



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



CITTA' DI PORTO TORRES

COMUNE DI PORTO TORRES
Provincia di Sassari

ONRR-M4 C1 - Componente 1 Investimento 3.3
«Piano di sicurezza e qualificazione delle scuole» - Intervento di sostituzione edilizia

SCUOLA MEDIA ANNA FRANK DI VIA ENNIO PORRINO

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

ELABORATO

**PFTE
GEO_5**

relazione geologica

REDATTO DA: Maria Francesca Lobina



Dott.ssa Maria Francesca Lobina
geologo

Via Lorenzo il Magnifico n. 7
09134 Cagliari (Italy)
Tel./Fax +39 0706499009
Mobile +39 3283424137
e-mail: lobina.francesca@fiscali.it
lobina.francesca@pec.epap.it

GEOLOGO

Dott.ssa Maria Francesca Lobina



Maria Francesca Lobina

GRUPPO DI LAVORO

*Dott.ssa Geol. Maria Francesca Lobina
Dott. Geol. Mauro Pompei
Dott.ssa Geol. Giorgia La Ruffa
Dott. Geol. Roberto Lovico*

REVISIONI	DATA		DESCRIZIONE
	00	27.01.2023	Prima emissione
	01		
	02		
	03		
	04		

COMMITTENTE

*Comune di Porto Torres
Area lavori pubblici, manutenzione e verde pubblico
Piazza Uberto I*

SOMMARIO

1. GENERALITÀ	1
1.1. Premessa	1
1.2. Richiami normativi	1
1.3. Inquadramento geografico e territoriale	2
2. MODELLAZIONE GEOLOGICA	8
2.1. Inquadramento geologico dell'area vasta	8
2.2. Assetto strutturale e tettonico	9
2.3. Assetto litostratigrafico locale	11
2.4. Stratigrafia dei terreni di fondazione	14
2.5. Assetto geomorfologico	15
2.6. Assetto idrogeologico	16
2.1. Assetto idrografico	17
2.2. Sismicità dell'area	19
2.3. Sismicità storica	20
2.4. Classificazione sismica	22
2.5. Categoria di sottosuolo	25
3. PERICOLOSITÀ GEOLOGICA	27
3.1. Pericolosità idrogeologica	27
3.2. Subsidenza	27
3.3. Pericolosità idraulica	27
3.4. Pericolosità da frana	27
4. PROGRAMMA SOMMARIO DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE	28
5. CONCLUSIONI	29

APPENDICE

- report sull'indagine sismica

RELAZIONE GEOLOGICA



PNRR-M4 C1 - Componente 1 Investimento 3.3 «Piano di sicurezza e qualificazione delle scuole» - Intervento di sostituzione edilizia

Scuola media Anna Frank di Via Ennio Porrino
in Comune di Porto Torres (Provincia di Sassari)

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA

PROGETTAZIONE Ing. Michele Cherchi

GEOLOGO Dott. Maria Francesca Lobina

QUESTO DOCUMENTO È PREDISPOSTO
PER LA STAMPA FRONTE / RETRO



Dott.ssa Maria Francesca Lobina
geologo

TUTTI I DIRITTI RISERVATI
IL PRESENTE ELABORATO È DESTINATO ESCLUSIVAMENTE
ALLE ATTIVITÀ DI PROGETTAZIONE IN OGGETTO PER IL COMMITTENTE
È VIETATO QUALSIASI UTILIZZO ANCHE PARZIALE PER SCOPI DIFFERENTI O DA PARTE DI ALTRI,
SENZA IL CONSENSO SCRITTO DELL'AUTORE

1. GENERALITÀ

1.1. Premessa

L'Amministrazione Comunale di Porto Torres intende avvalersi delle opportunità di finanziamento consentite dal PNRR M4 C1 – Componente 1 Investimento 3.3 «Piano di sicurezza e qualificazione delle scuole» - Intervento di sostituzione edilizia per la «**Realizzazione del nuovo edificio della scuola “Anna Frank”**» nella Via Ennio Porrino in luogo del fabbricato esistente che verrà completamente demolito per fare posto al nuovo plesso scolastico.

