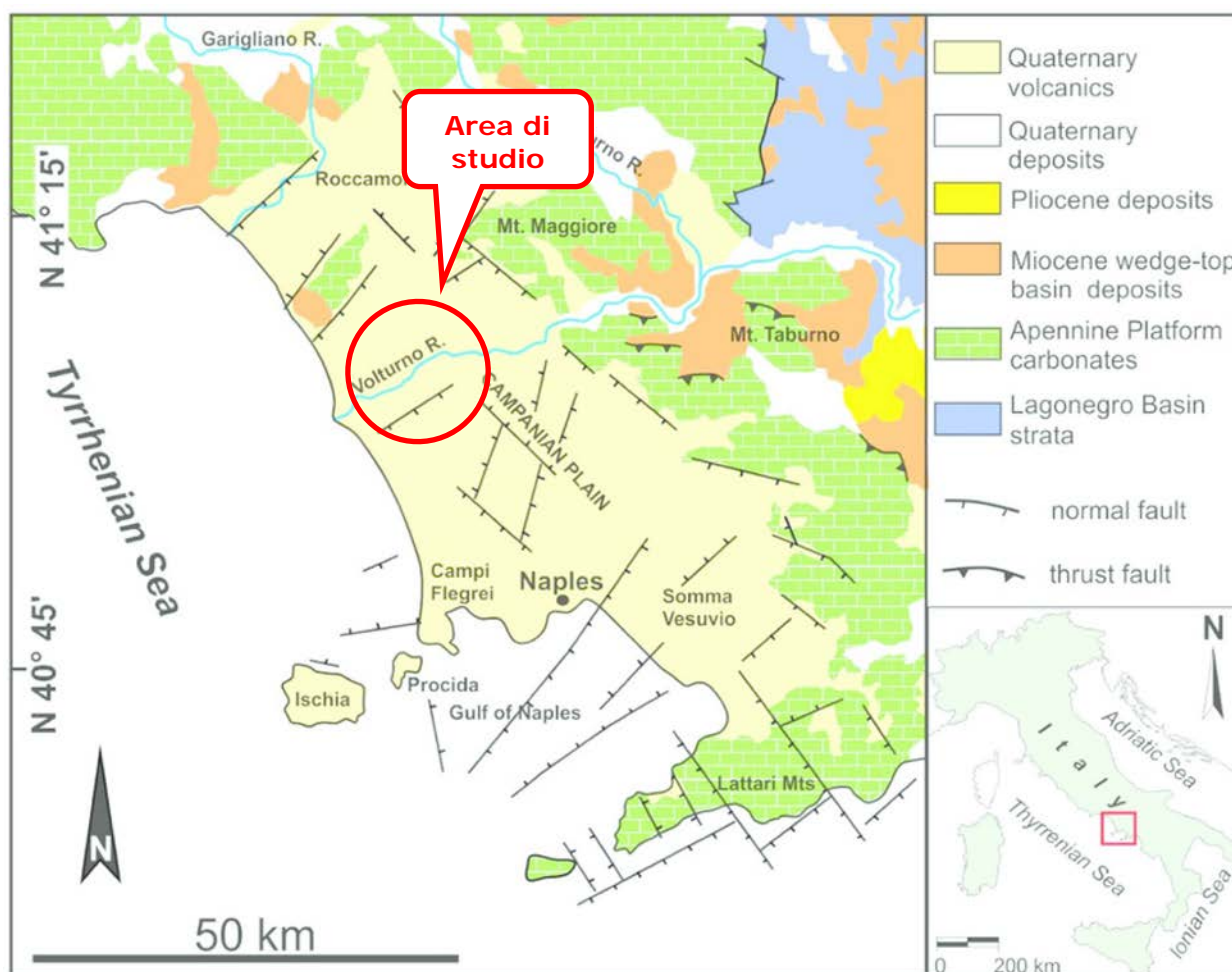


Fig. 38 - Carta geologico-strutturale schematica della Campania; [da Vitale e Isaia, 2014].

La Piana è caratterizzata da forti spessori di sedimenti di ambiente continentale e subordinatamente marino, talora con importanti intercalazioni di materiali vulcanici.

Tali sedimenti ricoprono la formazione calcarea ribassata a notevoli profondità mediante faglie dirette durante le fasi successive alla formazione della catena appenninica.

La messa in posto delle coltri sedimentarie è avvenuta durante il Mesozoico in ambiente di mare da basso a profondo. I banchi calcarei così costituiti furono successivamente impilati in una serie di falde a sovrascorrimenti e pieghe est-vergenti durante l'orogenesi appenninica.

Nella Piana Campana tali unità sono state dissecate in una serie di horst e graben e ribassate a profondità maggiori di 3 km, come testimoniano alcune perforazioni profonde (3 km) eseguite dall'AGIP tra gli anni '60 e '80, che non hanno rivenuto il top di tali unità.

Le serie sedimentarie che affiorano intorno alla Piana (ad est, a nord del Roccamonfina e a sud lungo la penisola Sorrentina e isola di Capri) consistono prevalentemente di carbonati di piattaforma la cui età varia dal Triassico al Cretaceo superiore.

Queste sequenze sono spesso coperte da sedimenti concordanti trasgressivi che culminano con depositi di flysch di età miocenica (Barberi et al., 1977).

La subsidenza, fortemente attiva nel Quaternario, è stata principalmente controllata da faglie normali subverticali ad andamento NW-SE e NE-SW, compensata da un tasso di sedimentazione variabile (mediamente 50 – 150 m/Ma con punte di 750 m/Ma) (Romano et al., 1994). Il risultato di tale sedimentazione è stato l'accumulo di notevoli spessori di depositi alluvionali costituiti da termini litologici di granulometria variabile tra le argille e le ghiaie.

Alcuni autori (Romano et al. – 1994) descrivono sei unità stratigrafiche ascrivibili ad ambienti variabili tra Marino, Transizionale e Continentale nel periodo compreso tra il Pleistocene medio-superiore e l'Olocene, rappresentativi di una Piana inizialmente sommersa che poi è progressivamente emersa (Pleistocene superiore). Ciò in concomitanza con il deciso abbassamento del livello del mare legato all'ultima regressione eustatica e alla diminuzione dei tassi di subsidenza (Santangelo - 2011).

Nell'ambito delle fasi di riempimento del Graben della Piana Campana assume particolare rilevanza la messa in posto di materiali di origine vulcanica legati ai principali Apparati presenti: Roccamonfina, Campi Flegrei e Vesuvio.

Con riferimento al territorio in studio, assumono particolare rilevanza gli eventi eruttivi che hanno dato origine alla formazione dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni fa) e del Tufo Giallo Napoletano (15.000 anni fa).

Riguardo l'origine dell'Ignimbrite Campana, alcuni autori (Barbieri et al. 1991) (Fisher et al. 1993) (Orsi et al. 1999) (Ortolani et al. 1999) collocano il centro di emissione nell'ambito della caldera dei Campi Flegrei (originatasi a causa dell'eruzione), altri autori (Di Girolamo 1978) (Rolandi et al. 2003) ipotizzano un'eruzione di tipo fissurale lungo fratture in corrispondenza delle faglie che bordano la Piana Campana.

In ogni caso si ritiene che l'eruzione ignimbratica rappresenti l'evento esplosivo più forte della storia vulcanica del Mediterraneo degli ultimi 200.000 anni.

La distribuzione del flusso piroclastico dell'Ignimbrite Campana è rappresentata nella fig. 6, dove è evidenziato in giallo (LYT) la facies di tufo giallo litificato (Langella et al., 2013) e in grigio (WGI) la facies di Ignimbrite grigia (Barbieri et al., 1978) (Fig. 39).

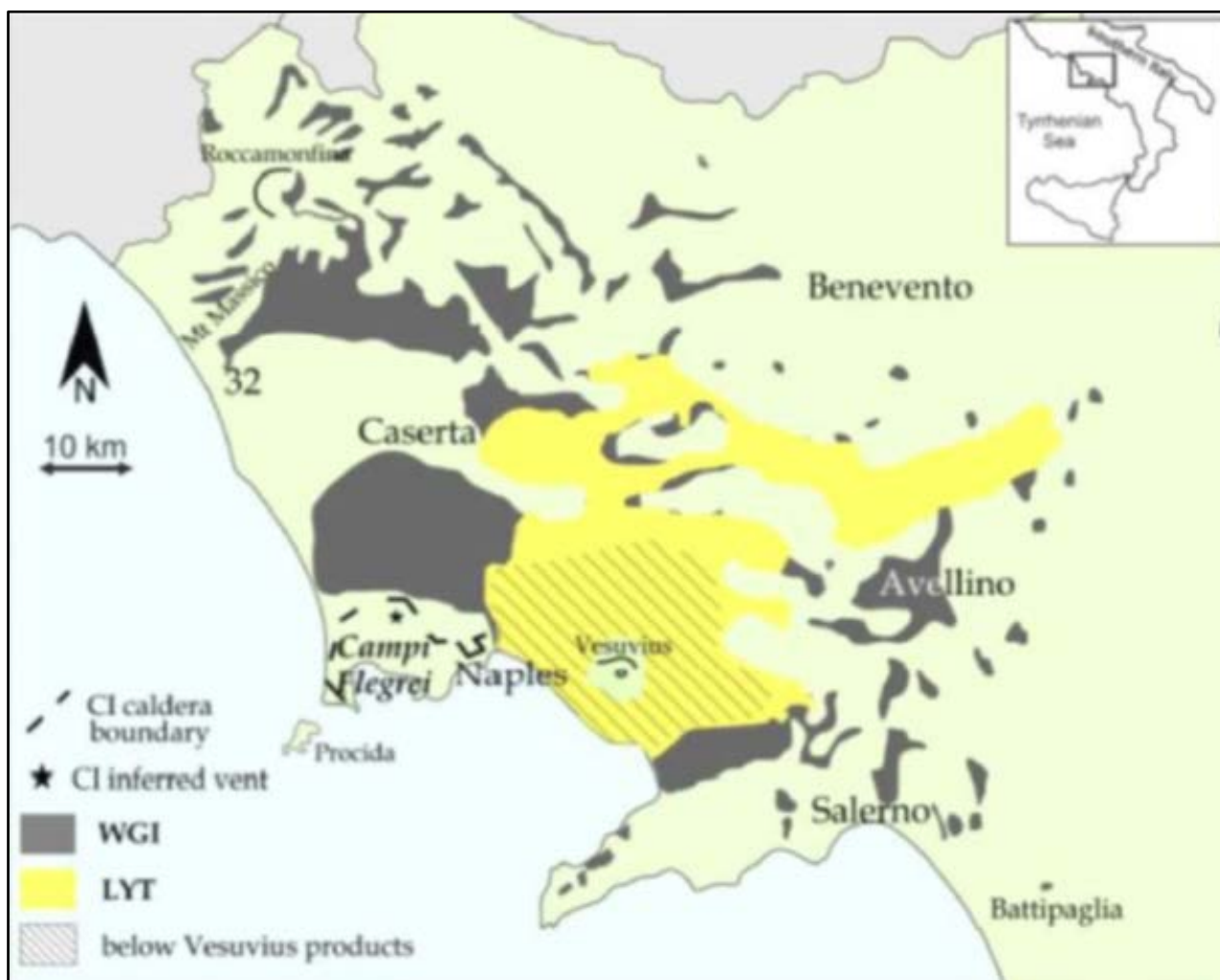


Fig. 39 – Distribuzione del flusso piroclastico dell'Ignimbrite Campana (da Scarpati, 2005)

Per la continuità, caratteristiche e spessori, l'Ignimbrite Campana costituisce un vero e proprio marker stratigrafico nella Piana Campana.

Si stima che nella fase eruttiva furono prodotti 15–20 Km³ di depositi piroclastici da caduta (Rosi et al. 1999) (Perrotta et al. 2003), circa 54 Km³ di depositi da flusso piroclastico (Scarpati et al. 2014) costituenti il tufo grigio trachitico distribuito su una superficie di circa 30.000 Km² e da 100 Km³ di ceneri co-ignimbratiche distali (Perrotta et al. 2003).

A seguito dei numerosi studi condotti sulla formazione ignimbratica si è passati da una descrizione monotona orizzontalmente e verticalmente (Di Girolamo 1970): depositi tufacei

distinti in 4 unità (Cinerazzo, Semitufo, Tufo pipernoide, Piperno) che differiscono per il grado di saldatura crescente dall'alto verso il basso, alla descrizione di 10 unità stratigrafiche (Fedele et al. 2008) (Scarpati et al. 2012) di cui 9 depositi di flusso piroclastico distribuiti in modo disomogeneo ed 1 deposito pomiceo da caduta alla base.

8.3 Stratigrafia ed assetto morfo-strutturale della Piana Campana

La Piana Campana si presenta come un graben riempito da materiale alluvionale e piroclastico che si è sviluppato in seguito alla tettonica distensiva che ha interessato il margine tirrenico a partire dal Pio-Pleistocene, esplicitasi attraverso lineamenti di faglie in direzione NW-SE, NE-SW e E-W, che hanno ribassato le unità sedimentarie meso-cenozoiche affioranti ai bordi della Piana (Fig. 40).

Le faglie con andamento NW-SE rappresentano strutture multifase e vari autori suggeriscono che siano caratterizzate da una più antica cinematica normale seguita da una di tipo strike-slip (principalmente laterale sinistra). Queste faglie formatesi nel Pleistocene inferiore diedero origine alle strutture ad horst e graben.

Le faglie normali con andamento NE-SW ed immergenti a SE, danno origine a semigraben riempiti da materiale quaternario e a blocchi piegati immergenti verso NW. Le faglie E-W sono caratterizzate da cinematica laterale sinistra (Torrente et al., 2010 e referenze citate) e sono più antiche delle precedenti (Miocene medio-superiore).

I vincoli principali per la ricostruzione stratigrafica dell'area sono rappresentati dai pozzi profondi perforati dall'AGIP tra gli anni '60 ed '80, per la ricerca degli idrocarburi e a scopo geotermico (Fig. 41).

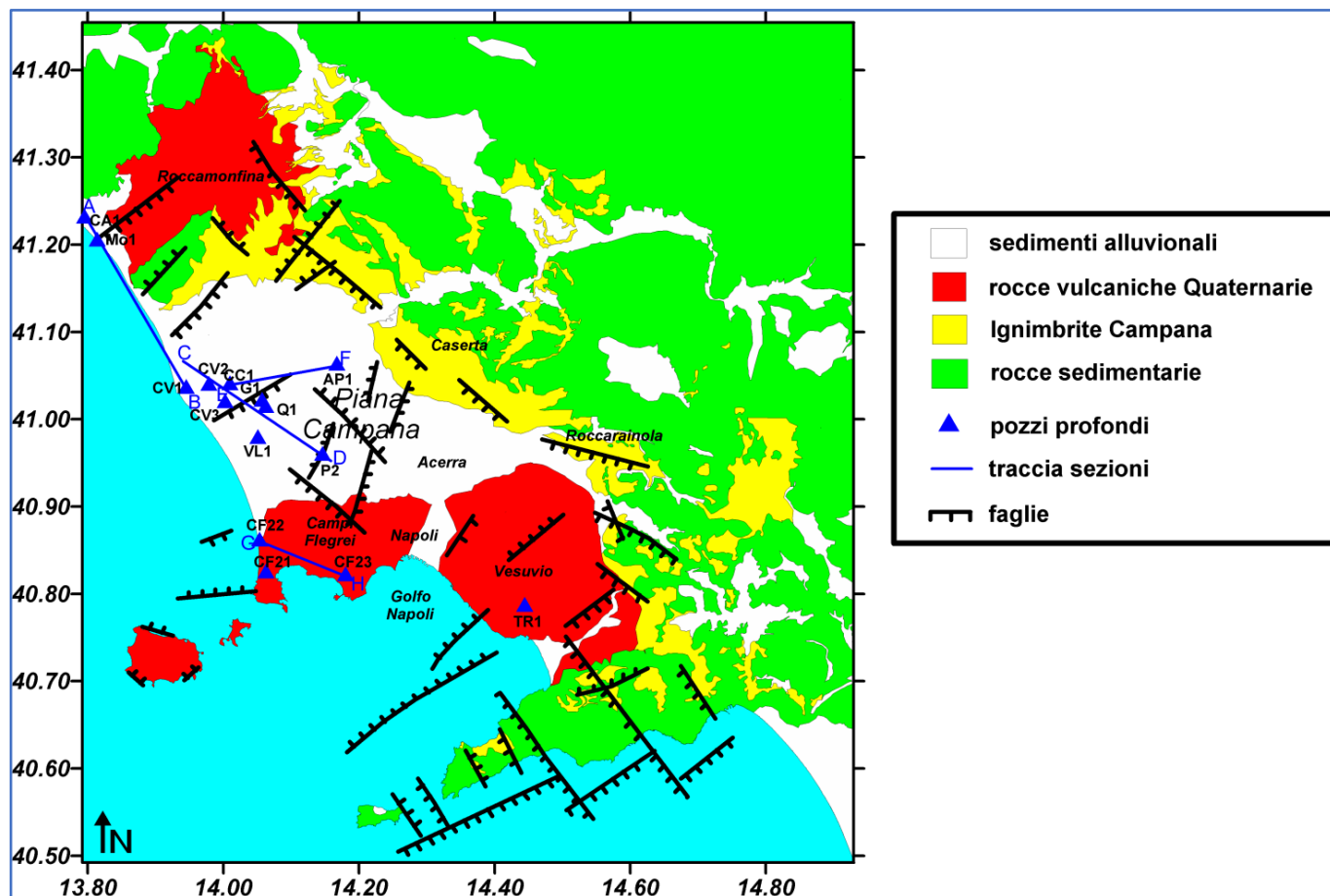


Fig. 40 - Ubicazione dei pozzi profondi su carta geologica semplificata (modificata da Orsi et al., 1996) con le tracce delle sezioni per i profili stratigrafici. Legenda Pozzi: Mo1=Mondragone 1; CA1= Cellole Aurunci 1; CV1-CV2-CV3 = Castel Volturno 1-2-3; CC1 = Cancellone 1; AP1 =Apramo 1; G1=Grazzanise 1; Q1=Qualiano 1; P2=Parete 2; VL1= Villa Literno 1; CF 21-22-23 = Campi Flegrei 21-22-23; TR1=Trecase 1.

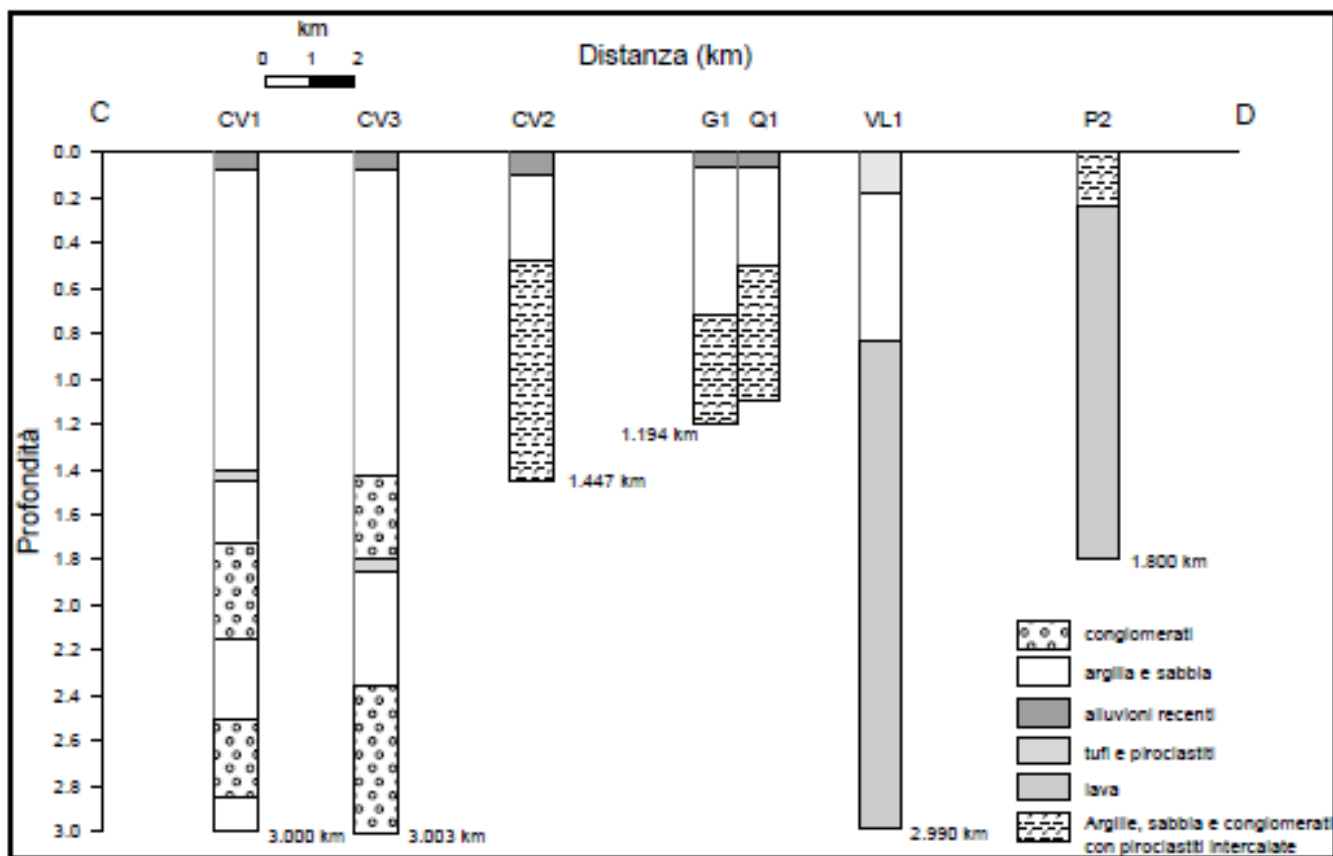


Fig. 41 - Profili stratigrafici dei pozzi profondi lungo l'allineamento CD (ubicato in Fig. 40).
Tutti i pozzi attraversano per l'intera lunghezza depositi quaternari.

L'area di studio si trova lungo l'allineamento CD dove i pozzi CV1 e CV3 presentano depositi clastici di ambiente variabile da marino a continentale fino a 3000 m di profondità, all'interno dei quali sono state rinvenute due intercalazioni di piroclastiti tra 1430 e 1450 m (CV1) e tra 1800 e 1830 m (CV3).

Nei pozzi CV2, G1, Q1, gli spessori delle piroclastiti intercalate a livelli di sabbia e argilla aumentano ed è possibile ritrovarle a profondità minori, rispettivamente di 475, 720 e 500 m.

Nel pozzo VL1, al disotto dei prodotti piroclastici recenti sono stati ritrovati circa 150 m di tufi andesitici, circa 650 m di depositi clastici di ambiente marino e di transizione e infine, da 830 m fino a 2980 m, alternanze di rocce effusive di tipo basaltico ed andesitico e tufi. Negli ultimi 10 m è stata rinvenuta un'alternanza di sabbie e argille di età terziaria.

Nel pozzo P2 al di sotto dei prodotti piroclastici recenti alternati a depositi clastici (primi 300 m di spessore), sono state rinvenute alternanze di lave basaltiche e andesitiche fino a fondo pozzo (1800 m).

Nell'area compresa tra il basso corso del fiume Volturno ed i Campi Flegrei, dunque, i pozzi non rinvencono il basamento carbonatico.

8.4 Sismicità storica dell'area di studio

La provincia di Caserta risente della sismicità storica originatasi all'interno delle zone sismogenetiche presenti nella catena appenninica, disposte lungo una fascia orientata NW-SE, comprendente parte delle regioni Molise, Campania e Basilicata.

Questa fascia è definita dalla distribuzione degli epicentri dei terremoti sia storici che recenti. Gli addensamenti degli epicentri, le modalità di rilascio energetico in correlazione con l'assetto geologico-strutturale, permettono di individuare aree sismogenetiche a diverso comportamento sismico. Per tale motivo sono state identificate quattro aree sismogenetiche principali in cui vengono successivamente riconosciute le strutture sismogenetiche attive (Alessio et al., 1993).

Il territorio di in esame ricade in un settore regionale che presenta un rischio sismico derivante dalla sua posizione rispetto alla catena appenninica. Questa è, infatti, ancora in fase di prevalente sollevamento rispetto al margine tirrenico ed è caratterizzata dalla presenza di strutture sismogenetiche lungo le quali si distribuiscono maggiormente i principali eventi sismici.

L'analisi della distribuzione degli effetti prodotti dai terremoti con intensità maggiore dell'VIII grado **MCS** (Mercalli–Cancani–Sieberg), a partire dal XV secolo fino al terremoto del 1980 (terremoto dicembre 1456; 5 giugno 1688; 8 settembre 1694; 26 luglio 1805; 23 luglio 1930; 21 agosto 1962; 23 novembre 1980), ha evidenziato che gran parte della provincia di Caserta ha subito un danneggiamento valutabile tra il IX e il X grado della scala MCS.

Una stima della pericolosità sismica nella provincia di Caserta per effetto di sorgenti appenniniche può essere effettuata riferendosi al catalogo degli eventi sismici e considerando la legge di attenuazione degli effetti (Grandori et al., 1987) particolarizzata per l'Italia Centro-Meridionale. Analogamente è possibile procedere per quanto riguarda l'accelerazione orizzontale riferendosi alla legge di attenuazione (Sabetta & Pugliese, 1987). In ordine all'intensità sismica, si osserva che le zone della provincia di Salerno risentono fortemente degli effetti dei terremoti con epicentro nell'Irpinia e nella Lucania.

Lo studio della bibliografia esistente e del catalogo dei terremoti italiani ha permesso di individuare i sismi ritenuti più significativi avvenuti nel passato, i cui effetti sono stati avvertiti nell'area in studio; questi sono di seguito elencati:

1. Terremoto anno 927 - epicentro Ariano - Benevento (X);
2. Terremoto anno 981 - epicentro Benevento (X);
3. Terremoto anno 990 - epicentro BN - AV - Ariano - Conza (X);
4. Terremoto anno 1095 - epicentro Benevento (X);
5. Terremoto anno 1125 - epicentro Benevento (X);
6. Terremoto anno 1139 - epicentro Benevento (IX);
7. Terremoto anno 1139 - epicentro Benevento (IX);
8. Terremoto anno 1158 - epicentro Benevento (IX);
9. Terremoto anno 1180 - epicentro Ariano Irpino (X);

10. Terremoto anno 1349 - epicentro Benevento (IX);
11. Terremoto anno 1688 - epicentro Benevento - Ariano Irpino (IX);
12. Terremoto anno 1694 - epicentro Alto Sele - Ariano Irpino (IX);
13. Terremoto anno 1702 - epicentro Benevento - Ariano Irpino (X);
14. Terremoto anno 1732 - epicentro Benevento-Avellino-Ariano Irpino (X);
15. Terremoto anno 1805- epicentro Ariano Irpino - Avellino - Melfi (X);
16. Terremoto anno 1885 - epicentro Benevento (IX);
17. Terremoto anno 1905 - epicentro Benevento (IX);
18. Terremoto anno 1905 - epicentro Benevento - Montesarchio (X);
19. Terremoto anno 1962 - epicentro Ariano Irpino - Melito (X);
20. Terremoto anno 1980- epicentro Alto Sele-Ofanto (X).

Il territorio comunale di Castel Volturno è, tuttavia, ubicato a margine delle strutture sismogenetiche situate lungo la direttrice Sannio-Matese orientale sulla quale si sono sviluppati alcuni dei principali terremoti precedentemente riportati; l'intensità massima con la quale i suddetti sismi si sono manifestati nell'ambito del territorio comunale è del IX°-X°.

Alla luce di quanto sopra esposto si deduce che le zone prossime al margine tirrenico risentono gli effetti in forma più attenuata, come è confermato dai campi macrosismici dei maggiori eventi storici per i quali nell'area di studio non è mai stato registrato l'VIII grado MCS.

Le intensità dello scuotimento in termini di accelerazione di gravità g , confermano la previsione fatta con l'intensità macrosismica.

Appare, pertanto, che il **6° grado MCS** può essere considerato come il massimo grado di danneggiamento per il Comune di *Castel Volturno* (Fig. 42).

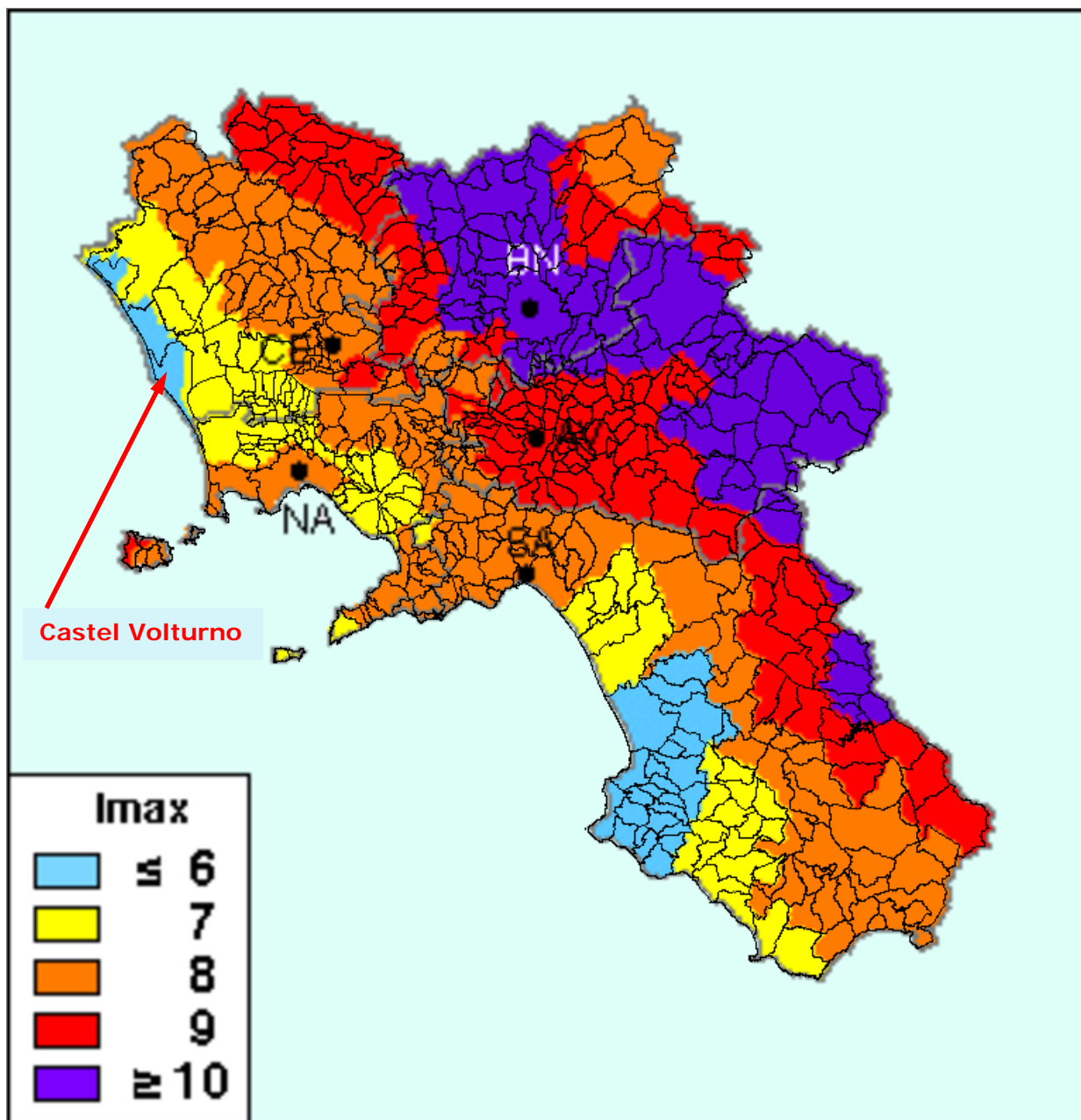


Fig. 42 – Massime intensità macrosismiche in Campania

Il **Database Macrosismico Italiano** permette di visionare la storia sismica delle località italiane. La versione **DBMI 15** è stato realizzato nell'ambito della linea di attività INGV T3 "Pericolosità sismica e contributi alla definizione del rischio" e quale contributo alle attività dell'Allegato A dell'Accordo quadro INGV-DPC 2012-2021.

La versione 2015 del Database Macrosismico Italiano (DBMI15), è consultabile liberamente all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPT115-DBMI15>. L'utilizzo, anche parziale, del database è consentito a condizione che la fonte sia sempre citata come segue: *Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic*

Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi: <http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.

L'ultima versione del Database Macrosismico Italiano chiamata DBMI15 è stata rilasciata a luglio 2016 e aggiorna e sostituisce la precedente, DBMI11 (Locati et al., 2011). DBMI fornisce un set di dati di intensità macrosismica relativo ai terremoti italiani nella finestra temporale 1000-2014. I dati provengono da studi di autori ed enti diversi, sia italiani che di paesi confinanti (Francia, Svizzera, Austria, Slovenia e Croazia). I dati di intensità macrosismica (MDP, Macroseismic Data Point) sono raccolti e organizzati da DBMI per diverse finalità. La principale è fornire una base di dati per la determinazione dei parametri epicentrali dei terremoti (localizzazione e stima di magnitudo) per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI). L'insieme di questi dati consente inoltre di elaborare le "storie sismiche" di migliaia di località italiane, vale a dire l'elenco degli effetti di avvertimento o di danno, espressi in termini di gradi di intensità, osservati nel corso del tempo a causa di terremoti. DBMI15 contiene 122701 dati di intensità relativi a 3212 terremoti.

La storia sismica del Comune di **Castel Volturno** è di seguito riportata (Figg. 43-44-45).

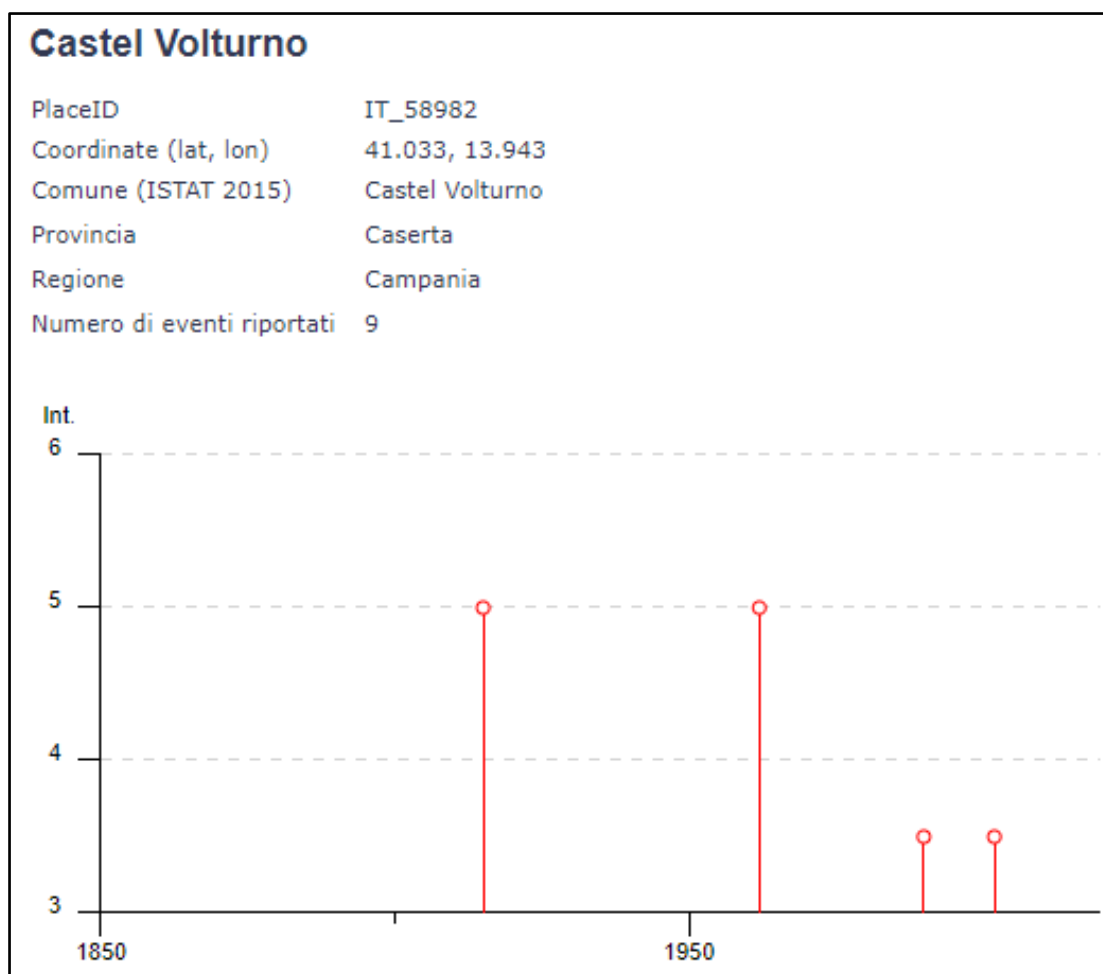


Fig. 43 – Storia sismica del Comune di Castel Volturno

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
NF	1892	11	16	02	10		Isola di Ponza	17	5-6	4.40
NF	1899	03	27	01	19	55	Tirreno centrale	18	4	3.70
5	1915	01	13	06	52	43	Marsica	1041	11	7.08
2	1919	10	22	06	10		Anzio	142	6-7	5.22
5	1962	08	21	18	19		Irpinia	562	9	6.15
NF	1967	10	05	22	49		Teano	9	6-7	4.86
3-4	1990	05	05	07	21	2	Potentino	1375		5.77
3-4	2002	11	01	15	09	0	Molise	638	7	5.72
NF	2005	05	21	19	55	19	Area Nolana	271	5	4.07

Fig. 44 – Storia sismica del Comune di Castel Volturno

dove:

Int. = Intensità al sito (scala MCS); *NMDP* = Numero di osservazioni macrosismiche del terremoto; *Io* = Intensità massima (scala MCS); *Mw* = Magnitudo momento

Località vicine (entro 10km)

Località	EQs	Distanza (km)
Cancello ed Arnone (Cancello)	5	8
Arnone	3	9
Mondragone	11	10

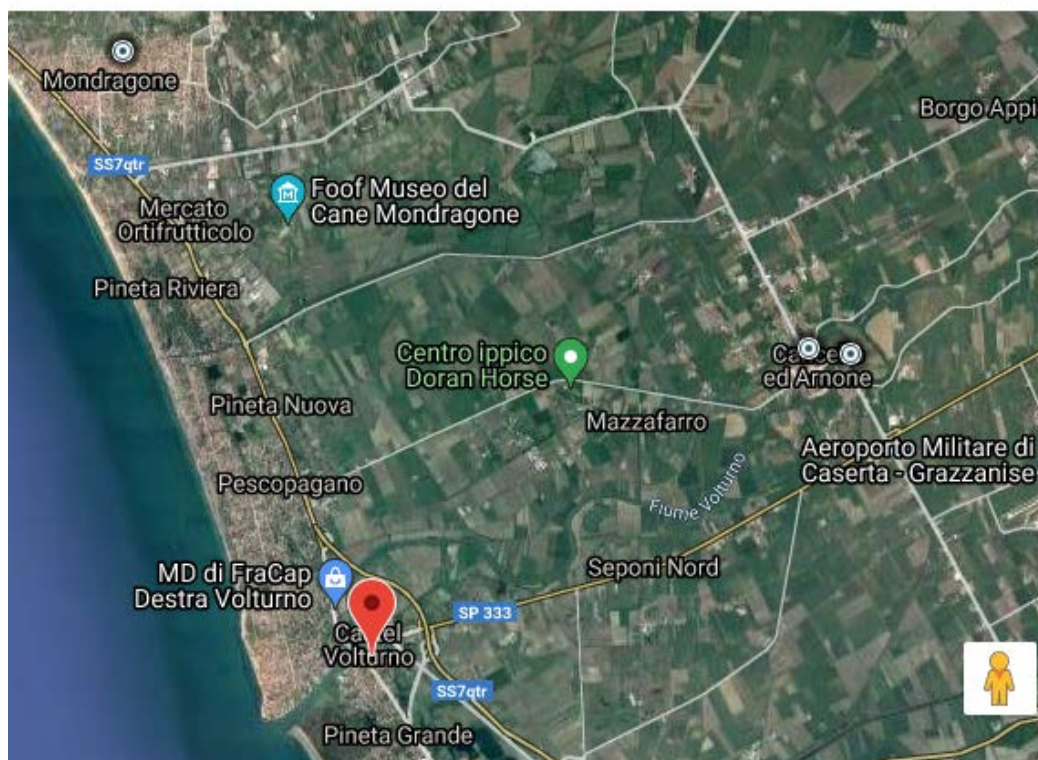


Fig. 45 – Maggiori terremoti registrati nelle località vicine al Comune di Castel Volturno

8.5 Classificazione sismica di Castel Volturno

A livello normativo, il problema del rischio sismico viene affrontato in modo organico con la legge n. 64 del 2 febbraio 1974 "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche", in cui si prevedeva l'aggiornamento periodico della classificazione e delle norme tecniche costruttive in funzione di nuove conoscenze sulla genesi e sull'azione dinamica esercitata sulle strutture dall'azione sismica.

Ai sensi della L. 64/74 i comuni dichiarati sismici venivano classificati mediante decreti legislativi con i quali ad essi veniva assegnato un grado di sismicità "S" (6,9,12) a seconda dell'intensità macrosismica.

Dal grado di sismicità S, successivamente si determinava semplicemente il coefficiente di intensità sismica "C", inteso come percentuale dell'accelerazione di gravità g, mediante la formula $C = (S - 2)/100$ (Fig. 46).