La progettazione e la relativa direzione dei lavori è stata affidata all'Ing. *MICHELE CHERCHI* mentre lo scrivente geologo *Dott.ssa MARIA FRANCESCA LOBINA⁽¹⁾*, in obbligo ai disposti di cui alle «*Norme Tecniche Costruzioni 2018*» di cui al D.M. 17.01.2018 e relativa Circolare N. 7 del 21.01.2019 punto 5.1 del capitolo c10.1 e al «*Codice dei contratti pubblici*» di cui al D.P.R. 207/2010 artt. 19, 26 e 35, è stato incaricato dalla medesima amministrazione comunale – previa aggiudicazione di gara su piattaforma telematica⁽²⁾ – per l'esecuzione degli studi geologici di supporto.

Nella presente fase di **Fattibilità tecnica ed economica** le considerazioni di seguito esposte hanno come base informativa i dati provenienti da rilievi diretti all'uopo eseguiti nell'area di intervento e di un suo adeguato intorno, oltreché dalla miscellanea e cartografia geotematica regionale. Inoltre, per quanto attiene gli aspetti sismici, è stata condotta una prospezione sismica a rifrazione di tipo MASW con la quale determinare il parametro delle velocità di taglio equivalenti (V_{sh}) funzionale allo studio sulla risposta sismica locale della struttura in progetto ai sensi del paragrafo 3.2 del D.M. 17.01.2018 «*Norme tecniche per le costruzioni*».

Sono stati così analizzati, con il dettaglio consentito dalla fase progettuale in essere, gli aspetti litologici, morfologici, geologici ed idrogeologici interagenti con l'opera in progetto, al fine di individuare eventuali criticità e predisporre il programma di indagini più consono in relazione alla natura dell'intervento e dell'assetto geologico s.l. dei luoghi.

1.2. Richiami normativi

La normativa vigente in materia a cui si è fatto riferimento per lo svolgimento degli studi e la compilazione del presente documento tecnico è la seguente:

- Circolare C.S. LL.PP. n. 7 del 21.01.2019 «Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni» di cui al D.M. 17.01.2018»;
- D.M. 17.01.2018 «Aggiornamento *Norme Tecniche per le Costruzioni*»;
- Circolare C.S. LL.PP. n. 617 del 02.02.2009 «Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008»;
- D.M. 14.01.2008 «*Norme Tecniche per le Costruzioni*»;
- Ordinanza P.C.M. n. 3519 del 28.04.2006 «*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*»;
- Ordinanza PCM n. 3316 del 02.10.2003 «*Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri*»;
- Ordinanza PCM n. 3274 del 20.03.2003 «*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica*»;

⁽¹⁾ Albo Geologi della Regione Sardegna N. 222 – Sezione A.

⁽²⁾ Aggiudicazione RdO 407406 su Sardegna CAT.

- D.M. LL.PP.11.03.1988 «*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*» e relativa Circ. Min. LL.PP. n. 30483 del 24.09.1988;
- Circ. Min. LL.PP. n. 30483 del 24.09.1988 che prevede l'obbligo di sottoporre tutte le opere civili pubbliche e private da realizzare nel territorio della Repubblica, alle verifiche per garantire la sicurezza e la funzionalità del complesso opere-terreni ed assicurare la stabilità complessiva del territorio nel quale si inseriscono;
- Legge n. 464 del 04.08.1984 «*Norme per agevolare l'acquisizione da parte del servizio geologico della direzione generale delle miniere del Ministero dell'Industria, del commercio e dell'artigianato di elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale*»;
- Legge n. 64 del 02.02.1974 «*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*» che prevede l'obbligatorietà dell'applicazione per tutte le opere, pubbliche e private, delle norme tecniche che saranno fissate con successivi decreti del Ministero per il Lavori Pubblici»;
- A.G.I. 1977 «*Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*»;
- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) adottato dalla Giunta Regionale con D.G.R. n. 54/33 del 30.12.2004 e reso esecutivo con Decreto Assessoriale n. 3 del 21.02.2005 con pubblicazione nel BURAS n. 8 dell'11.03.2005;
- Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (P.S.F.F.) approvato con Delibera n. 1 del 20.06.2013 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino della Regione Sardegna;
- Norme di Attuazione del P.A.I. (aggiornamento al Decreto del Presidente della R.A.S. n. 35 del 21.03.2008);
- D. Lgs. n. 50 del 08.04.2016, «*Nuovo Codice degli Appalti - Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture*» e ss.mm.ii.;
- D.P.R. n. 207 del 05.10.2010 - Regolamento di esecuzione ed attuazione del D.Lgs. 12.04.2006, n. 163 «*Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE*» e ss.mm.ii..