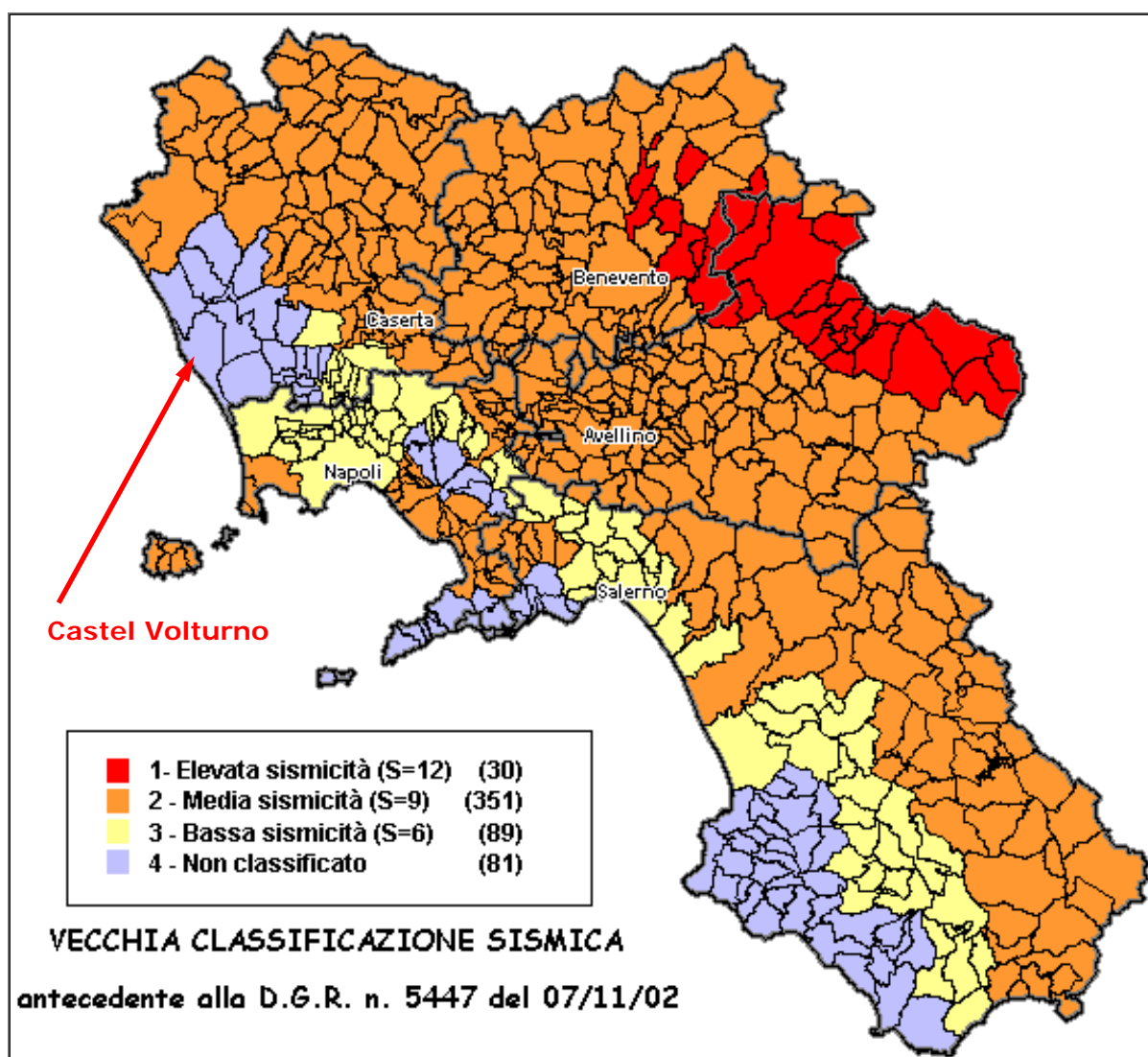


Fig. 46 – Vecchia classificazione sismica della Regione Campania

In seguito al terremoto dell'Irpinia del 23 novembre 1980, che evidenziò le errate scelte urbanistiche fino ad allora operate in chiave di protezione sismica, si rese necessario imporre norme più restrittive per l'adeguamento degli strumenti urbanistici generali e particolareggiati vigenti.

In tal senso, la Legge n.741 del 10 dicembre 1981 oltre a stabilire i criteri per la formazione degli strumenti urbanistici ai fini della prevenzione del rischio sismico, determinava la delega alle Regioni (art. 20) per l'emanazione delle suddette norme, che in Campania trovò nella **Legge Regionale 9/83** una delle prime norme a livello locale che introducevano i criteri e le indagini per la redazione di mappe di Microzonazione comunale, per le progettazioni urbanistiche a carattere generale, e di Caratterizzazione sismica dei siti, per le progettazioni esecutive, nei comuni dichiarati sismici.

A seguito dei recenti eventi sismici (terremoto dell'Appennino umbro-marchigiano del 1998, terremoto del Molise del 2002), il legislatore ha emanato nel 2003 nuove norme antisismiche, introdotte con l'**Ordinanza n. 3274** del Presidente del Consiglio dei Ministri in data 20 marzo 2003 *"Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*.

In anticipo rispetto alla normativa nazionale, la Regione Campania ha adottato, con **D.G.R. 5447 del 7 novembre 2002**, la nuova classificazione sismica del territorio regionale formulata dal gruppo di lavoro costituito da esperti del Servizio Sismico Nazionale, dell'Istituto Nazionale di Geofisica e del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, in base alla risoluzione approvata dalla Commissione Nazionale di Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi nella seduta del 23 aprile 1997 e le risultanze relative ai comuni della Campania (Fig. 47).

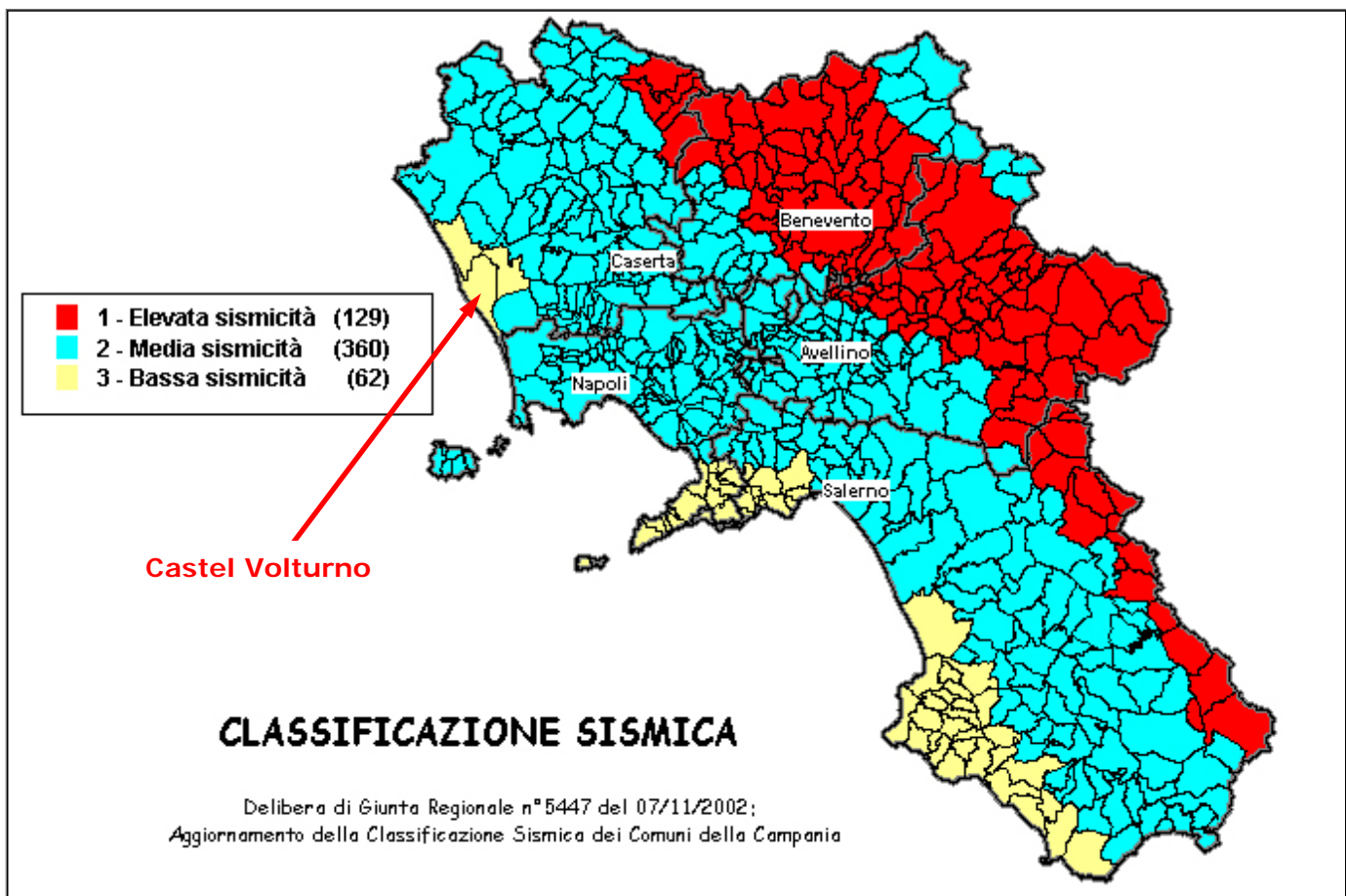


Fig. 47 – Nuova classificazione sismica del 2002 dei comuni della Regione Campania.
Zona 1, valore di $ag=0.35g$; Zona 2, valore di $ag=0.25g$; Zona 3, valore di $ag=0.15g$.

In seguito a tale risoluzione, la classificazione sismica del territorio nazionale passa da tre a quattro categorie. In Campania i comuni classificati di *classe 1* (corrispondente ad un grado di sismicità $S = 12$) passano da 30 a 131, con 101 comuni che passano dalla ex 2a categoria alla classe 1; *quelli di classe 2* ($S = 9$) passano da 351 a 365, di cui 86 comuni della ex 3a categoria e 29 non classificati; quelli di *classe 3* passano da 89 a 55, di cui 52 comuni non classificati ai sensi della precedente classificazione (Figg. 48-49).

Pertanto il Comune di **Castel Volturno**, ai sensi della normativa vigente, è classificato a rischio sismico e rientra nella **zona 3** (*bassa sismicità*).

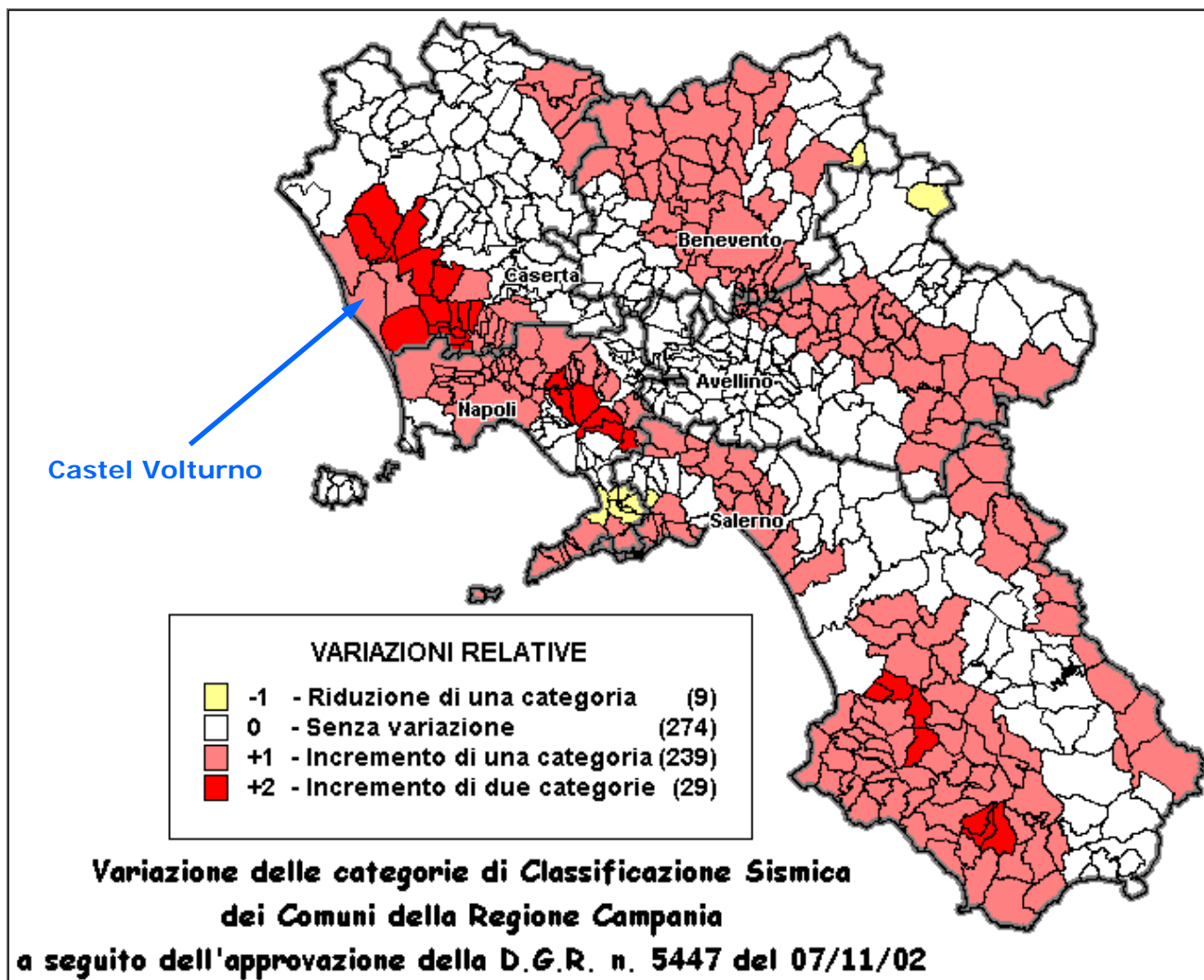


Fig. 48 – Variazione delle categorie di classificazione sismica dei Comuni della Regione Campania

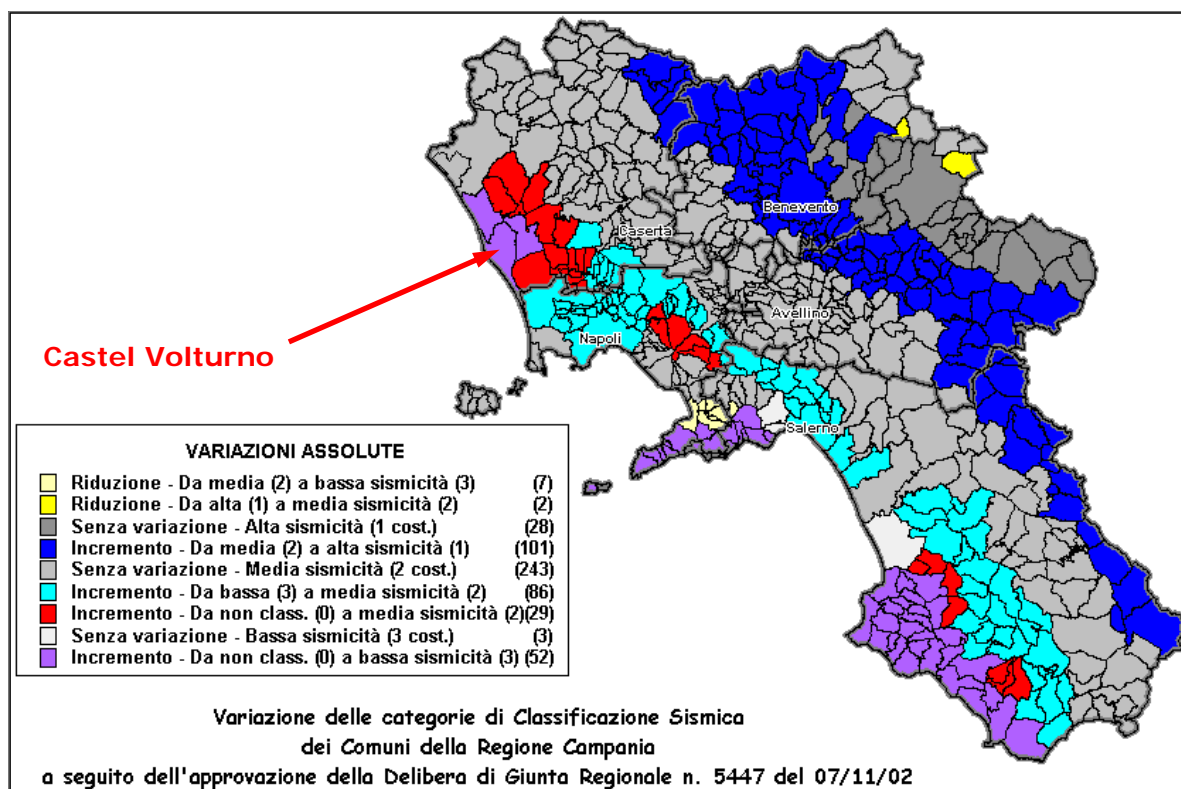


Fig. 49 – Variazione delle categorie di classificazione sismica dei Comuni della Regione Campania

Con l'entrata in vigore dell'O.P.C.M. 3274/03 è cambiato il livello energetico attribuito alle classi sismiche, per cui la "Pericolosità Sismica", espressa come intensità sismica in termini di accelerazione al suolo (ag/g), mette in luce nuovi valori di riferimento, notevolmente superiori rispetto a quelli precedentemente vigenti.

Nella tabella di seguito riportata è evidenziata la variazione di intensità sismica in termini di ag/g , a parità di classe sismica a scala nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2001; 2004). La Regione Campania ha anticipato l'entrata in vigore dell'O.P.C.M. 3274/03 con la classificazione del territorio attuata dalla DGRC 5447/02.

Classificazione Sismica (O.P.C.M. 3274/03)	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni ag/g	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (Norme Tecniche) ag/g	Classificazione Sismica (D.M. 19/01/96)	Coefficiente Sismico (S)
1	>0,25	0,35	1	0,1
2	0,15 - 0,25	0,25	2	0,09
3	0,05 - 0,15	0,15	3	0,06
4	<0,05	0,05	4	0

Dall'applicazione della nuova normativa regionale (D.G.R.C. 248 del 24/01/2003; G.R.C. prot. 1667/SP del 5/11/2003; D.G.R.C. 816 del 10/06/2004) ne consegue che i Comuni che hanno

subito una variazione dell'intensità sismica devono procedere ad una revisione degli strumenti urbanistici, in quanto questi risultano, di fatto, inadeguati a garantire la sicurezza nel territorio e, soprattutto, degli edifici in occasione dell'evento massimo atteso.

Tutti i Comuni della Campania devono, pertanto, procedere ad **azioni di valutazione dell'intensità sismica locale (Microzonazione Sismica)** e ad una **revisione degli strumenti urbanistici vigenti**, in quanto gli stessi risultano essere inadeguati, in termini di "Pericolosità Sismica", alla nuova normativa vigente in Italia (cfr. *Relazione finale della Commissione Pericolosità Sismica -Deliberazione n° 181 del 24/01/2007 dell'Ordine dei Geologi della Campania*).

La mappa del territorio nazionale per la pericolosità sismica, disponibile on-line sul sito dell'INGV di Milano, redatta secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008), indica che il territorio comunale di **Castel Volturno** (Fig. 50) rientra nelle celle contraddistinte da valori di *ag* di riferimento compresi tra **0.075 e 0.125** (punti della griglia riferiti a: parametro dello scuotimento *ag*; probabilità in 50 anni 10%; percentile 50).

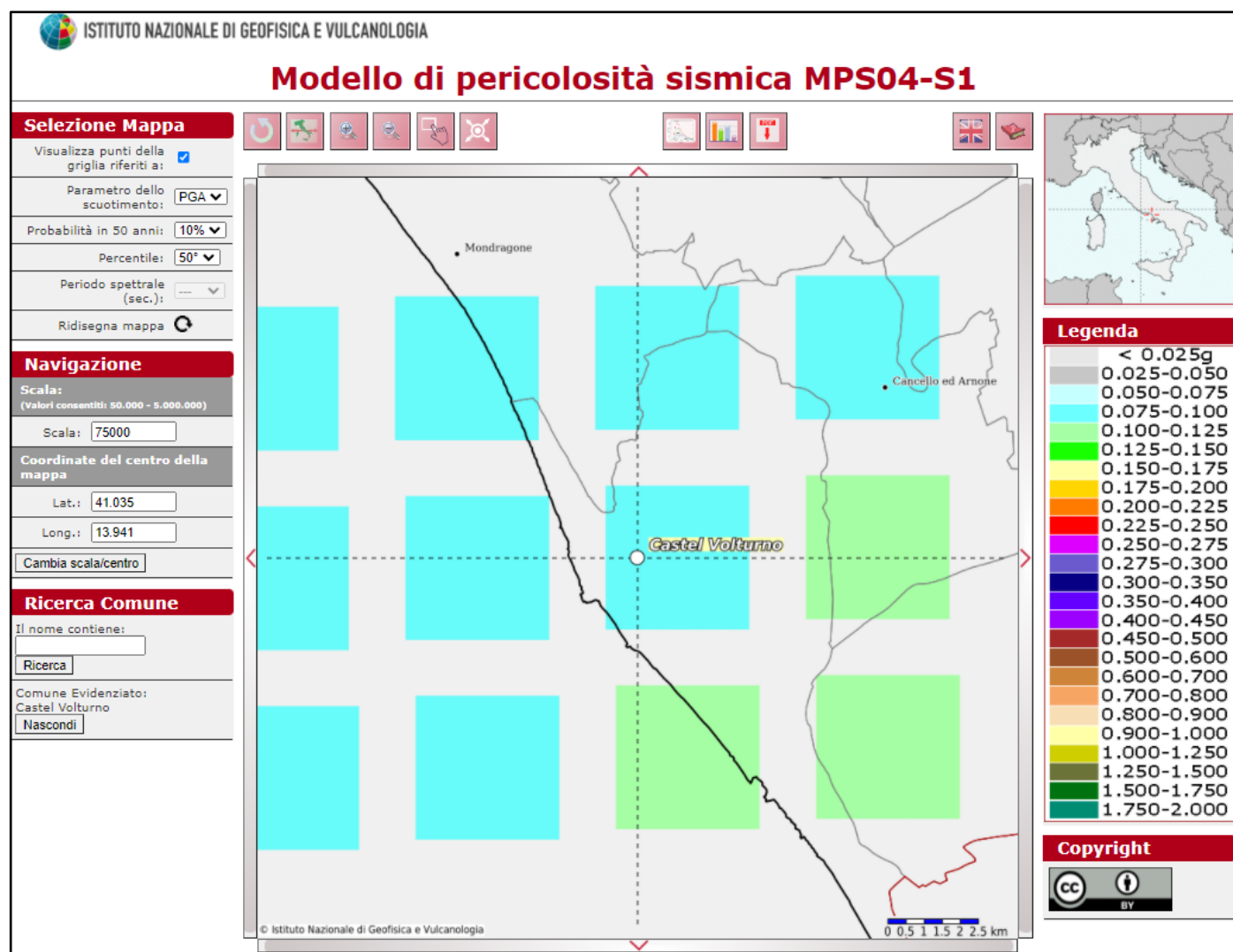


Fig. 50 – Mappa di pericolosità sismica redatta a cura dell'INGV di Milano secondo le N.T.C./2018. Punti della griglia riferiti a: parametro dello scuotimento *a(g)*; probabilità in 50 anni 10%; percentile 50.

8.6 Zonazione del territorio comunale in prospettiva sismica

Per la redazione del PUC del Comune di Castel Volturno la zonazione del territorio in prospettiva sismica è stata effettuata seguendo i criteri riportati nell'OPCM 3274 in base ai dati ricavati dalle indagini effettuate, in situ ed in laboratorio, estraendo i valori stratigrafici, geotecnici e geosismici, per ciascuna verticale investigata e parametrizzata.

Essi sono stati associati a valori desunti dall'iterazione dei risultati inerenti il parametro finale "Vs₃₀". Inoltre è stato utilizzato anche il parametro "Nspt n", dove con n viene intesa la profondità raggiunta dalle prove penetrometriche dinamiche pesanti effettuate DPHS. Tali indagini sono state spinte tra i 19,60 metri e i 25.20 metri di profondità dal p.c. Tale valore pur non raggiungendo i 30 metri dal p.c. si è dimostrato accettabile in quanto i valori di categoria di suolo scaturiti rientrano perfettamente nell'ambito dei limiti geolitologici individuati e si relazionano perfettamente con i valori di categoria di suolo scaturiti dalle indagini DH effettuate negli stessi ambiti geologici. Di seguito si riportano per l'area di specifico interesse, e per un suo congruo intorno, tutti i valori dei parametri ottenuti, direttamente dalle indagini effettuate (DH), ovvero ottenuti per correlazione fra alcuni di essi (DPSH):

Sondaggio S10	strato I	strato II	strato III	strato IV	strato V	unità di misura
Spessore	3,25	4,9	9,4	1,2	11,2	m
Velocità media onde P	432,7	931,7	1247,7	2180,5	1413	m/s
Densità media	1,42	1,6	1,7	1,99	1,76	gr/cm ³
Velocità media onde S	140,6	154	141,1	162,4	298,1	m/s
Coefficiente di Poisson	0,44	0,49	0,49	0,50	0,48	
Rigidità media	0,20	0,25	0,24	0,32	0,52	
Vs30	180,18					m/s

Confrontando i dati scaturiti dalle indagini sismiche in foro (DH) e quelli delle prove penetrometriche pesanti (DPSH), con i dati stratigrafici quali risultano dai relativi sondaggi a carotaggio continuo, è stato possibile effettuare una caratterizzazione geosismica degli strati litologici significativi costituenti il sottosuolo di Castel Volturno. Questo ha permesso di quindi avere una distribuzione diffusa del dato caratterizzante il territorio comunale dal punto di vista sismico. La tabella che segue mostra il dato Vs₃₀ calcolato per tutti i carotaggi effettuati sul territorio comunale:

DH	S10
Vs30 (m/sec)	180
Categoria di suolo	D

DPSH	P4
NSPTn	6
Categoria di suolo	D

L'elaborazione dei dati sopra menzionata, ha permesso quindi di effettuare una zonazione del territorio comunale dal punto di vista della risposta sismica, utilizzando il valore della Vs₃₀.

Il “range” dei valori calcolati mette in evidenza che, in funzione della pressappoco estesa eterogeneità litostratigrafica caratterizzante il sottosuolo dell’area di studio risulta caratterizzato da un valore della Vs30 compreso tra 116 e 192 e di Nspt compreso tra 3 e 7 colpi, ricadenti quindi nella categoria di suolo D.

In base ai valori relativi alla Vs30 è possibile estrapolare una zonazione del territorio comunale dei fattori di incremento da applicare nelle varie microzone all’accelerazione sismica relativa allo spettro elastico di ancoraggio riferito a suoli di fondazione della categoria A.

Nel caso specifico del territorio comunale di Castel Volturno, per quanto concerne la parte caratterizzata da Categoria di Suolo D il fattore di incremento da applicare all’accelerazione sismica di ancoraggio è $S = 1,35$. (OPCM 327472003, D.G.R. Campania 1701 del 28-10-2006).

9. Risposta sismica locale

Lo studio sugli effetti di sito è un aspetto fondamentale nella valutazione e mitigazione del rischio sismico. Tale studio si effettua in termini di risposta sismica locale, partendo dal concetto di amplificazione del moto sismico che si origina dal basamento roccioso (definito *bedrock* sismico) e che si propaga all’interno di un deposito sino a raggiungere la superficie.

Valutare questi effetti non è sempre del tutto facile anche perché, in molti casi, l’amplificazione è dovuta ai cosiddetti fenomeni di risonanza nei terreni stratificati posti al di sopra del *bedrock*, di riflessione e rifrazione delle onde sismiche nelle interfacce di discontinuità e tra mezzi a diversa densità, dove le onde vengono per così dire “intrappolate” e successivamente trasmesse allo strato più superficiale generando così onde di tipo Love e di Rayleigh. A questi, poi, si aggiunge l’effetto di focalizzazione del raggio sismico nelle zone morfologicamente più acclive.

Sul territorio italiano la valutazione degli effetti della risposta sismica locale viene fatta sulla base delle vigenti norme tecniche per le costruzioni pubblicate in *GU n.42 del 20/02/2018 - Suppl. Ordinario n. 8*.

Le condizioni del sito di riferimento rigido in generale non corrispondono, dunque, a quelle effettive. È necessario, pertanto, tenere conto delle condizioni stratigrafiche del volume di terreno interessato dall’opera ed anche delle condizioni topografiche, perché entrambi questi fattori concorrono a modificare l’azione sismica in superficie rispetto a quella attesa su un sito rigido con superficie orizzontale.

Tali modifiche, in ampiezza, durata e contenuto in frequenza, sono il risultato della *risposta sismica locale*, cioè l’azione sismica quale emerge in “superficie” a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite trasmettendosi dal substrato rigido. Le modifiche sopra citate corrispondono a:

- *effetti stratigrafici*, legati alla successione stratigrafica, alle proprietà meccaniche dei terreni, alla geometria del contatto tra il substrato e i terreni sovrastanti ed alla geometria dei contatti tra gli strati di terreno (coefficienti S_s e C_c);
- *effetti topografici*, legati alla configurazione topografica del piano campagna. I fenomeni di amplificazione cresta-base aumentano in proporzione al rapporto tra l'altezza del rilievo e la sua larghezza (coefficiente S_T).

Gli effetti della risposta sismica locale possono essere valutati con metodi semplificati. In tal caso si attribuisce il sito ad una delle categorie di sottosuolo definite nella Tabella 3.2.II delle NTC e ad una delle categorie topografiche definite nella Tabella 3.2.IV delle NTC.

9.1 Categoria di sottosuolo

Il D.M. 17 gennaio 2018, al *Capitolo 3.2.2 (Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche)*, prevede una classificazione del sito in funzione sia della velocità delle onde S nella copertura che dello spessore della stessa.

Esso propone l'adozione di un sistema di caratterizzazione geofisica del profilo stratigrafico del suolo, mediante cinque tipologie di suoli (A, B, C, D, E - Tabella 3.2.II), per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare, da individuare in relazione ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio ($V_{S,eq}$).

Per situazioni riconducibili alle categorie definite in Tab. 3.2.II di cui al § 3.2.2 (Fig. 51) si può fare riferimento ad un approccio semplificato basato sui valori di velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s , che costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo di cui al § 6.2.2.

Tabella 3.2.II delle NTC – Categorie di sottosuolo

Classe	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , 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	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

In tal caso si calcola la velocità equivalente con la seguente espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (m/s)$$

con:

h_i : spessore in metri dell' i -esimo strato di terreno;

$V_{s,i}$: velocità dell'onda di taglio media nell' i -esimo strato;

N : numero di strati;

H : profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Mentre per tutti quei casi non rientranti è richiesta una specifica analisi della risposta sismica locale, così come previsto al § 7.11.3.

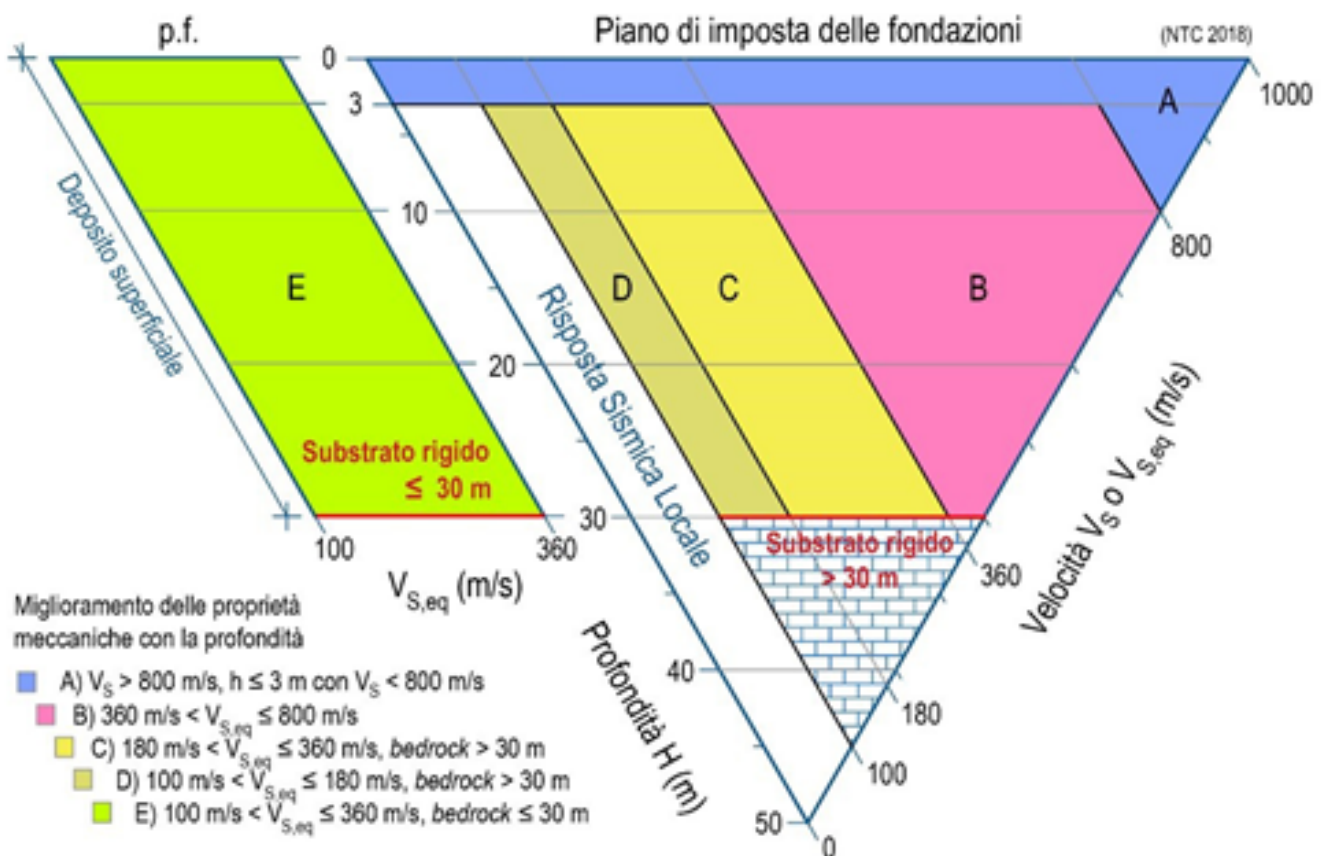


Fig. 51 - Diagramma per le categorie di sottosuolo secondo i riferimenti del § 3.2.2 delle NTC 2018.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione (Fig. 52).

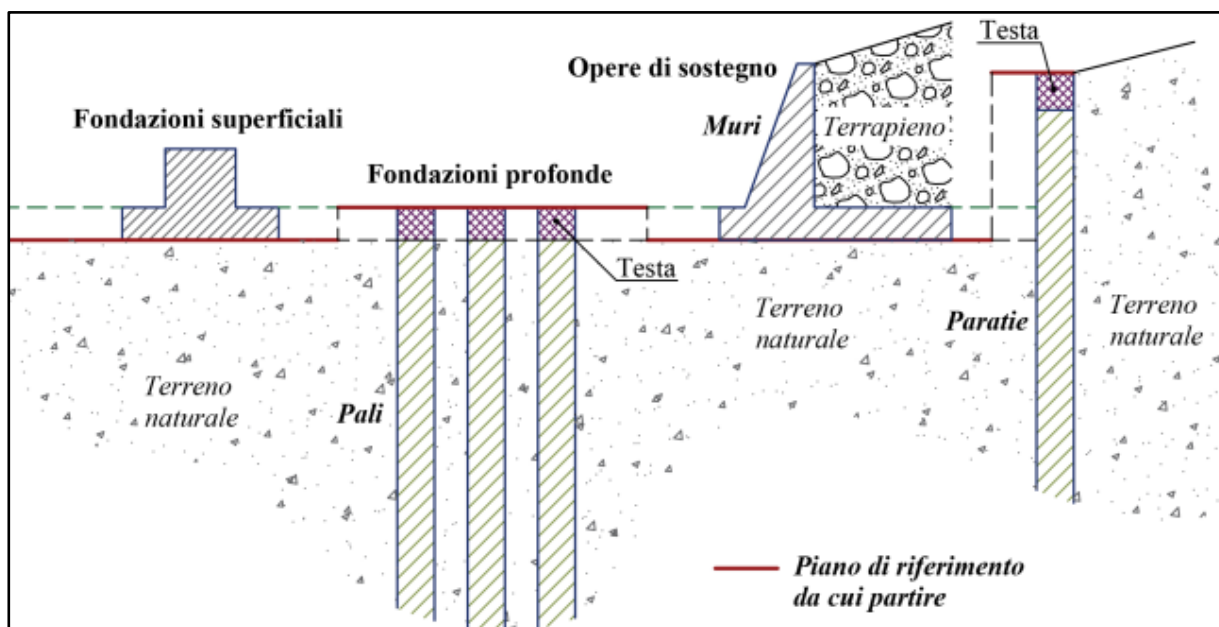


Fig. 52 – Piano di riferimento per la determinazione della categoria di sottosuolo
Schemi di riferimento richiamati al § 3.2.2 delle NTC 2018.

Di seguito sono riportate, secondo le indicazioni predisposte dalla normativa vigente, le operazioni di calcolo effettuate sulla base delle elaborazioni delle prospezioni sismiche M.A.S.W. eseguite nelle aree di studio.

Vista la tipologia delle opere in progetto, la profondità del piano di fondazione è stata considerata corrispondente a quella del piano campagna attuale, ossia 0,00 m dal p.c.

Come si può evincere da quanto sopra riportato i valori delle velocità delle onde di taglio ricavati dalle prospezioni sismiche M.A.S.W. eseguite in località Parco del Castello nel Comune di Castel Volturno hanno evidenziato che il sito rientra nella categoria di sottosuolo **D** – *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s*, avendo determinato una velocità media delle onde di taglio V_s entro i 30,0 metri di profondità compresa tra **163 m/s** (Fig. 53) e **174 m/s** (Fig. 54).

Categoria di sottosuolo calcolata dall'elaborazione della M.A.S.W. Mw 1

Nr = numero progressivo per ciascun sismostrato, H = profondità, hi = spessori, V_s = velocità onde di taglio, H_{calc} e hi_{calc} sono rispettivamente la profondità e gli spessori ricalcolati partendo dal piano d'imposta delle fondazioni.

Valori della M.A.S.W Mw1 utilizzati per il calcolo della categoria di sottosuolo (§ 3.2.2 alle NTC 2018).

Nr.	H (m)	hi (m)	V_s (m/s)	H_{calc} (m)	hi_{calc} (m)	hi_{calc}/V_s (s)
1	3,50	3,50	120,00	3,50	3,50	0,029167
2	8,10	4,60	161,00	8,10	4,60	0,028571
3	14,40	6,30	168,00	14,40	6,30	0,037500
4	21,90	7,50	173,00	21,90	7,50	0,043353
5	30,00	8,10	179,00	30,00	8,10	0,045251

$V_{s,30} = 163,18$ m/s

Categoria di sottosuolo: **D**

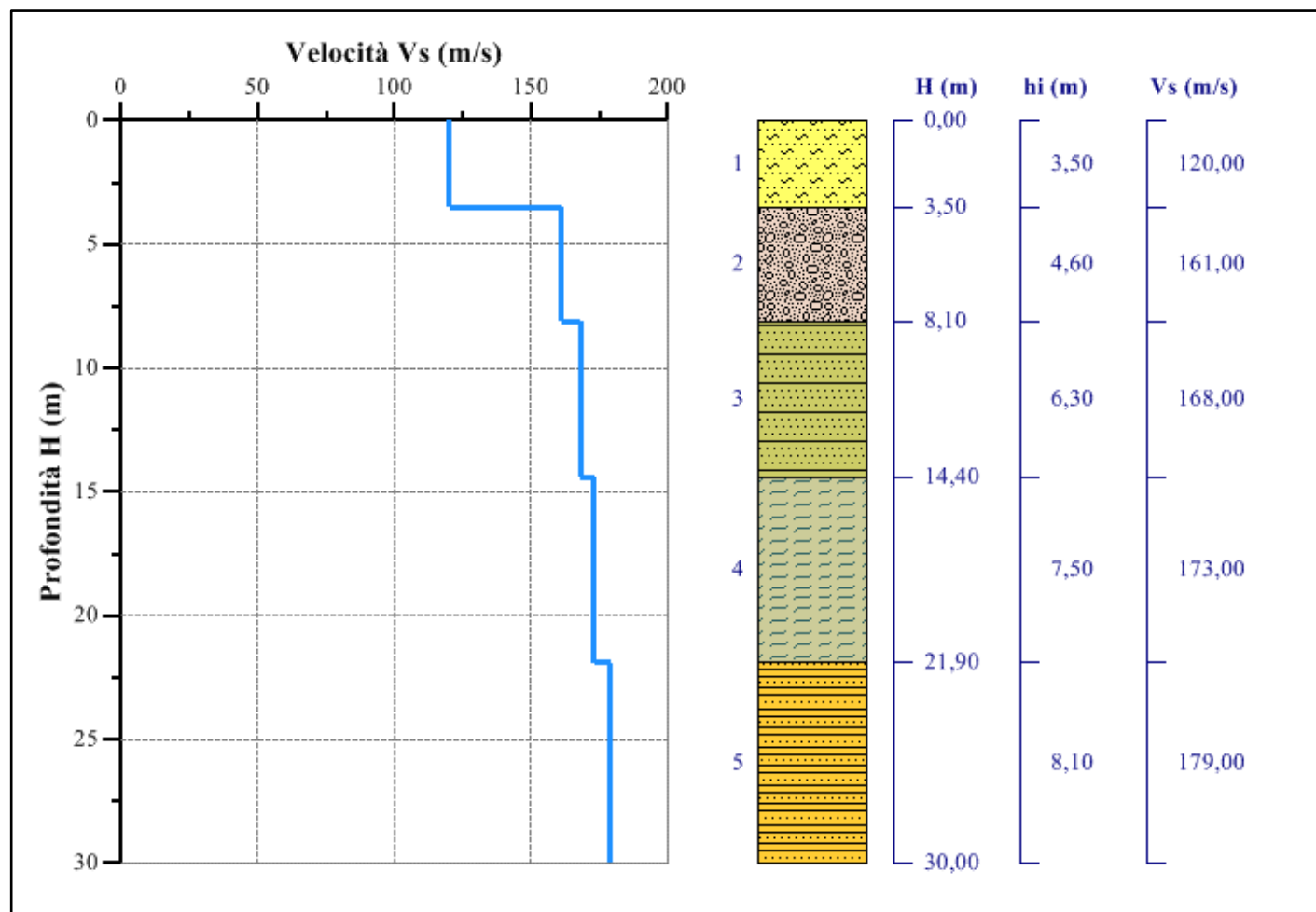


Fig. 53 – Sismostratigrafia dell'area di studio ottenuta dalla prospezione sismica superficiale M.A.S.W. Mw1 eseguita in località Parco del Castello del Comune di Castel Volturno.

Categoria di sottosuolo calcolata dall'elaborazione della M.A.S.W. Mw 2

Nr = numero progressivo per ciascun sismostrato, H = profondità, hi = spessori, V_s = velocità onde di taglio, H_{calc} e hi_{calc} sono rispettivamente la profondità e gli spessori ricalcolati partendo dal piano d'imposta delle fondazioni.

Valori della M.A.S.W Mw2 utilizzati per il calcolo della categoria di sottosuolo (§ 3.2.2 alle NTC 2018).