1.3. Inquadramento geografico e territoriale

L'edificio scolastico in parola ricade nel nord Sardegna, regione Nurra nell'entroterra del Golfo dell'Asinara in Provincia di Sassari) e più specificatamente nella periferia sud-occidentale dell'abitato di Porto Torres, a circa 2 km dal centro storico e dal porto turistico ed industriale.

Più precisamente ricade nell'areale compreso tra la Via Ennio Porrino (ove si apre l'ingresso), la Via Vincenzo Guarino e la Via Via Pierluigi da Palestrina che si sviluppa parallela alla Via dell'Industria,

La quota assoluta media del sito di intervento è di 14 m s.l.m.

I riferimenti cartografici sono rappresentati da:

- Foglio 441 "PORTO TORRES" dell'I.G.M.I. [scala 1:50.000]
- Sezione 441-III "PORTO TORRES" dell'I.G.M.I. [scala 1:25.000]
- Sezione 441-130 "PORTO TORRES" della C.T.R. [scala 1:10.000]

Le coordinate Gauss Boaga del baricentro dell'opera sono:

4.520.000 N 1.499.556 E



FIGURA 1.1 – Panoramiche dell'edificio scolastico esistente visto dalla Via Ennio Porrino.



FIGURA 1.2 – Ubicazione del plesso scolastico esistente su immagini estratte da Google Earth, acquisizione luglio 2022.