Nr.	H (m)	hi (m)	V_s (m/s)	H_{calc} (m)	hi_{calc} (m)	hi_{calc}/V_s (s)
1	2,50	2,50	167,00	2,50	2,50	0,014970
2	8,10	5,60	170,00	8,10	5,60	0,032941
3	14,30	6,20	173,00	14,30	6,20	0,035838
4	22,20	7,90	177,00	22,20	7,90	0,044633
5	30,00	7,80	180,00	30,00	7,80	0,043333

$V_{s,30} = 174,71$ m/s

Categoria di sottosuolo: **D**

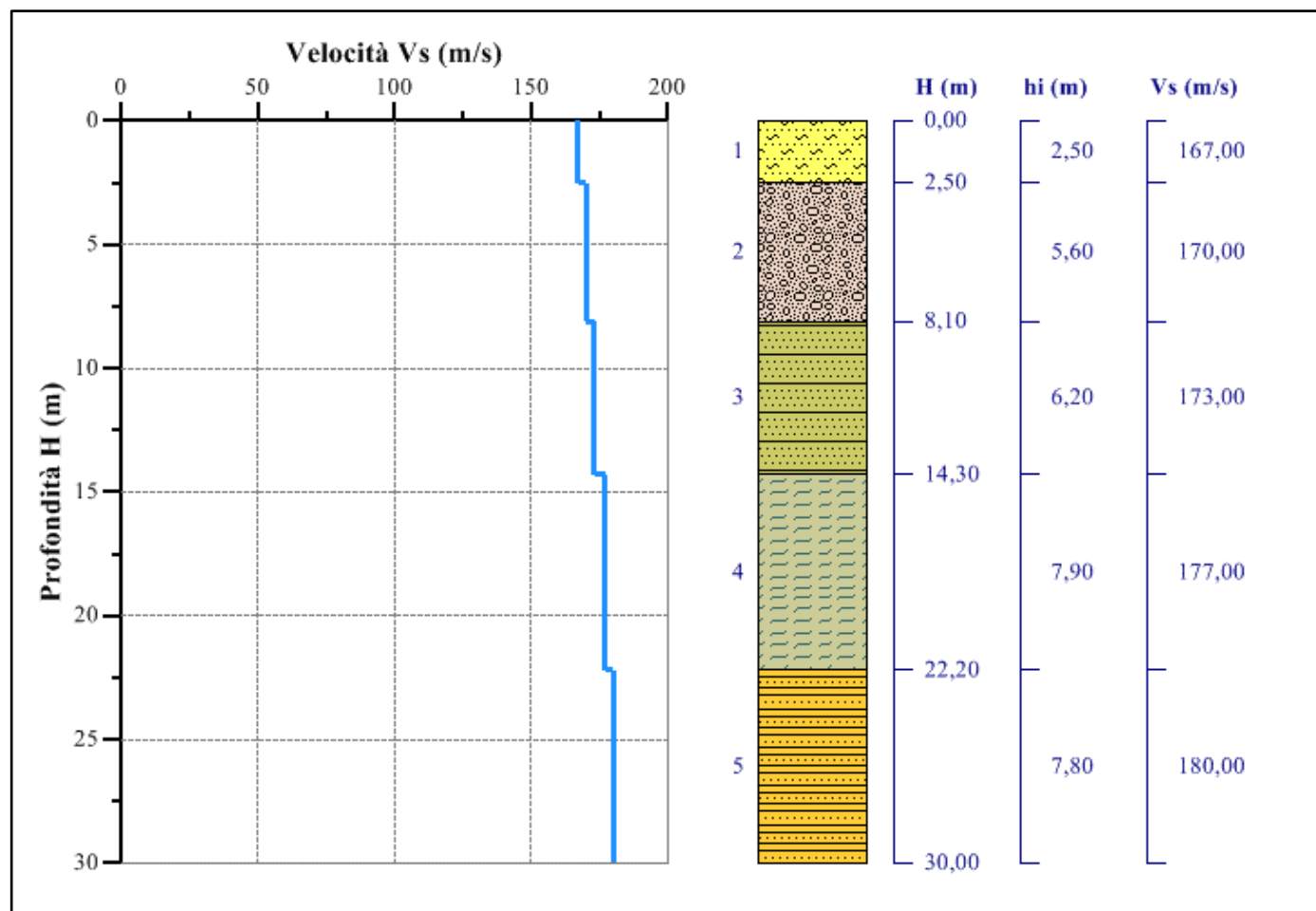


Fig. 54 – Sismostratigrafia dell'area di studio ottenuta dalla prospezione sismica superficiale M.A.S.W. Mw2 eseguita in località Parco del Castello del Comune di Castel Volturno.

9.2 Categoria topografica

Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione:

Tabella 3.2.IV delle NTC – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Il sito interessato dalla realizzazione dell’impianto fotovoltaico è posto ad una quota media di 2,5 m s.l.m. e si sviluppa su una superficie pianeggiante. Per tale motivo esso rientra nella categoria topografica **T1**,

9.3 Condizioni di amplificazione stratigrafica e topografica

Come già specificato nelle pagine precedenti, la pericolosità sismica di base viene determinata facendo riferimento alle ipotesi di sito di riferimento rigido, superficie topografica orizzontale e campo libero (*free field*).

Le condizioni stratigrafiche del volume di terreno interessato dall’opera e le condizioni topografiche determinano una modifica delle onde sismiche in superficie (Fig. 55), in termini di ampiezza dell’oscillazione, durata e contenuto in frequenza.

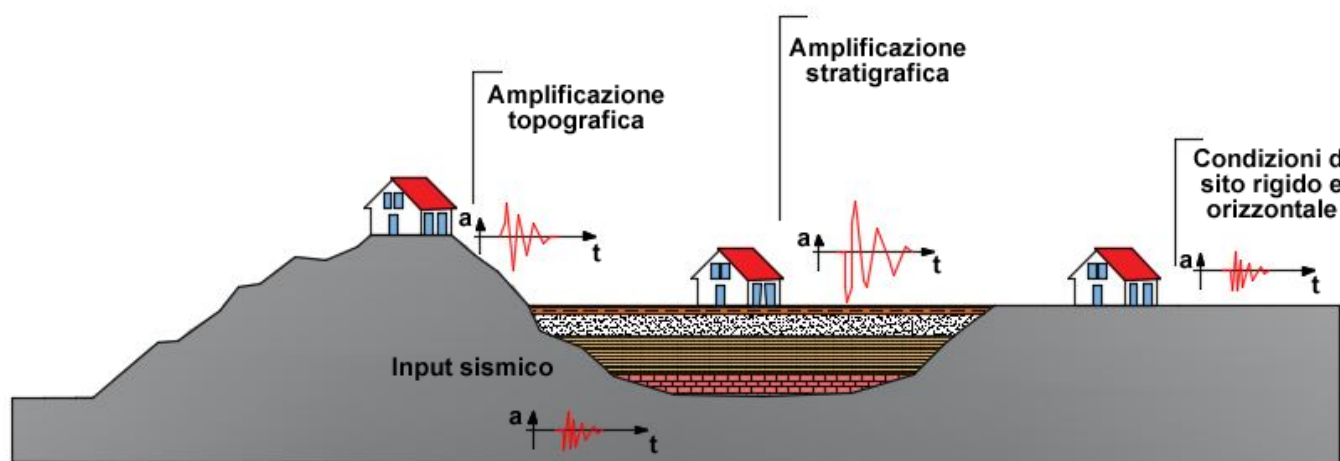


Fig. 55 – Effetto dell’amplificazione stratigrafica e topografica sull’azione sismica

Per tenere conto di questo aspetto, la normativa identifica cinque categorie di sottosuolo **A, B, C, D, E** e quattro categorie topografiche **T1, T2, T3, T4**.

La categoria di sottosuolo viene determinata, come visto, in funzione del valore che assume la velocità delle onde di taglio **Vs** nel sottosuolo (Tab. 3.2.II delle NTC), mentre la categoria topografica dalla morfologia che assume la superficie topografica (Tab. 3.2.IV delle NTC).

In merito all'amplificazione stratigrafica per sottosuolo di categoria **A** i coefficienti **S_s** e **C_c** valgono **1,00** mentre per le categorie di sottosuolo **B**, **C**, **D**, ed **E** tali coefficienti possono essere calcolati, in funzione dei valori di F_0 e T^*c relativi al sottosuolo di categoria **A**, mediante le espressioni fornite nella Tab. 3.2.V delle NTC, nelle quali g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Tabella 3.2.V delle NTC – Espressioni di S_s e di C_c

Categoria Sottosuolo	S _s	C _c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot ag/g \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T^*c)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot ag/g \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T^*c)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot ag/g \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T^*c)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot ag/g \leq 1,60$	$1,10 \cdot (T^*c)^{-0,20}$

Nel caso in esame, avendo determinato una categoria di suolo **D**, il coefficiente di amplificazione stratigrafica **S_s** ed il coefficiente **C_c** assumono i seguenti valori:

Stato Limite	Coefficiente S _s	Coefficiente C _c
SLO	1,800	2,365
SLD	1,800	2,214
SLV	1,800	1,884
SLC	1,800	1,808

Relativamente all'amplificazione topografica, per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella Tab. 3.2.VI delle NTC, in funzione delle categorie topografiche e dell'ubicazione dell'opera.

Tabella 3.2.VI delle NTC – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S _T
T1		1,00
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,20
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,20
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,40

Il sito ubicato in località Parco del Castello nel Comune di Castel Volturno (CE) è posto alla quota media di 2,5 m s.l.m. su una superficie pianeggiante.

Per tale motivo esso rientrano nella categoria topografica **T1**, a cui corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica **S_T** pari a **1,00**.

10. Caratterizzazione sismica secondo le N.T.C. 2018 (D.M. 17.01.2018)

L'entrata in vigore delle Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC D.M. 17.01.2018, a cui si rimanda per maggiori dettagli) ha imposto di procedere ad una diversa definizione del profilo stratigrafico dei suoli di fondazione, in funzione delle azioni sismiche di progetto (cfr. N.T.C. C3 - AZIONI SULLE COSTRUZIONI). La pericolosità sismica del territorio nazionale è definita convenzionalmente facendo riferimento ad un sito rigido (di categoria **A**) (cfr. NTC § 3.1.2) con superficie topografica orizzontale (di categoria **T1**), in condizioni di campo libero, cioè in assenza di manufatti. Le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di riferimento, per una fissata *PVR*, si ritengono individuate quando se ne conosca l'accelerazione massima attesa (*ag*) ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione. È possibile anche descrivere il terremoto in forma di accelerogrammi, ovviamente questi devono essere compatibili con le predette caratteristiche del moto sismico del sito.

I caratteri del moto sismico su sito di riferimento rigido orizzontale sono descritti dalla distribuzione sul territorio nazionale delle seguenti grandezze, sulla base delle quali sono compiutamente definite le forme spettrali per la generica *PVR*:

- *ag* = accelerazione massima al sito;
- *Fo* = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- *TC** = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

10.1 Valutazione dell'azione sismica e relativi parametri

Ai fini della determinazione delle azioni sismiche di progetto nei modi previsti dalle *NTC*, la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita convenzionalmente facendo riferimento ad un sito rigido (di categoria **A**) con superficie topografica orizzontale (di categoria **T1**), in condizioni di campo libero, cioè in assenza di manufatti.

Negli sviluppi successivi il sito di riferimento sarà caratterizzato da sottosuolo di categoria A e superficie topografica orizzontale T1. Le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di riferimento, per una fissata *P_{Vg}*, si ritengono individuate quando se ne conosca l'accelerazione massima ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione. Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle *NTC*, dalle accelerazioni *ag* e dalle relative forme spettrali.

Le forme spettrali previste dalle *NTC* sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

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

10.2 Stati limite e relative probabilità di superamento

Gli stati limite, sia di *esercizio* (**SLD** – Stato Limite di **D**anno ed **SLO** – Stato Limite di immediata Operatività) che *ultimi* (**SLV** – Stato Limite della **V**ita ed **SLC** – Stato Limite di prevenzione del **C**ollasso) consentono di individuare quattro situazioni diverse che, al crescere progressivo dell'azione sismica, ed al conseguente progressivo superamento dei quattro stati limiti ordinati per azione sismica crescente (**SLO**, **SLD**, **SLV**, **SLC**), fanno corrispondere una progressiva crescita del danneggiamento all'insieme della struttura.

Ai quattro stati limite sono stati attribuiti (Tabella 3.2.1 delle NTC) valori della probabilità di superamento P_{vg} pari rispettivamente a 81%, 63%, 10% e 5%. La pericolosità sismica in un generico sito, dunque, deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità sono forniti:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopra definite;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

La pericolosità sismica di un sito, quindi, è descritta dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo, in detto sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato. Nelle NTC, tale lasso di tempo, espresso in anni, è denominato "*periodo di riferimento*" V_R e la probabilità è denominata "*probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento*" P_{vg} . Per il sito oggetto di studio è stata effettuata la valutazione della risposta sismica locale, secondo i dettami del D.M. del 17.01.2018, tramite l'utilizzo del software sperimentale *EXCEL SPETTRI NTC 1.0.3* sviluppato e messo a disposizione dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Questo software fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticali) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in 3 fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta dei valori di alcuni parametri:

- *FASE 1 - Individuazione della pericolosità del sito (sulla base del progetto S1 - INGV).*
- *FASE 2 - Scelta della strategia di progettazione.*
- *FASE 3 - Determinazione dell'azione di progetto.*

Nel seguito vengono forniti i valori dei parametri a_g , F_0 , T^*c , in funzione della latitudine e longitudine per il sito d'intervento ubicato in località Parco del Castello del Comune di Castel Volturno (CE), per i periodi di ritorno T_R , associati a ciascuno stato limite di riferimento, da utilizzare per definire l'azione sismica nei modi previsti dalle NTC, mentre i successivi grafici rappresentano gli spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_R di riferimento per categoria di suolo A (**FASE 1**).

Di seguito, quindi, si illustra la pericolosità sismica in condizioni di campo libero e riferita a suolo di categoria **A** e superficie topografica orizzontale **T1**.

Le coordinate geografiche (in gradi decimali) dei siti (prese nel baricentro dei rispettivi lotti di terreno) sono state convertite dal sistema *WGS84* al sistema di riferimento *ED50*, in quanto il reticolo dei punti che determina la pericolosità sismica di base (*Allegato B delle NTC 2018*) è ancorata al sistema ED50 e, dato che il reticolo NTC18 è un campionamento della stessa, ne consegue che il reticolo è anche ancorato all'ellissoide ED50 (Fig. 56).

Per quanto riguarda la strategia di progettazione (**FASE 2**), su indicazione del progettista, si è valutato il periodo di riferimento V_R delle opere da realizzare in **50 anni**, ottenuto come prodotto tra la vita nominale V_N (**50 anni**) ed il valore del coefficiente d'uso C_u (**1,0**) che compete alla classe d'uso delle opere di progetto (Classe II). In questo modo si sono ricavati, per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza P_{Vg} nel periodo di riferimento V_R , il periodo di ritorno T_R del sisma ed i valori dei parametri a_g , F_0 , T^*c . (Figg. 57-58)

Infine, relativamente alla determinazione dell'azione di progetto (**FASE 3**), in questa sede ci si limita a fornire al progettista il fattore **S** di incremento dell'accelerazione sismica massima a_g che è un coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche.

FASE 1 - Individuazione della pericolosità del sito (sulla base dei risultati del progetto S1-INGV). Pericolosità sismica in condizioni di campo libero e riferita a suolo di categoria A e superficie topografica orizzontale T1

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE: LATTITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE: PROVINCIA: COMUNE:

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta |>

Variabilità dei parametri |>

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri |>

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo

Sito esterno al reticolo

Interpolazione su 3 nodi

Interpolazione corretta

Interpolazione

La "Ricerca per comune" utilizza le ... coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che ... all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

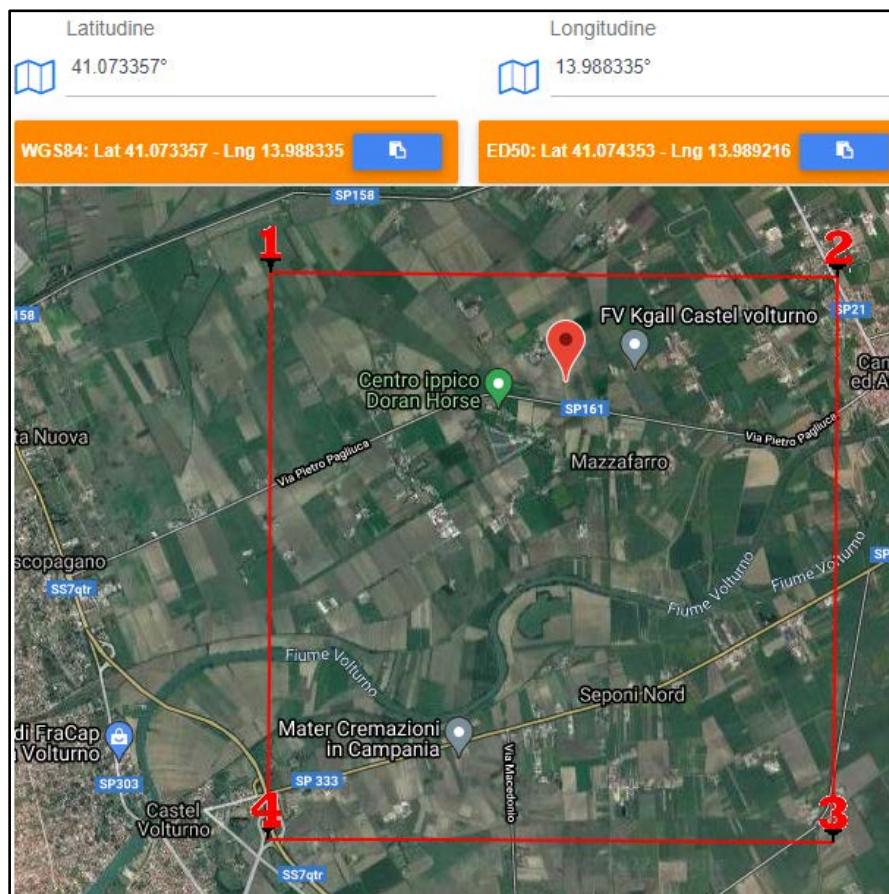


Fig. 56 - Nodi di reticolo intorno al sito ubicato in località Parco del Castello del Comune Castel Volturno

Si determina la maglia di riferimento in base alle tabelle dei parametri spettrali fornite dal ministero e, sulla base della maglia interessata, si determinano i valori di riferimento del punto come media pesata dei valori nei vertici della maglia moltiplicati per le distanze dal punto:

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 32086	Lat: 41,0841	Lon: 13,9546	Distanza: 3096,924
Sito 2 ID: 32087	Lat: 41,0838	Lon: 14,0209	Distanza: 2855,078
Sito 3 ID: 32309	Lat: 41,0338	Lon: 14,0205	Distanza: 5220,628
Sito 4 ID: 32308	Lat: 41,0341	Lon: 13,9542	Distanza: 5355,825

Latitudine = 41,07435 N

Longitudine = 13,98921 E

Categoria di suolo A

Superficie topografica T1

**Tabella dei valori dei parametri di a_g , F_0 , T_c^*
per i periodi di ritorno T_R di riferimento.**

T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_c^* [s]
30	0,037	2,417	0,279
50	0,046	2,407	0,319
72	0,052	2,449	0,339
101	0,059	2,509	0,354
140	0,066	2,530	0,371
201	0,074	2,538	0,402
475	0,095	2,636	0,440
975	0,114	2,730	0,478
2475	0,141	2,871	0,529

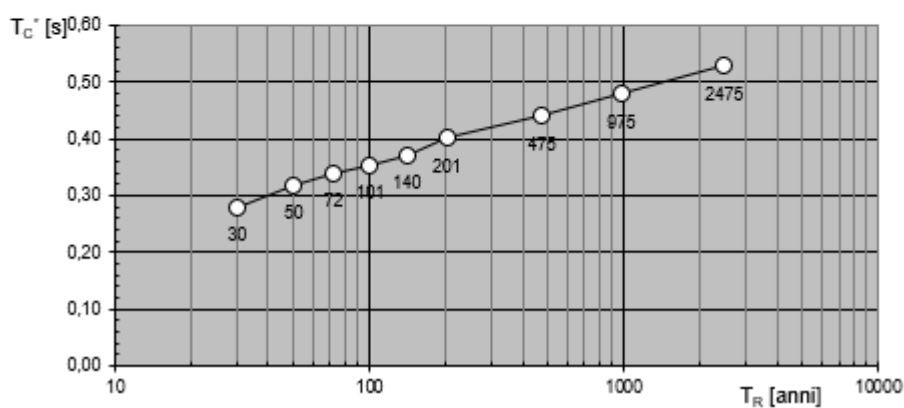
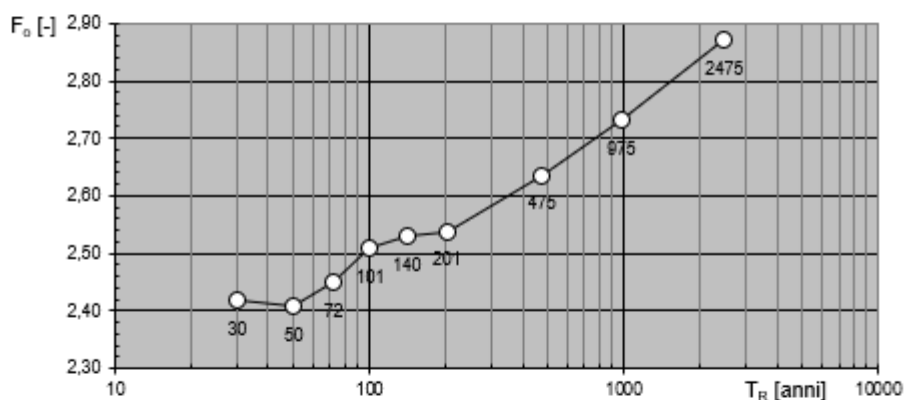
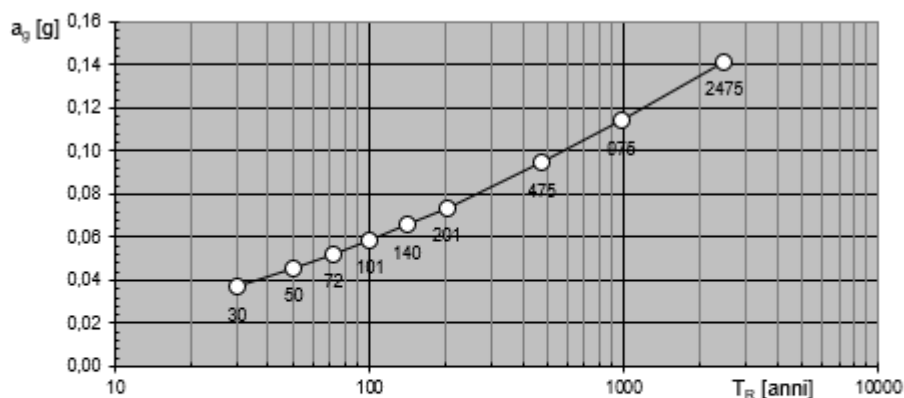
dove:

a_g = accelerazione massima orizzontale del suolo della zona sismica, su sito di riferimento rigido orizzontale;

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

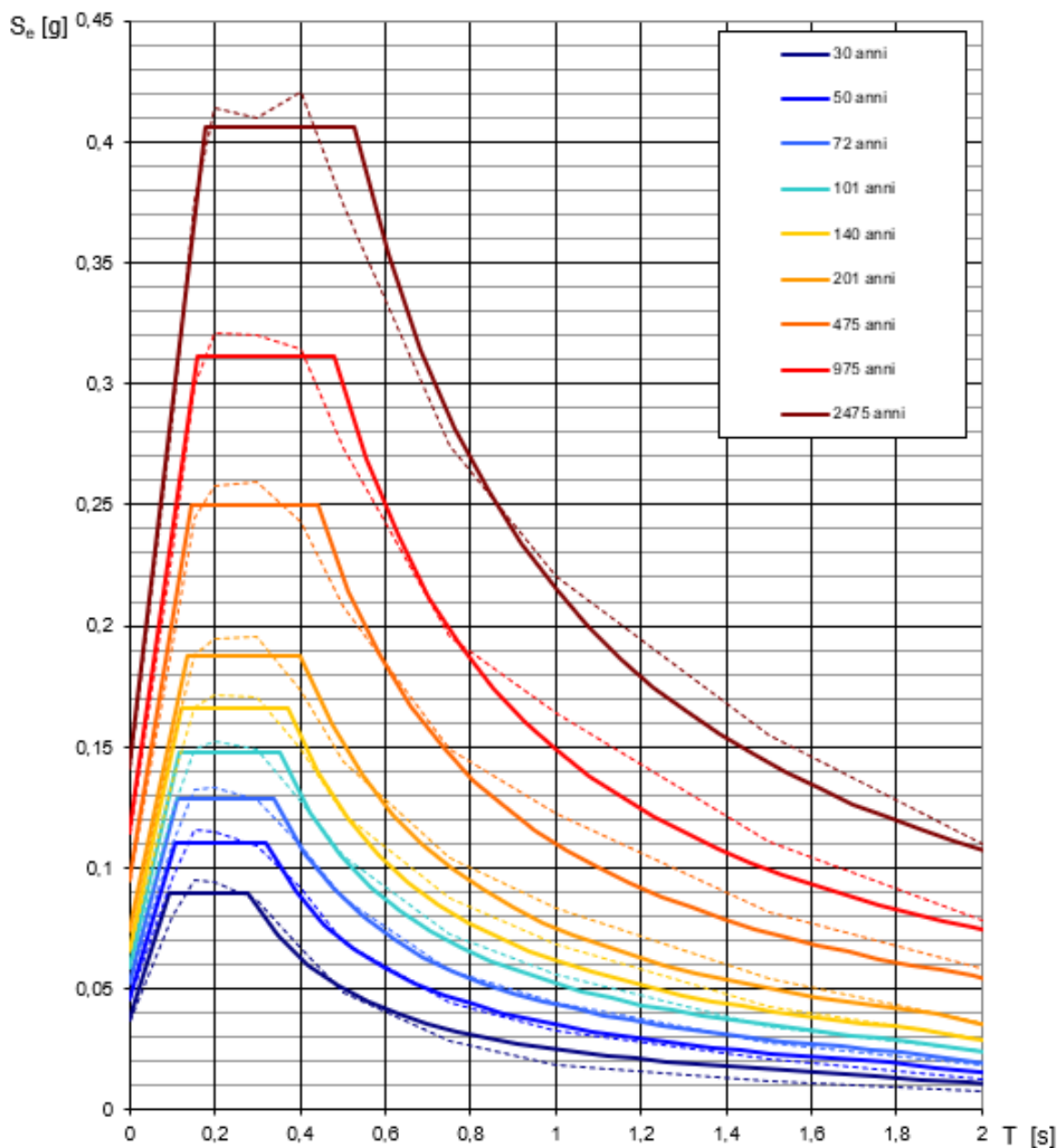
T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale, relativamente a sito di riferimento rigido orizzontale.

Valori dei parametri a_g , F_o , T_C^* : variabilità col periodo di ritorno T_R



Coordinate del sito = Long. 13,98921 – Lat. 41,07435 (in gradi decimali)

Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_R di riferimento



NOTA:

Con linea continua si rappresentano gli spettri di Normativa, con linea tratteggiata gli spettri del progetto S1-INGV da cui sono derivati.

Fig. 57 - Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_R di riferimento, per categoria di suolo A e superficie topografica T1

FASE 2 - Scelta della strategia di progettazione

FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) - V_N info

Coefficiente d'uso della costruzione - c_U info

Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) - V_R info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) - T_R info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{VR} = 81\%$	30
	SLD - $P_{VR} = 63\%$	50
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{VR} = 10\%$	475
	SLC - $P_{VR} = 5\%$	975

Elaborazioni

Grafici parametri azione ▶

Grafici spettri di risposta ▶

Tabella parametri azione ▶

Strategia di progettazione



LEGENDA GRAFICO

--□-- Strategia per costruzioni ordinarie

...■... Strategia scelta

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno SL

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_0 [-]	T_C^* [s]
SLO	30	0,037	2,417	0,279
SLD	50	0,046	2,408	0,319
SLV	475	0,095	2,635	0,440
SLC	975	0,114	2,730	0,478

Latitudine = 41,07435 N
Longitudine = 13,98921 E

Valori dei parametri di a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascuno Stato Limite

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

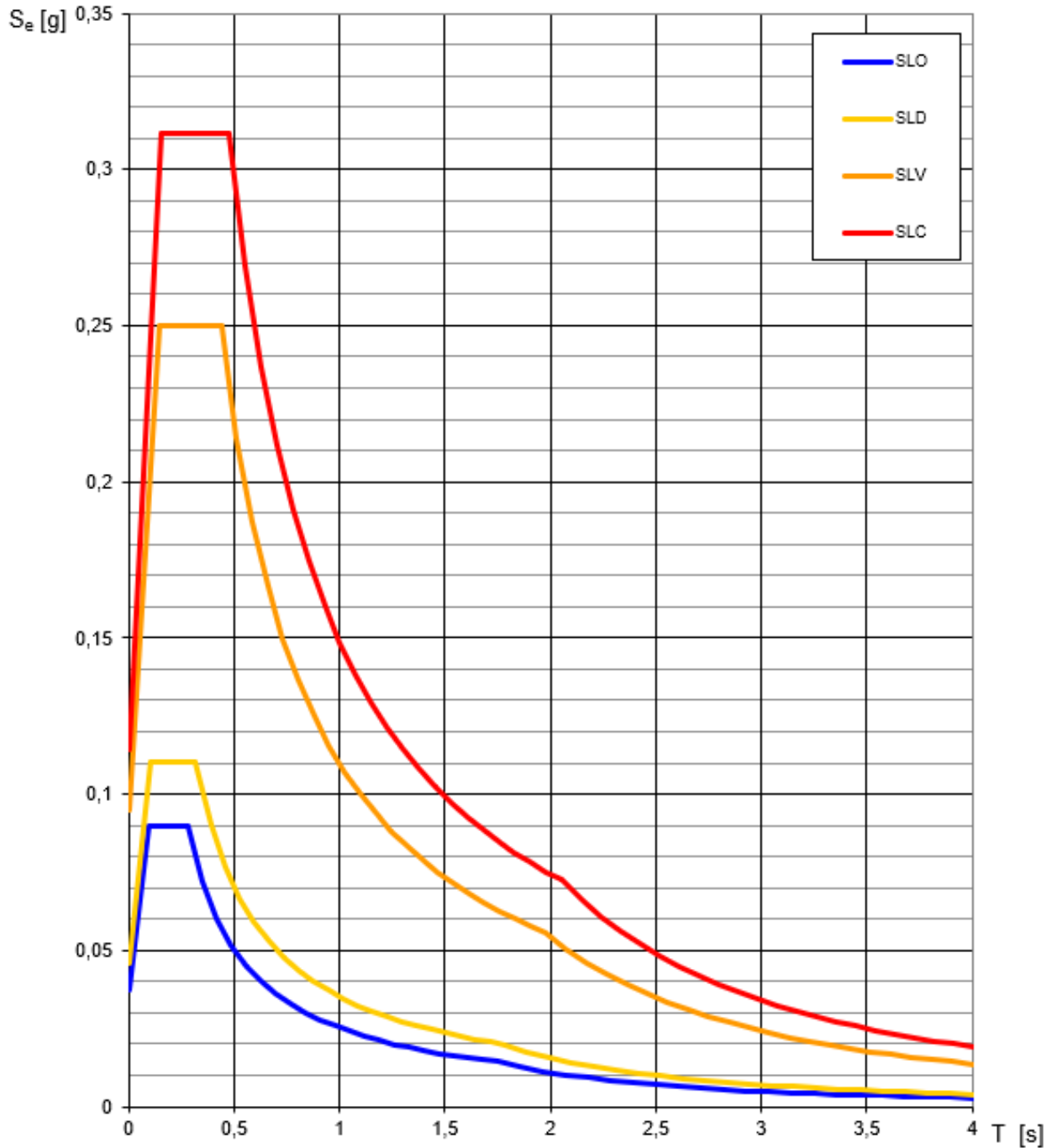


Fig. 58 - Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

FASE 3 – Determinazione dell'azione di progetto

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO			
Stato Limite			
Stato Limite considerato		SLV	info
Risposta sismica locale			
Categoria di sottosuolo		D	info
Categoria topografica		T1	info
		$S_S =$ 1,800	$C_C =$ 1,884 info
		$h/H =$ 0,000	$S_T =$ 1,000 info
<small>(h=quota sito. H=altezza rilievo topografico)</small>			
INTRO	FASE 1	FASE 2	FASE 3

Il moto sismico di ciascun punto del suolo al di sotto della costruzione può essere decomposto in componenti secondo tre direzioni ortogonali; per ciascuna componente dell'azione sismica può essere fornita una rappresentazione puntuale mediante la sola accelerazione massima attesa, mediante l'intero spettro di risposta o mediante storie temporali dell'accelerazione (accelerogrammi). La rappresentazione di riferimento per le componenti dell'azione sismica è lo spettro di risposta elastico in accelerazione per uno smorzamento convenzionale del 5%.

Esso fornisce la risposta massima in accelerazione del generico sistema dinamico elementare con periodo di oscillazione $T \leq 4$ s ed è espresso come il prodotto di una forma spettrale per l'accelerazione massima del terreno.

La forma spettrale per le componenti orizzontali è definita mediante le stesse espressioni fornite dall'EN1998 nelle quali, tuttavia, non si è assunto un singolo valore per l'amplificazione massima ma si è fornita tale grandezza, F_0 , in funzione della pericolosità del sito insieme alle grandezze ag , T_C e, conseguentemente, T_B , T_D .

Per la componente verticale, invece, le uniche grandezze fornite in funzione della pericolosità del sito sono l'accelerazione massima, posta pari alla massima accelerazione orizzontale del suolo ag , e l'amplificazione massima F_v , espressa come funzione di ag . La categoria di sottosuolo e le condizioni topografiche incidono sullo spettro elastico di risposta.

Specificamente, l'accelerazione spettrale massima dipende dal coefficiente $S = S_S \times S_T$ che comprende gli effetti delle amplificazioni stratigrafica (S_S) e topografica (S_T). Per le componenti orizzontali dell'azione sismica, il periodo T_C di inizio del tratto a velocità costante dello spettro, è funzione invece del coefficiente C_C , dipendente anch'esso dalla categoria di sottosuolo.

A parità di categoria di sottosuolo, l'andamento di S_S con $F_0 \cdot ag$ è caratterizzato da due tratti orizzontali, rispettivamente per bassi ed elevati valori di pericolosità sismica; tali tratti sono raccordati da un segmento di retta che descrive il decremento lineare di S_S con $F_0 \cdot ag$.

In genere, a parità di pericolosità del sito ($F_0 \cdot ag$), i valori di S_S si incrementano al decrescere della rigidezza del sottosuolo, passando dal sottosuolo di categoria A al sottosuolo di categoria E. In particolare, per $F_0 \cdot ag < 0.78g$, il sottosuolo di categoria D mostra amplificazioni maggiori delle

altre categorie di sottosuolo, mentre, per $0.78g \leq F_0-ag < 1.17g$ i fenomeni di amplificazione sono più marcati per il sottosuolo di categoria *C*.

A parità della categoria di sottosuolo, il coefficiente C_c decresce al crescere di T_c^* e, conseguentemente, l'effetto di amplificazione massima si sposta verso periodi più brevi e si riduce l'estensione del tratto orizzontale caratterizzato da ordinata spettrale massima. In genere, a parità di T_c^* , i valori di C_c si incrementano al decrescere della rigidità del sottosuolo, ovvero passando dal sottosuolo di categoria *A* al sottosuolo di categoria *E*.

Il sottosuolo di categoria *D* presenta, nell'intervallo di valori di interesse, valori di TC maggiori di quelli relativi alle altre categorie di sottosuolo.

In definitiva, il valore dell'accelerazione massima in campo libero (a_{max}), dato dal prodotto di ag per il fattore S di incremento dell'accelerazione sismica massima ag ($S = S_s \times S_T$), calcolata per il sito in esame, per la strategia di progettazione scelta, assume i seguenti valori:

Valore dell'accelerazione sismica massima in campo libero (a_{max})

Stato Limite	Coefficiente S_s	Coefficiente S_T	$S = S_s \times S_T$	ag	$a_{max} = ag \times S$
SLO	1,800	1,000	1,800	0,037	0,0666
SLD	1,800	1,000	1,800	0,046	0,0828
SLV	1,800	1,000	1,800	0,095	0,1710
SLC	1,800	1,000	1,800	0,114	0,2052

11. Verifica delle pericolosità dovuti agli effetti cosismici

In relazione a possibili scenari di pericolosità, oltre a fenomeni di amplificazione locale si possono registrare veri e propri fenomeni di instabilità dei terreni. Questi insorgono quando le forze (azioni) indotte da un terremoto superano la resistenza al taglio dei terreni provocandone la rottura. L'approccio a tale situazione reale consiste nell'individuare le condizioni di potenziale instabilità del terreno ed il margine di sicurezza rispetto a tale situazione in occasione dell'evento sismico atteso.

I terreni sottoposti a potenziale instabilità sono definiti sismicamente instabili, in cui gli sforzi ciclici indotti dal terremoto di riferimento uguagliano o superano la resistenza al taglio del terreno stesso che, non essendo in grado di trasmettere gli sforzi indotti, subisce collassi e rotture. Generalmente tali terreni sono caratterizzati da proprietà meccaniche molto scadenti, basse resistenze al taglio ed elevate deformabilità. I possibili effetti che un terremoto può provocare in un determinato sito, in rapporto alle condizioni locali sono:

- fenomeni di liquefazione in terreni granulari fini;
- fenomeni di densificazione in terreni incoerenti, nonché asciutti o parzialmente saturi;

- movimenti franosi lungo pendii;
- cedimenti in terreni argillosi soffici;
- scorrimenti e cedimenti differenziali in corrispondenza di contatti geologici o di faglie.

I fenomeni sovraelencati sono imputabili principalmente alle proprietà geotecniche dei terreni e all'interazione fra onde sismiche e natura dei depositi.

Esiste un'abbondante bibliografia, a livello nazionale ed internazionale, relativa agli effetti cosismici indotti da terremoti sia di storico che di recente accadimento, di moderata o elevata magnitudo/intensità. Oltre alla descrizione dei fenomeni ed alla ricostruzione dei meccanismi che presiedono al verificarsi di tali effetti di superficie, che corrispondono sempre a deformazioni di natura permanente del terreno e quindi a condizioni di rottura a seguito di sollecitazioni sismiche, tali studi sono volti alla definizione della occorrenza di ciascuna categoria di effetti in relazione a parametri quali: magnitudo dell'evento, distanza epicentrale ovvero distanza dalla linea di rottura desunta dalla distribuzione degli after-shock, accelerazione di picco (PGA), ecc..

11.1 Stabilità nei confronti della liquefazione

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi sabbiosi saturi e dipendono principalmente da:

- proprietà geotecniche dei terreni;
- caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata;
- genesi e storia geologica dei terreni.

Un terreno incoerente saturo, in assenza di sollecitazioni sismiche è soggetto alla pressione litostatica, dovuta al peso dei sedimenti sovrastanti. Durante una sollecitazione sismica vengono indotte nel terreno delle sollecitazioni cicliche di taglio, dovute alla propagazione delle onde sismiche verso la superficie, mentre la pressione litostatica resta costante.

Nel terreno si possono generare fenomeni di liquefazione se la scossa sismica produce un numero di cicli tale da far sì che la pressione interstiziale uguagli la pressione di confinamento. Nei depositi la pressione di confinamento aumenta con la profondità, mentre l'ampiezza dello sforzo di taglio indotto dal sisma diminuisce. La resistenza alla liquefazione quindi è maggiore con la profondità. Maggiore è la durata di un terremoto più alta è la possibilità che si arrivi (maggior numero di cicli) alla liquefazione. Inoltre, maggiore è l'ampiezza della vibrazione e della deformazione indotta e minore è il numero di cicli necessari per giungere a tale condizione.

La probabilità che un deposito raggiunga le condizioni per la liquefazione dipende anche dallo stato di addensamento, dalla composizione granulometrica, dalle condizioni di drenaggio, dalla storia delle sollecitazioni sismiche e dall'età del deposito stesso. Tanto minore è il grado di

addensamento del materiale (elevato indice dei vuoti e bassa densità relativa) tanto maggiore è la probabilità che, a parità di altre condizioni, un deposito raggiunga lo stato di liquefazione.

L'area in esame è costituita da una successione di terreni di natura prevalentemente alluvionale e subordinatamente piroclastica, da poco a moderatamente consistenti, riconducibili fino alla profondità media di almeno 20,00 m dal piano campagna, da argille, argille sabbiose, limi argillosi e limi sabbiosi, da torbe, argille torbose e sabbiose, con caratteristiche meccaniche mediocri.

A tale pacco di strati seguono sabbie ghiaiose debolmente limose, sabbie con ghiaia fino ad una profondità di circa 26,00 m dal piano campagna, aventi caratteristiche granulometriche abbastanza differenziate.

I terreni descritti sono sotto falda a partire dalla profondità di 2,20 m dal piano campagna e, se sottoposti a sollecitazioni sismiche di elevata magnitudo, possono dar luogo a fenomeni di liquefazione dovuti alla perdita di resistenza al taglio.

Il fenomeno della liquefazione si origina preferibilmente in sedimenti posti tra 1,00 m e 20,00 m di profondità dal piano campagna, come chiarisce la Presidenza del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile " *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*".