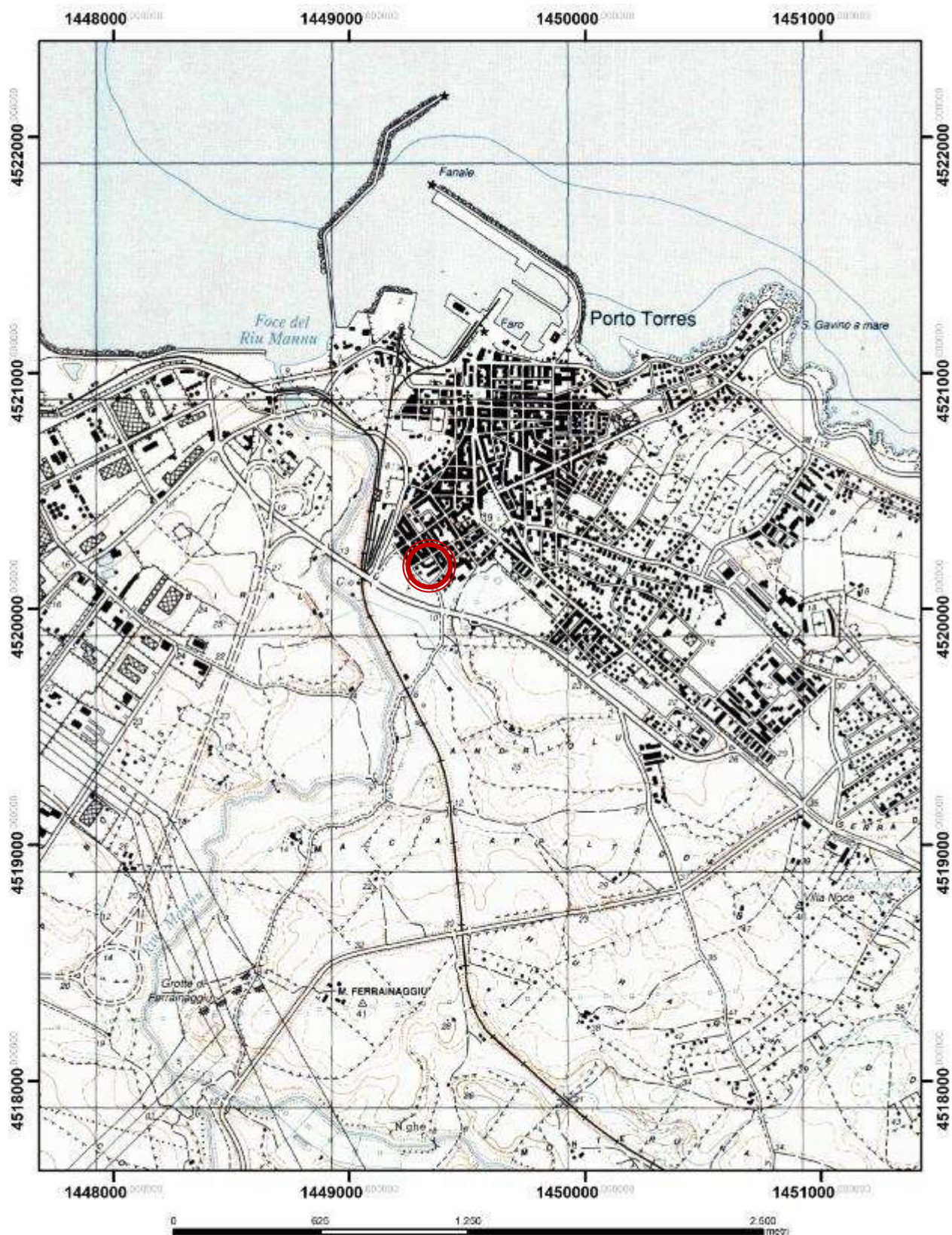


FIGURA 1.3 – Ubicazione del plesso scolastico su stralcio cartografia I.G.M.I. in scala 1: 25.000.

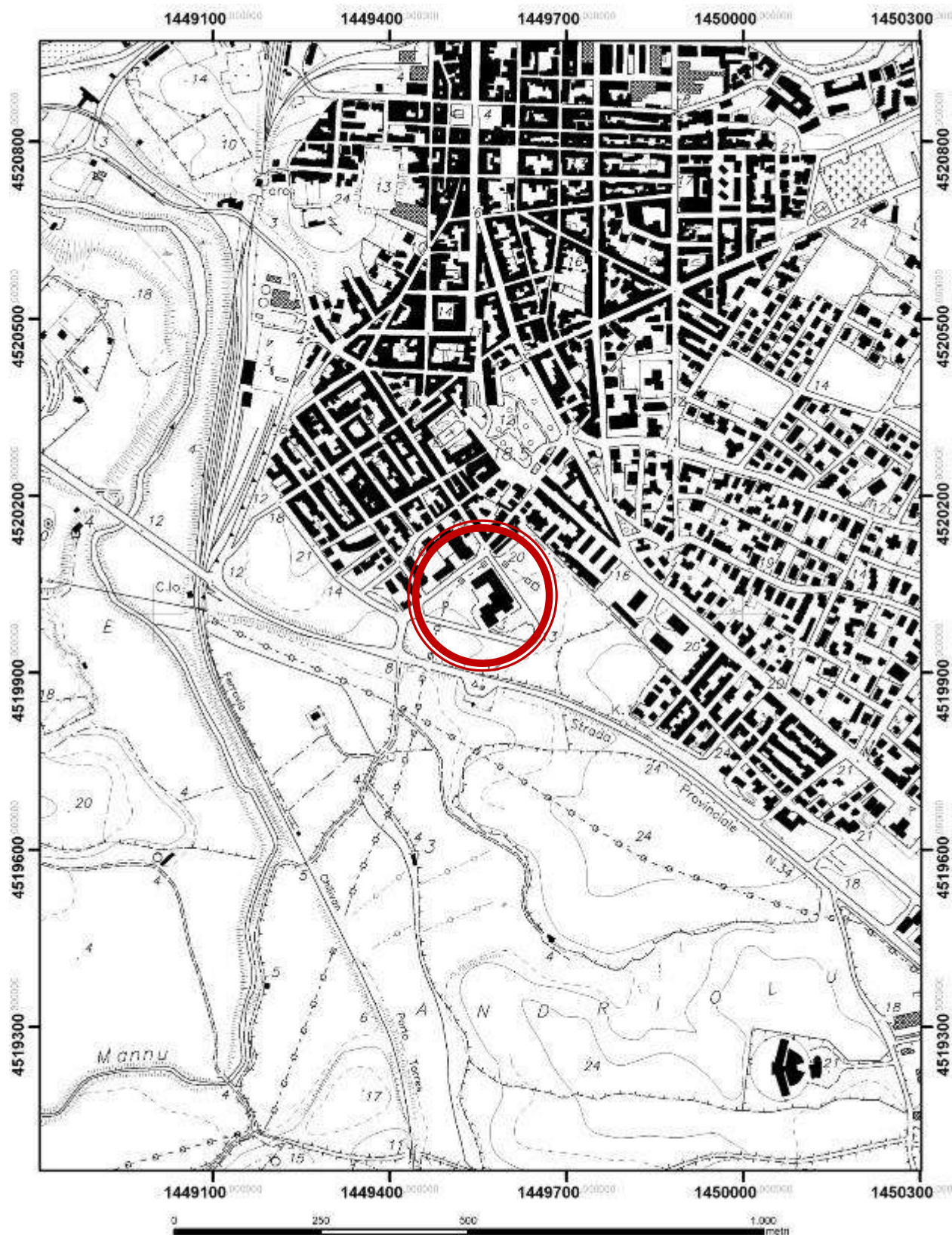


FIGURA 1.4 – Ubicazione del plesso scolastico su stralcio cartografia C.T.R. in scala 1: 10.000.