Le NTC richiedono una verifica alla suscettibilità di liquefazione dei terreni del sito sul quale insiste la progettazione di un manufatto. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

Il D.M. 17.01.2018 contiene al punto 7.11.3.4.2 le linee guida per valutare la suscettibilità alla liquefazione dei terreni. Una valutazione semplificata della suscettibilità può essere ottenuta considerando le seguenti condizioni:

- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti
- profondità media stagionale della falda
- tipo di deposito.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;*
2. *profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
3. *depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$, dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 KPa, e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove*

penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata a una tensione di verticale di 100 KPa;

4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura 59 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in figura 60 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

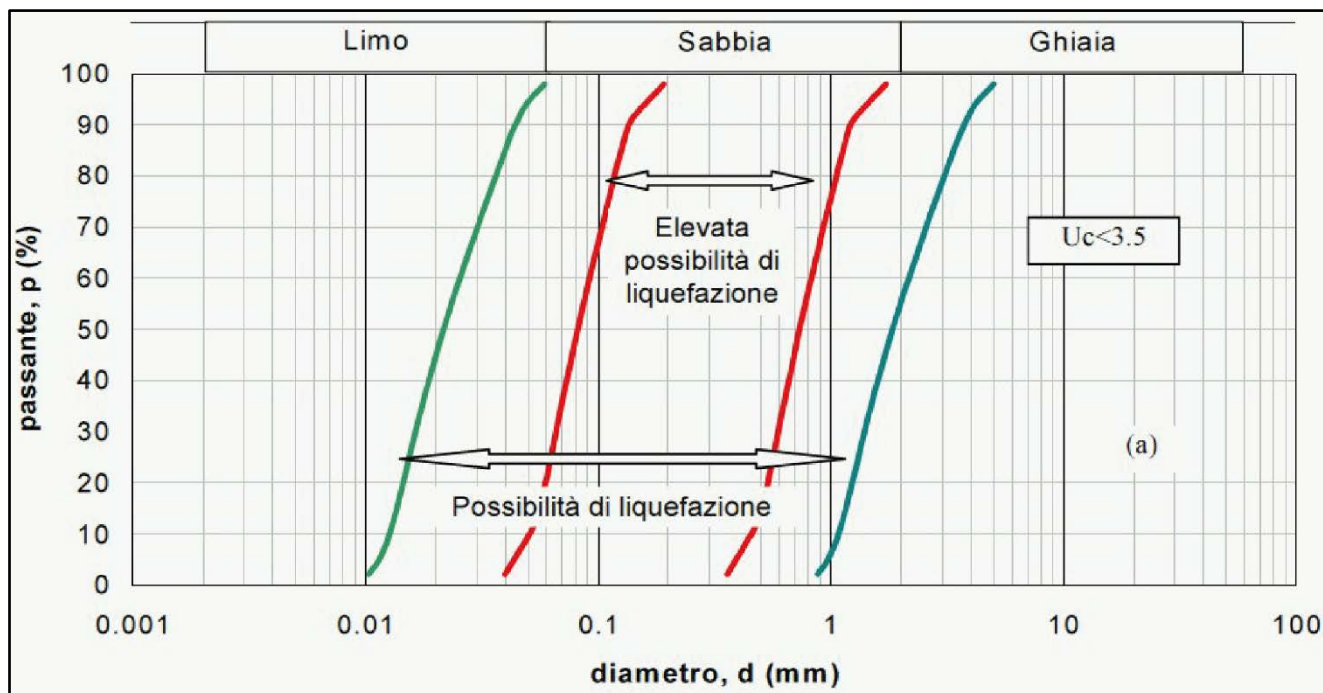


Fig. 59 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione ($U_c < 3,5$)

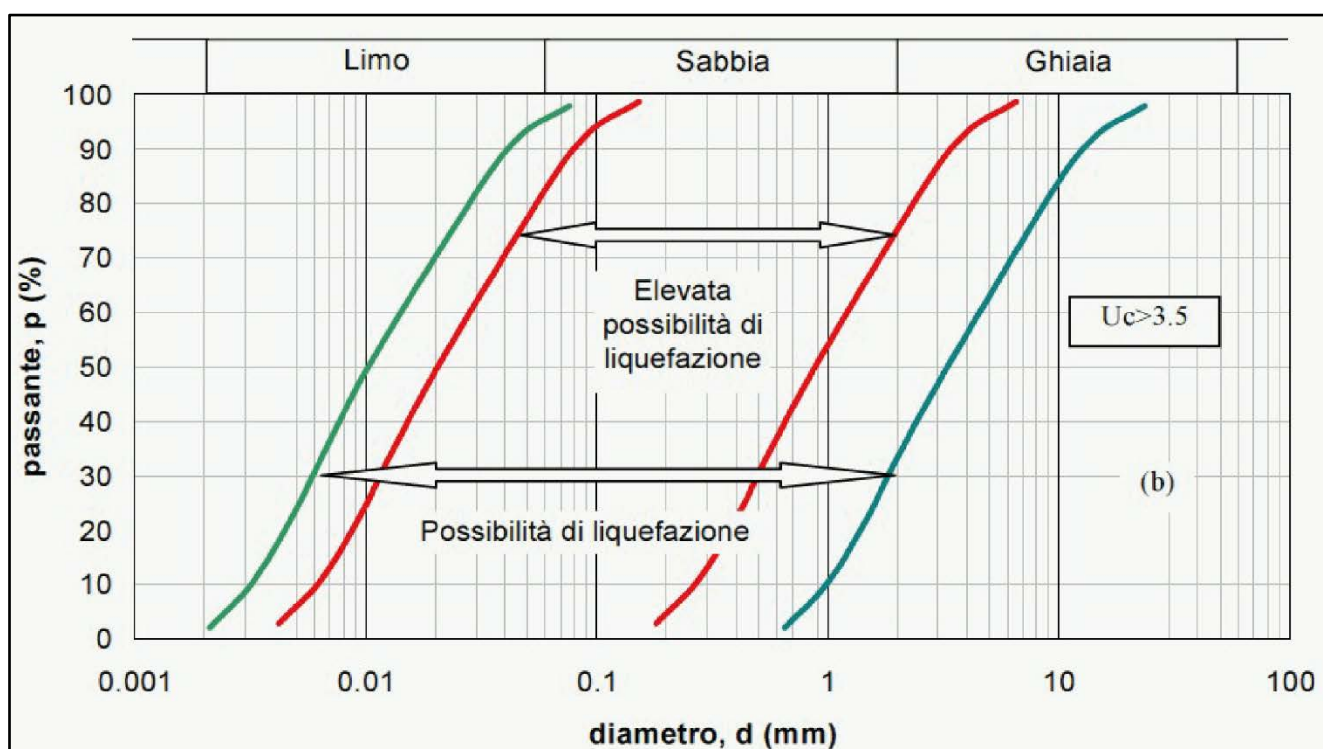


Fig. 60 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili di liquefazione ($U_c > 3,5$)

Quando la condizione 1 non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate almeno alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle condizioni 2, 3 e 4.

Quando nessuna delle condizioni risulti soddisfatta e il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili.

La verifica può essere effettuata con metodologie di tipo storico-empirico in cui il coefficiente di sicurezza viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di progetto. La resistenza alla liquefazione può essere valutata sulla base dei risultati di prove in sito o di prove cicliche di laboratorio.

La sollecitazione indotta dall'azione sismica è stimata attraverso la conoscenza dell'accelerazione massima attesa alla profondità di interesse.

La caratterizzazione sismica dell'area di studio è stata trattata nei capitoli precedenti di questa relazione, ai quali si rimanda.

Di seguito, si analizzano i dati disponibili per l'analisi dei quattro elementi predisponenti alla liquefazione.

1. Condizione 1: accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;

La condizione 1 non risulta soddisfatta in quanto:

il sito in esame ricade in una categoria di suolo D (cfr. Capitolo 9), in riferimento al valore di V_{S30} misurato a partire dal piano campagna. Per lo stesso sito è stato calcolato è stato determinato quanto segue:

- ✓ *un valore di $a_g = 0,095g$, su suolo di categoria A, per un terremoto con periodo di ritorno di 475 anni, ed i valori $F_0 = 2,635$ e $T_c^* = 0,440$. L'incremento dell'accelerazione sismica massima a_{max} , attesa al piano campagna, è dato dall'espressione $S = S_s \times ST$. Nel caso in esame, per SLV, S_s è pari 1,800 e il valore ST è pari a 1,000, da cui si ricava che $S = 1,800$. Pertanto, l'accelerazione a_{max} attesa al piano campagna è $a_g (0,095) \times S (1,800) = 0,171$.*

2. Condizione 2: profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;

La condizione 2 non risulta soddisfatta in quanto:

- ✓ dalle evidenze delle indagini realizzate in sito e dall'analisi delle indagini disponibili eseguite in aree limitrofe a quella di specifico, si evince che la profondità media stagionale della falda è posta ad una profondità media di 2,50 m dal piano campagna, quindi inferiore a 15 m metri.
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$, dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata a una tensione efficace verticale di 100 KPa, e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata a una tensione di verticale di 100 KPa;

La condizione 3 non risulta soddisfatta in quanto:

- ✓ dalle indagini eseguite in sito si è riscontrato che il sottosuolo dell'area in esame è costituito fino alla profondità di almeno 20,00 m da depositi con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} < 30$ e $qc_{1N} < 180$, costituiti da sabbie, argille e limi di natura vulcanica con $(N_1)_{60}$ pari a 12.

La procedura con la quale si è verificata la condizione 3 è descritta nelle pagine che seguono.

La resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60}$ è stata calcolata utilizzando il metodo proposto da *Seed e Idriss' (1982)*. Tale metodo calcola il numero dei colpi N_{SPT} corretto alla quota desiderata per tenere conto della pressione litostatica mediante la seguente espressione:

$$(N_{1,60}) = C_N N_m$$

dove N_m è il numero medio dei colpi nella prova penetrometrica standard SPT e C_N un coefficiente correttivo che si calcola mediante la seguente espressione:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,5}$$

dove σ'_{v0} è la pressione verticale effettiva, P_a la pressione atmosferica espressa nelle stesse unità di σ'_{v0} ed n un'esponente che dipende dalla densità relativa del terreno (Fig. 61).

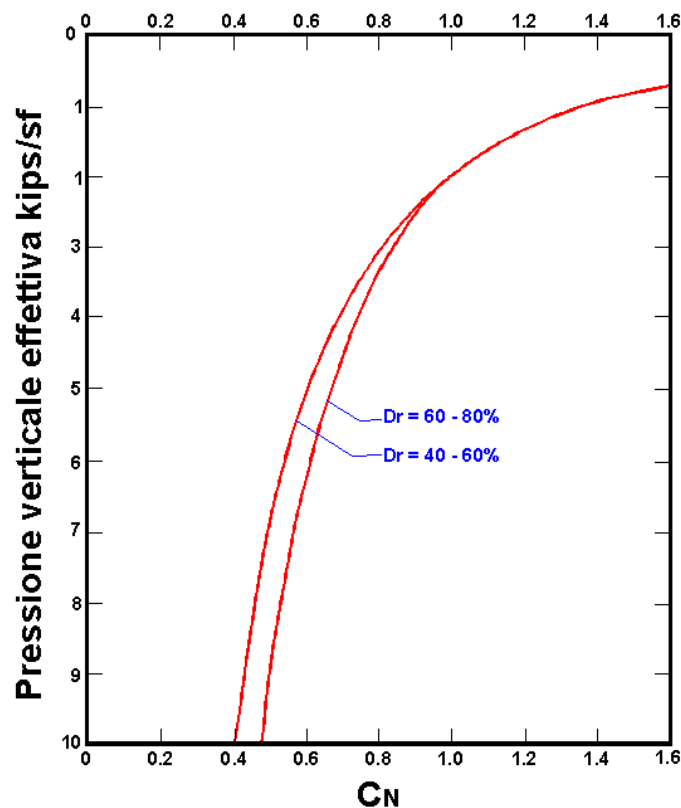


Fig. 61 – Coefficiente correttivo C_N

Gli Autori hanno precisato che questa procedura è valida per sabbie con $D_{50} > 0,25$ mm; per sabbie limose e limi suggeriscono di correggere ulteriormente il valore di $N_{1,60}$:

$$(N_{1,60})_{cs} = N_{1,60} + 7,5$$

Per tale verifica sono stati utilizzati il numero medio N_{SPT} ed il peso di volume saturo ricavati dalle elaborazioni delle prove penetrometriche dinamiche continue eseguite in sito.

Nel sito in esame, avendo eseguito delle prove penetrometriche statiche CPT, come per la resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60}$, è stata calcolata anche la resistenza alla punta normalizzata con il metodo proposto da Robertson e Wride (1997) mediante la seguente espressione:

$$q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{Pa} \right) \times \left(\frac{Pa}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,5}$$

dove q_c è la resistenza alla punta della prova penetrometrica statica CPT, σ'_{v0} è la pressione verticale effettiva, Pa la pressione atmosferica espressa nelle stesse unità di σ'_{v0} ed n un'esponente che dipende dalla densità relativa del terreno.

Successivamente per l'area investigata è stata calcolata la pressione verticale efficace, misurata a metà degli strati, utilizzando i valori del peso di volume saturo (γ_{sat}) e del peso dell'unità di volume dell'acqua (γ_w).

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive delle elaborazioni effettuate per ogni unità litotecnica individuata.

Valori della resistenza penetrometrica delle prove SPT normalizzati

Prof. Iniz.	Prof. fin.	Prof. carico litostatico	H Falda	H acqua	γ_{sat}	γ_{acqua}	$\sigma_{terreno}$	σ_{acqua}	$\sigma_{efficace}$	Pa	Nspt	$(N_1)_{60}$
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	KN/mc	KN/mc	KPa	KPa	KPa	KPa	n°	n°
0,00	3,15	1,58	2,20	0,00	18,24	9,80	28,73	0,00	28,73	100,00	2,5	4,66
3,15	4,10	3,63	2,20	1,43	18,73	9,80	67,90	13,97	53,93	100,00	13	17,79
4,10	7,70	5,90	2,20	3,70	18,33	9,80	108,15	36,26	71,89	100,00	4	4,70
7,70	13,50	10,60	2,20	8,40	17,65	9,80	187,09	82,32	104,77	100,00	10,5	10,27

Valori della resistenza penetrometrica delle prove CPT normalizzati

Prof. Iniz.	Prof. fin.	Prof. carico litostatico	H Falda	H acqua	γ_{sat}	γ_{acqua}	$\sigma_{terreno}$	σ_{acqua}	$\sigma_{efficace}$	Pa	qc	qc _{1N}
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	KN/mc	KN/mc	KPa	KPa	KPa	KPa	KPa	-
0,00	2,67	1,33	2,20	0,00	18,24	9,80	24,32	0	24,32	100	1773	35,95
2,67	4,13	3,40	2,20	1,20	18,73	9,80	63,68	11,76	51,92	100	7223	100,24
4,13	7,40	5,77	2,20	3,57	18,33	9,80	105,70	34,9533	70,75	100	1851	22,00
7,40	14,73	11,07	2,20	8,87	17,65	9,80	195,33	86,8933	108,43	100	1281	12,30

dove:

Prof. iniz. = Profondità iniziale dello strato

Prof. fin. = Profondità finale dello strato

Prof. carico litost. = Profondità del carico litostatico

H falda = Profondità della falda dal p.c.

H acqua = Altezza colonna d'acqua

γ_{sat} = Peso di volume saturo

γ_{acqua} = Peso di volume dell'acqua

$\sigma_{terreno}$ = Pressione litostatica totale

σ_{acqua} = Pressione litostatica dovuta all'acqua

$\sigma_{eff.}$ = Pressione verticale efficace

Pa = Pressione atmosferica

Nspt = Numero di Nspt medio

$(N_1)_{60}$ = Numero di Nspt normalizzato

qc = resistenza alla punta media

qc_{1N} = resistenza alla punta normalizzata

Come si può evincere dalla tabella sopra riportata, per il sito indagato i valori di $(N_1)_{60}$ sono sempre inferiori a 30. Allo stesso modo, anche i valori di qc_{1N} risultano sempre inferiori a 180.

4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura 58 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in figura 59 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

La condizione 4 risulta soddisfatta in quanto:

- ✓ *dall'analisi delle curve granulometriche analizzate eseguite sui campioni di terreno prelevati durante i sondaggi a carotaggio continuo realizzati per il PUC di Castel Volturno e dalle prove di laboratorio eseguite sul campione di terreno prelevato nel corso delle indagini nel sito di specifico interesse, tutti dati rappresentativi dell'assetto stratigrafico del sottosuolo in esame, si evince che l'assortimento granulometrico è esterno alle zone indicate dalla Norma*

Per tale motivo ai sensi del D.M. 17.01.2018 - punto 7.11.3.4.2, è possibile omettere la verifica a liquefazione.

12. Compatibilità geologica, idrogeologica e geomorfologica del progetto proposto

Prima di addentrarsi in considerazioni sulla compatibilità geologica dei lavori di progetto è necessario, a parere di chi scrive, effettuare un sintetico rimando ai requisiti specificati dalle norme di riferimento, sia per quanto riguarda gli aspetti generali, sia per ciò che attiene alle disposizioni specifiche per la compatibilità geologica: ciò per far sì che quanto espresso in questo capitolo sia immediatamente, e più agevolmente, riconducibile ai dettami del disposto normativo.

La *Legge sismica 64/74* prescrive la verifica (art. 13) di compatibilità delle scelte di trasformazione urbanistica territoriale con le condizioni geomorfologiche del territorio. Il *Decreto 11/3/88* è richiamato per quanto riguarda la fattibilità geotecnica di opere su grandi aree, e, in maniera specifica, per i criteri di carattere geotecnico da adottare nell'elaborazioni di piani urbanistici (nuovi insediamenti urbani o civili o industriali, ristrutturazione di insediamenti già esistenti).

In presenza di questi riferimenti normativi, nella nostra regione fu attivata, già dal 1983, una procedura di analisi geologica del territorio ai fini della pianificazione, con la *L.R. 07.01.1983, n. 9 - Norme per l'esercizio delle funzioni regionali in materia di difesa del territorio dal rischio sismico* - che rappresenta un importante strumento concepito per fornire informazioni sulle limitazioni d'uso del territorio derivanti dalle sue caratteristiche geologico-tecniche, morfologiche e dalla valutazione degli effetti delle sollecitazioni sismiche.

Gli obiettivi del Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico predisposto dall'ex Autorità di Bacino dei fiumi Liri – Garigliano e Volturno sono, tra gli altri:

- a) *prevedere e disciplinare vincoli e limitazioni d'uso del suolo, le attività e gli interventi antropici consentiti, le prescrizioni e le azioni di prevenzione nelle diverse tipologie di aree a rischio e di pericolo, nei casi più delicati subordinatamente ai risultati di appositi studi di compatibilità idraulica o idrogeologica;*
- b) *stabilire norme per il corretto uso del territorio e delle risorse naturali nonché per l'esercizio compatibile delle attività umane a maggior impatto sull'equilibrio idrogeologico del bacino;*
- c) *dettare disposizioni per l'adeguamento della strumentazione urbanistico-territoriale, con la costituzione di vincoli, prescrizioni e destinazioni d'uso del suolo in relazione ai diversi gradi di rischio;*
- d) *conseguire condizioni accettabili di sicurezza idraulica e geologica del territorio mediante la programmazione degli interventi non strutturali ed interventi strutturali e la definizione delle esigenze di manutenzione, completamento ed integrazione dei sistemi di difesa esistenti;*
- e) *programmare la sistemazione, la difesa e la regolazione dei corsi d'acqua, anche attraverso la moderazione delle piene e la manutenzione delle opere, adottando modalità di intervento che privilegino la conservazione ed il recupero delle caratteristiche naturali del territorio;*

- f) *programmare altresì la sistemazione dei versanti e delle aree instabili a protezione degli abitati e delle infrastrutture, adottando modalità d'intervento che privilegino la conservazione ed il recupero delle caratteristiche naturali del territorio;*
- g) *definire le necessità di manutenzione delle opere in funzione del grado di sicurezza compatibile e del rispettivo livello di efficienza ed efficacia;*
- h) *indicare le necessarie attività di prevenzione, di allerta e di monitoraggio dello stato dei dissesti.*

La compatibilità delle nuove attività, opere e sistemazioni con le prescrizioni del citato Piano deve essere verificata alla luce del "rischio atteso" determinato. Tutte le nuove attività, opere e sistemazioni e tutti i nuovi interventi consentiti nelle aree a rischio da frana, rispetto alla pericolosità da frana dell'area, devono essere tali da:

- a) *migliorare o comunque non peggiorare le condizioni di sicurezza del territorio e di difesa del suolo;*
- b) *non costituire in nessun caso un fattore di aumento della pericolosità da dissesti di versante, attraverso significative e non compatibili trasformazioni del territorio nelle aree interessate;*
- c) *non compromettere la stabilità dei versanti;*
- d) *non costituire elemento pregiudizievole all'attenuazione o all'eliminazione definitiva delle specifiche cause di rischio esistenti;*
- e) *non pregiudicare le sistemazioni definitive delle aree a rischio né la realizzazione degli interventi previsti dalla pianificazione di bacino o dagli strumenti di programmazione provvisoria e urgente;*
- f) *garantire condizioni adeguate di sicurezza durante la permanenza di cantieri mobili, in modo che i lavori si svolgano senza creare, neppure temporaneamente, un significativo aumento del livello di rischio o del grado di esposizione al rischio esistente;*
- g) *limitare l'impermeabilizzazione superficiale del suolo impiegando tipologie costruttive e materiali tali da controllare la ritenzione temporanea delle acque anche attraverso adeguate reti di regimazione e di drenaggio;*
- h) *rispondere a criteri di basso impatto ambientale; è pertanto necessario, ogni qualvolta possibile, prevedere l'utilizzo di tecniche di ingegneria naturalistica di cui al D.P.G.R.C. n.574 del 22 luglio.*

Per giungere a dimostrare la compatibilità geologica delle opere di progetto e per meglio inquadrarne gli aspetti d'impatto idrogeologico salienti, in modo da poter esprimere in maniera più compiuta un giudizio sulla sua compatibilità geologica, è necessario è necessario descrivere in maniera sintetica lo stato dei luoghi del territorio in esame ed effettuare alcune considerazioni inerenti sia all'assetto territoriale, già precedentemente descritto, sia alla tipologia degli interventi che si intendono realizzare.

La caratterizzazione geomorfologica del territorio esaminato è stata effettuata individuando tutte quelle forme che consentono di caratterizzare i vari aspetti geomorfologici di un versante (rottture di pendio, solchi di erosione, terrazzi naturali e antropici, ecc.) che hanno permesso di individuare le forme denudazionali (erosionali e/o gravitative) e deposizionali, inquadrare nell'ambito del sistema crinale-versante-fondovalle, legate all'evoluzione più o meno recente del territorio nonché i processi che ne determinano il modellamento attuale.

Tale caratterizzazione ha messo in evidenza che nell'area di studio non sono presenti fenomeni d'instabilità in atto, non ci sono versanti in equilibrio precario (in terre o in roccia) che possano essere interessati da fenomeni di riattivazione o neoformazione di movimenti franosi, come pure sono assenti terreni granulari fini (sabbiosi) saturi di acqua, che possano essere sottoposti a possibili rifluimenti parziali o generalizzati, a causa dei fenomeni di liquefazione. I rilievi effettuati in campagna traggono, quindi, spiegazione dalle considerazioni sopra effettuate, e contemporaneamente le supportano come evidenze tangibili della loro coerenza.

I rilevamenti di campagna eseguiti nell'area di studio indicano che le sue condizioni geomorfologiche sono stabili, in quanto non sono emersi fattori predisponenti al dissesto, non sono state riscontrate evidenze di fenomeni franosi pregressi o in atto, nonché danni ad essi connessi.

I risultati dello studio geologico eseguito consentono di poter affermare che c'è piena compatibilità tra il progetto proposto e la caratterizzazione geomorfologica del territorio per i seguenti motivi:

- i rilevamenti di campagna eseguiti presso il sito in esame indicano che le condizioni geomorfologiche del sito sono stabili, in quanto non sono state riscontrate evidenze di fenomeni di dissesto pregressi o in atto, nonché danni ad essi connessi;
- l'area risulta sistemata da attività antropiche ed opere di regimazione delle acque superficiali funzionanti;
- in aggiunta, nella stessa area, i terreni di copertura di natura alluvionale sono disposti su una superficie pianeggiante, hanno un discreto grado di consistenza e non presentano segni di instabilità.

Tanto premesso, e volendo sintetizzare i risultati dell'analisi del progetto presentato e dello studio geologico effettuato, le opere previste per il progetto denominato "Impianto agro-fotovoltaico agro-fotovoltaico per la produzione di energia elettrica ubicato nel Comune di Castel Volturno (CE) in località Parco del Castello della potenza nominale di 14361,84 kW dotato di un sistema di accumulo dell'energia di 7200 kW, per una potenza in immissione di 12000 kW (due lotti da 6000 kW ciascuno) comprensivo delle opere di rete per la connessione dell'impianto alla rete elettrica nazionale:

- non creano disequilibri di masse lungo il versante e di conseguenza non determinano un aumento della pericolosità da frana;

- non apportano variazioni dell'attuale conformazione del pendio, né creano neosuperfici esposte ad elevata pendenza: ciò si traduce nell'eliminazione di un ben noto fattore d'innescio di eventi franosi;
- non producono condizioni di concentrazione di deflusso superficiale tali da innescare processi di erosione e denudazione che possano evolvere in reali dissesti e, nello stesso tempo, non costituiscono ostacolo ai deflussi attualmente in essere nella zona.
- non sono riscontrabili nella zona di specifico interesse evidenze di fenomeni di dissesto pregressi o in atto, nonché danni ad essi connessi.

In definitiva, i lavori di progetto non interferiranno sull'assetto idrogeologico attuale del territorio in esame risultando in linea con il dispositivo vincolistico e tecnico del Piano Stralcio dell'ex Autorità di Bacino dei fiumi Liri – Garigliano e Volturno, in quanto non peggiorano le condizioni di sicurezza attuali del territorio e di difesa del suolo, non costituiscono un fattore di aumento del rischio da dissesti di versante, non costituiscono elemento pregiudizievole all'attenuazione o all'eliminazione definitiva delle specifiche cause di rischio esistenti ed, infine, non pregiudicano eventuali interventi previsti dalla pianificazione di bacino o dagli strumenti di programmazione provvisoria e urgente.

Il processo di verifica, valutazione e stima della compatibilità geologica dell'intervento, ripercorso in queste pagine, ha portato a stabilire che essa è, appunto verificata, stimata e valutata rispetto allo stato attuale, in quanto non si sono ravvisati condizioni geologiche tali da compromettere la realizzabilità dei lavori di progetto.

A valle del presente studio, viste le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche delle aree esaminate, e per i motivi fin qui considerati, si può affermare che le opere necessarie per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico previsto in località Parco del Castello del Comune di Castel Volturno (CE) risultano compatibili con la caratterizzazione geomorfologica del territorio interessato.

13. Considerazioni conclusive

Il presente studio eseguito su incarico ricevuto dalla soc. **NEXTPOWER DEVELOPMENT ITALIA S.r.l.**, con sede in Milano alla Via San Marco n°21 – P.IVA 11091860962, ha avuto lo scopo di illustrare considerazioni di carattere geologico, geotecnico e sismico (DPR 328/01, art. 41; D.M. 17/01/2018, 3.2.2, 6.2.2;) per il progetto denominato "Impianto agro-fotovoltaico agro-fotovoltaico per la produzione di energia elettrica ubicato nel Comune di Castel Volturno (CE) in località Parco del Castello della potenza nominale di 14361,84 kW dotato di un sistema di accumulo dell'energia di 7200 kW, per una potenza in immissione di 12000 kW (due lotti da 6000 kW ciascuno) comprensivo delle opere di rete per la connessione dell'impianto alla rete elettrica nazionale".

Per quanto riguarda gli aspetti tecnici il presente studio geologico è stato redatto secondo le disposizioni della L.R. 9/83 "Norme per l'esercizio delle funzioni regionali in materia di difesa del territorio dal rischio sismico", nonché in accordo con quanto previsto dalle normative in materia di rischio sismico (D.G.R. 5447/02 "Aggiornamento della classificazione sismica dei comuni della Regione Campania", O.P.C.M. n. 3274/03 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"; D.M. 17.01.2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni") e con le disposizioni del D.M. 11.03.88.

In aggiunta, la presente relazione geologica è stata redatta anche secondo le disposizioni delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PSAI) predisposto dall'ex Autorità di Bacino dei fiumi Liri – Garigliano e Volturno, oggi Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale, adottato dal Comitato Istituzionale con Delibera n.1 del 23/02/2015 (B.U.R.C. n.20 del 23/03/2015) a seguito dei lavori della Conferenza Programmatica alla quale hanno partecipato i Comuni e le Province interessate, ai sensi della normativa vigente in materia, ed in particolare in conformità dei "Criteri per la redazione dello studio di compatibilità geologica nelle aree a rischio da frana (art. 36 N.d.A.)" descritti nell'allegato "B" delle citate norme.

Per la ricostruzione del modello geologico, geotecnico e sismico del sito di specifico interesse, è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche in sito consistente nella realizzazione di n°3 prove penetrometriche statiche del tipo CPT, n°2 prove penetrometriche dinamiche continue e n°2 prospezioni sismiche M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves ovvero Analisi Multicanale delle onde Superficiali di Rayleigh*).

Ad integrazione delle suddette indagini sono state prese in considerazione anche le indagini geognostiche realizzate dal Comune di Castel Volturno per la redazione del P.U.C. su terreni simili ed appartenenti alle stesse formazioni geologiche dell'area di studio, consistenti in sondaggi a carotaggio continuo per la ricostruzione della stratigrafia della zona, prove S.P.T. in foro di sondaggio e prove di laboratorio per la determinazione dei parametri geotecnici dei terreni.

Tali attività hanno permesso di ricostruire il modello geologico del sito di studio e, nel contempo, di ricavare i principali parametri dei terreni del sottosuolo di interesse geotecnico, al fine di conoscerne e studiarne il comportamento in relazione alle caratteristiche strutturali e dimensionali dell'opera di progetto.

Nel corso dello studio si è seguito un metodo multicriterio, che ha integrato differenti risultati di analisi provenienti da diverse aree tecnico-applicative, tra le quali:

- geologia, mediante la caratterizzazione dell'assetto stratigrafico e strutturale, della litologia e della geomorfologia del sito di studio;
- geofisica, con l'individuazione dei sismostrati presenti mediante prospezioni geofisiche;
- geotecnica, attraverso la caratterizzazione meccanica dei terreni sulla base delle indagini appositamente realizzate per la redazione del presente studio;
- sismicità storica, tramite la consultazione della documentazione riportante la presenza di situazioni di danno prodotte da terremoti del passato e quindi indicative di particolari incrementi dell'azione sismica.

Lo studio geologico eseguito si è basato su conoscenze bibliografiche e su dati specifici ricavati mediante indagini dirette in sito e di laboratorio, come ampiamente riferito nei paragrafi precedenti e negli appositi elaborati allegati; esso descrive le varie formazioni geologiche presenti nel sito, illustra e caratterizza compiutamente gli aspetti stratigrafico-strutturali, idrogeologici, geomorfologici e fisico-meccanici dei terreni del sottosuolo in esame.

E' stato accertato che il sottosuolo è costituito da terreni di natura alluvionale a granulometria prevalentemente argillosa fino alla profondità di almeno 20,0 m. La falda idrica è ubicata ad una profondità di circa 2,20 metri dal piano campagna. Inoltre, relativamente a un'area di ampiezza significativa rispetto all'ubicazione dei siti in esame si è rilevata l'insussistenza di fenomeni franosi in atto.

L'acquisizione e l'elaborazione dei dati disponibili ha consentito di individuare le condizioni geomorfologiche, idrogeologiche, stratigrafiche, geotecniche e sismiche dell'area, le cui risultanze possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- Topograficamente la zona in esame si sviluppa ad una quota media di circa 2,5 m s.l.m. su un'area pianeggiante posta nel settore nord-ovest del territorio comunale, in destra orografica del Fiume Volturno, a sud del Canale Agnena e a nord del Canale Vena Grande. L'area di impianto e le opere connesse ricadono in Zona E - area agricola e dell'edilizia diffusa esistente. L'impianto fotovoltaico sarà realizzato in località Parco del Castello su un lotto di terreno avente una superficie di circa 19,5 ha e riportato in catasto al Foglio n°3 con particella n°5005.

- Il sottosuolo della zona in esame fino alla profondità di 30,0 m (*stratigrafia sondaggio geognostico S10 realizzato per il PUC del Comune di Castel Volturno*) è costituito dai terreni di seguito descritti:
 - 0,00 ÷ 0,30 m: Argilla marrone moderatamente consistente.
 - 0,30 ÷ 1,50 m: Limo con argilla marrone alterato consistente.
 - 1,50 ÷ 3,00 m: Argilla con limo marrone poco consistente.
 - 3,00 ÷ 4,00 m: Limo con sabbia argilloso, grigio-verde avana moderatamente consistente. Frazione sabbiosa costituita da elementi lapidei e/o pomicei arrotondati.
 - 4,00 ÷ 5,00 m: Argilla grigio scura da moderatamente consistente a consistente.
 - 5,00 ÷ 5,50 m: Argilla limosa debolmente sabbiosa grigio-marrone poco consistente con inclusi elementi pomicei da subangolari a subarrotondati.
 - 5,50 ÷ 5,90 m: Limo debolmente sabbioso marrone poco consistente.
 - 5,90 ÷ 6,20 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa marrone moderatamente consistente.
 - 6,20 ÷ 7,00 m: Argilla sabbiosa grigio-verdastra poco consistente.
 - 7,00 ÷ 8,00 m: Argilla debolmente limosa grigio-verdastra consistente con inclusi elementi pomicei e rari livelli centimetrici di argilla torbosa.
 - 8,00 ÷ 8,50 m: Argilla debolmente sabbiosa marrone da poco consistente a moderatamente consistente.
 - 8,50 ÷ 9,20 m: Argilla sabbiosa grigio-plumbea poco consistente.
 - 9,20 ÷ 11,4 m: Argilla grigio-plumbea consistente con inclusi elementi pomicei, a letto marrone con livello torboso e abbondanti frammenti di gusci di gasteropodi.
 - 11,4 ÷ 12,2 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa marrone da poco consistente a moderatamente consistente con abbondanti gusci di molluschi e a letto resti vegetali lignei.
 - 12,2 ÷ 12,5 m: Argilla debolmente sabbiosa debolmente limosa grigia poco consistente.
 - 12,5 ÷ 15,0 m: Argilla grigio-bluastro moderatamente consistente con abbondanti gusci di molluschi.
 - 15,0 ÷ 17,4 m: Argilla avana poco consistente con inclusi resti di gusci di lamellibranchi e resti vegetali lignei.
 - 17,4 ÷ 17,6 m: Argilla torbosa grigio scura poco consistente con inclusi abbondanti resti vegetali lignei.

- 17,6 ÷ 20,0 m: Argilla con sabbia ghiaiosa nero-rossastra poco consistente; frazione ghiaiosa costituita da scorie subangolari (max 4 cm).
 - 20,0 ÷ 21,0 m: Sabbia ghiaiosa debolmente limosa rossastra addensata; frazione ghiaiosa costituita da scorie subangolari (max 3 cm).
 - 21,0 ÷ 25,6 m: Sabbia ghiaiosa debolmente limosa nera addensata, al letto diventa debolmente argillosa; frazione ghiaiosa costituita da litici scoriacei subangolari (max 4 cm) e rare pomice verdastre millimetriche.
 - 25,6 ÷ 26,4 m: Argilla limosa grigio-verdastra estremamente consistente.
 - 26,4 ÷ 28,9 m: Argilla limosa giallo-avana alterata poco cementata con inclusi abbondanti elementi pomicei millimetrici biancastri.
 - 28,9 ÷ 29,5 m: Sabbia fine limosa grigio-avana addensata.
 - 29,5 ÷ 30,0 m: Argilla con sabbia grigio-avana poco consistente con inclusi rari elementi pomicei.
 - 30,0 ÷ 31,0 m: Sabbia grigio-scura da sciolta a poco addensata, a luoghi limosa.
- I dati scaturiti dal rilevamento geologico di campagna e dall'insieme delle indagini eseguite in sito e dall'analisi di quelle disponibili per l'area di studio, previo opportune elaborazioni ed interpretazioni, hanno consentito di conoscere il modello geologico del sito in esame e di caratterizzare dal punto di vista fisico-meccanico e dinamico i terreni della porzione di sottosuolo di interesse geotecnico. Le unità litotecniche determinate sono le seguenti:

Unità litotecnica A – Spessore medio 2,80 m

- Argilla da poco a moderatamente consistente e limo con argilla alterato.

Unità litotecnica B – Spessore medio 1,30 m

- Argilla con limo sabbioso consistente inglobante elementi lapidei e/o pomicei.

Unità litotecnica C – Spessore medio 3,40 m

- Argilla moderatamente consistente a luoghi debolmente sabbiosa con livelli di limo debolmente sabbioso poco consistente.

Unità litotecnica D – Spessore medio 7,50 m

- Argilla debolmente sabbiosa da poco consistente a moderatamente consistente con inclusi elementi pomicei e livelli di argilla torbosa.

- La caratterizzazione fisico-meccanica media dei terreni nell'ambito del volume significativo, dove per volume significativo di terreno si intende la parte di sottosuolo influenzata (direttamente o indirettamente) dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso, è di seguito riportata:

Unità litotecnica A

– Numero dei colpi N_{SPT}	= 2
– Resistenza alla punta Q_c	= 12,06 Kg/cmq
– Resistenza laterale f_s	= 0,38 Kg/cmq
– Densità relativa	= 23,53%
– Peso unità di volume	= 1,65 t/mc
– Peso di volume saturo	= 1,86 t/mc
– Angolo di attrito	= 26°
– Coesione drenata	= 0,18 Kg/cmq
– Coesione non drenata	= 0,47 Kg/cmq
– Modulo elastico	= 24 Kg/cmq
– Modulo edometrico	= 33 Kg/cmq
– Velocità onde di taglio	= 143 m/s

Unità litotecnica B

– Numero dei colpi N_{SPT}	= 13
– Resistenza alla punta Q_c	= 49 Kg/cmq
– Resistenza laterale f_s	= 2,49 Kg/cmq
– Densità relativa	= 58,83%
– Peso unità di volume	= 1,84 t/mc
– Peso di volume saturo	= 1,91 t/mc
– Angolo di attrito	= 31°
– Coesione drenata	= 0,23 Kg/cmq
– Coesione non drenata	= 2,21 Kg/cmq
– Modulo elastico	= 120 Kg/cmq
– Modulo edometrico	= 140 Kg/cmq
– Velocità onde di taglio	= 150 m/s

Unità litotecnica C

- Numero dei colpi N_{SPT} = 4
- Resistenza alla punta Q_c = 12,58 Kg/cm²
- Resistenza laterale f_s = 0,54 Kg/cm²
- Densità relativa = 28,01%
- Peso unità di volume = 1,67 t/m³
- Peso di volume saturo = 1,87 t/m³
- Angolo di attrito = 26°
- Coesione drenata = 0,18 Kg/cm²
- Coesione non drenata = 0,55 Kg/cm²
- Modulo elastico = 36 Kg/cm²
- Modulo edometrico = 37 Kg/cm²
- Velocità onde di taglio = 165 m/s

Unità litotecnica D

- Numero dei colpi N_{SPT} = 10
- Resistenza alla punta Q_c = 8,71 Kg/cm²
- Resistenza laterale f_s = 0,51 Kg/cm²
- Densità relativa = 40,77%
- Peso unità di volume = 1,70 t/m³
- Peso di volume saturo = 1,80 t/m³
- Angolo di attrito = 24°
- Coesione drenata = 0,16 Kg/cm²
- Coesione non drenata = 0,56 Kg/cm²
- Modulo elastico = 67 Kg/cm²
- Modulo edometrico = 45 Kg/cm²
- Velocità onde di taglio = 170 m/s

- Dalle prospezioni sismiche M.A.S.W. eseguite nell'area di studio si sono individuati diversi sismostrati caratterizzati dai seguenti valori delle velocità delle onde di taglio:

M.A.S.W. 1	Profondità (m)	Spessore (m)	V_s finale (m/s)	Falda
S1	0,00 – 3,50	3,50	120	Presente
S2	3,50 – 8,10	4,60	161	Presente
S3	8,10 – 14,40	6,30	168	Presente
S4	14,40 – 21,90	7,50	173	Presente
S5	21,90 – 30,20	8,30	179	Presente

<i>M.A.S.W. 2</i>	<i>Profondità (m)</i>	<i>Spessore (m)</i>	<i>Vs finale (m/s)</i>	<i>Falda</i>
S1	0,00 – 2,50	2,50	167	Presente
S2	2,50 – 8,10	5,60	170	Presente
S3	8,10 – 14,30	6,20	173	Presente
S4	14,30 – 22,20	7,90	177	Presente
S5	22,20 – 30,30	8,10	180	Presente

- I valori delle velocità delle onde di taglio ricavati dalle prospezioni sismiche M.A.S.W. in località Parco del Castello nel Comune di Castel Volturno hanno evidenziato che il sito rientra nella categoria di sottosuolo **D** – *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s, avendo determinato una velocità media delle onde di taglio Vs entro i 30,0 metri di profondità compresa tra **163 m/s** e **174 m/s**.*
- In merito all'amplificazione stratigrafica, avendo determinato una categoria di suolo **D**, il coefficiente di amplificazione stratigrafica **Ss** assume il valore di **1,800**.
- Relativamente all'amplificazione topografica, il sito ubicato in località Parco del Castello nel Comune di Castel Volturno (CE) è posto alla quota media di 2,5 m s.l.m. su una superficie pianeggiante. Per tale motivo esso rientra nella categoria topografica **T1**, a cui corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica **S_T** pari a **1,00**.
- L'obiettivo generale dell'analisi di microzonazione è stato quello di caratterizzare in maniera qualitativa e quantitativa le modificazioni locali dello scuotimento sismico e gli effetti cosismici del territorio analizzato. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto le risultanze dello studio eseguito non hanno messo in evidenza particolari effetti di instabilità che possano derivare da fenomeni cosismici, in quanto non sono state riscontrate condizioni tali da favorire fenomeni di instabilità per il raggiungimento della resistenza al taglio disponibile del terreno. Ciò è confermato dal fatto che nelle aree esaminate non ci sono versanti in equilibrio precario (in terre o in roccia) che possano essere interessati da fenomeni di riattivazione o neoformazione di movimenti franosi (crolli, scivolamenti rotazionali e/o traslazionali e colamenti), per i quali il sisma rappresenta un fattore d'innesco del movimento, sia direttamente a causa dell'accelerazione esercitata sul suolo che indirettamente a causa della repentina modifica delle pressioni interstiziali. Nello stesso tempo, sono assenti terreni particolarmente scadenti dal punto di vista delle proprietà fisico-meccaniche e per terreni granulari fini (sabbiosi), saturi d'acqua, che possano essere sottoposti a possibili rifluimenti parziali o generalizzati, a causa dei fenomeni di liquefazione.

- Le opere previste per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico non interferiscono sull'assetto idrogeologico attuale del territorio in esame risultando pienamente in linea con il dispositivo vincolistico e tecnico del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico varato dall'ex Autorità di Bacino dei fiumi Liri – Garigliano e Volturno, in quanto non peggiorano le condizioni di sicurezza attuali del territorio e di difesa del suolo, non costituiscono un fattore di aumento del rischio da dissesti di versante, non costituiscono elemento pregiudizievole all'attenuazione o all'eliminazione definitiva delle specifiche cause di rischio esistenti ed, infine, non pregiudicano eventuali interventi previsti dalla pianificazione di bacino o dagli strumenti di programmazione provvisoria e urgente.
- Le conoscenze geologiche acquisite nel corso dello studio eseguito consentono di affermare che le aree che saranno interessate dal progetto dell'impianto agrivoltaico rientrano in un territorio che per le sue generali condizioni risulta idoneo ad accogliere i lavori di proposti, in quanto gli stessi non appaiono in contrasto con i dettami, i requisiti e gli scopi del Piano Stralcio varato dalla citata Autorità di Bacino, non apportando incrementi della pericolosità idrogeologica in termini di dissesti di versante, e rientrando a tutti gli effetti tra gli interventi adottabili coerentemente con quanto disposto dalle Norme di Attuazione e Prescrizioni di Piano.

Tutte queste considerazioni, associate alle conoscenze geologiche acquisite nel corso dello studio di dettaglio eseguito, consentono di affermare che l'area in esame rientra in un territorio che per le sue generali condizioni risulta idoneo ad accogliere i lavori di progetto, che verranno messi in atto adottando tutti gli accorgimenti necessari per garantire la funzionalità e la sicurezza delle opere.

Ritenendo di aver assolto al mandato conferito si rassegna la presente relazione al Committente in n°2 copie.

Mercato San Severino, Gennaio 2022

Il Geologo
dott. Mattia Lettieri

Il Geologo
dott. Antonio Viggiano

Allegati alla relazione fuori testo:

- *Tavola D6.1: Planimetrie di inquadramento territoriale e zonizzazione PUC. Scale varie*
- *Tavola D6.2: Carta Tecnica Numerica Regionale. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.3: Carta geolitologica. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.4: Carta geomorfologica e della stabilità. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.5: Carta idrogeologica. Scala 1:2.000*
- *Tavola D6.6: Carte del Piano di tutela delle acque Regione Campania. Scala 1:50.000*
- *Tavola D6.7: Carte dell'ex Autorità di bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.8: Carta di ubicazione delle indagini eseguite in sito e di quelle del PUC. Scala 1:5.000*
- *Tavola D6.9: Carta di ubicazione delle indagini in sito ed elaborato fotografico. Scala 1:1.000*
- *Tavola D6.10: Carta della zonazione sismica e della categoria di sottosuolo scala 1:2.000*
- *Tavola D6.11: Sezioni di correlazione litostratigrafica e litotecnica. Scala 1:100/1:1.000*
- *Tavola D6.12: Fascicolo delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite in sito e disponibili*
 - ✓ *Certificati delle prove penetrometriche statiche C.P.T.*
 - ✓ *Rapporto delle prove penetrometriche statiche C.P.T.*
 - ✓ *Certificati delle prove geotecniche di laboratorio*
 - ✓ *Rapporto delle prove penetrometriche dinamiche continue*
 - ✓ *Indagini disponibili realizzate per il PUC di Castel Volturno*