FIGURA 1.5 – Ubicazione del plesso scolastico su immagine ortofotogrammetrica in scala 1: 10.000.

2. MODELLAZIONE GEOLOGICA

2.1. Inquadramento geologico dell'area vasta

Il territorio di Porto Torres si sviluppa sul margine occidentale di un semi-graben di età terziaria noto in letteratura come “Bacino di Porto Torres” (Thomas & Gennesseaux, 1986), colmato da vulcaniti e sedimenti di ambiente marino depositatisi tra l'Oligocene superiore ed il Miocene superiore. Questa importante struttura tettonica è delimitata ad ovest dalle formazioni paleozoiche e dalle coperture mesozoiche della Nurra, mentre sul lato orientale prevalgono i sedimenti marini miocenici: detta conformazione è il risultato di una fase tettonica disgiuntiva attiva durante il Terziario che ha dato luogo all'apertura di un bacino subsidente con geometria a semigraben che si approfondisce verso ovest, successivamente colmato da sedimenti marini e continentali terziari.

Il settore geografico in studio, nel quale è ubicato il sito di specifica iniziativa edilizia, si colloca sul margine occidentale di questa struttura ove affiorano le formazioni più antiche sulle quali si è strutturato il bacino terziario, rappresentate da formazioni mesozoiche e specificatamente da depositi di ambiente continentale del Triassico inferiore (Bundsandstein) sino a sedimenti marini di piattaforma in facies carbonatica del Cretacico superiore (gli stessi molto diffusi nella Nurra orientale e soprattutto in quella meridionale con spettacolari esposizioni lungo le falesie di Capo Caccia (Alghero).

Tutta la sequenza mesozoica è interessata da un blando piegamento con ad asse ENE che determina un sistema di sinclinali e anticlinali aperte, a loro volta intersecate da faglie distensive dirette N 60° o NS. Le giaciture prevalenti sono sub-orizzontali o con debole inclinazione verso il settore sud-orientale.

Sono distinguibili diversi litotipi che rappresentano diversi ambienti deposizionali che si sono susseguiti sia in ordine temporale, marcando un progressivo approfondimento del bacino miocenico che in senso trasversale in relazione alla reciproca collocazione all'interno del bacino stesso. Alla base la sequenza ed in prossimità del margine del bacino si ritrovano sedimenti clastici continentali caratterizzati da conglomerati, depositi di spiaggia o depositi lacustri [LMR], passanti lateralmente e verso l'alto a biocalcareni e calciruditi caratteristici di ambienti di più alta energia, seguiti ancora da sedimenti marnoso arenacei finemente stratificati che testimoniano l'istaurarsi di un ambiente di mare più profondo. I termini più recenti affiorano tra la zona industriale e Fiume Santo e sono rappresentati da argille e conglomerati di ambiente alluvionale.

Le litologie più rappresentative nell'ambito di intervento sono i calcari organogeni e le calcareniti [RESa] e la sequenza di arenarie e conglomerati a cemento carbonatico con intercalazioni di depositi sabbioso-arenacei [RESb] che emergono sia a ridosso della zona industriale che nel settore orientale, lungo il tratto costiero. L'età di queste formazioni può essere inquadrata nel Burdigaliano superiore.

Nel settore ovest del territorio comunale, lungo una stretta fascia che separa il dominio mesozoico da quello metamorfico, predominano i sedimenti continentali di chiusura del bacino miocenico di Porto Torres, quali argille arrossate con livelli e lenti di conglomerati a ciottoli di basamento paleozoico, vulcaniti e calcari mesozoici (FORMAZIONE DI FIUME SANTO, Tortoniano - Messiniano).

La successione sedimentaria si chiude con l'insieme di coperture quaternarie in facies continentale prevalente in quanto le uniche facies di ambiente marino riferibili al Pleistocene superiore (interglaciale Riss-Wurm), sono rappresentate dai depositi litorali del TIRRENIANO AUCT. [PVM1] distribuiti irregolarmente lungo la fascia costiera turritana.

La piana costiera di Porto Torres è dominata pertanto dalle coltri alluvionali più o meno terrazzate del Pleistocene superiore [PVM2a] associate a coeve facies dunari [PVM2b] lungo l'attuale costa e dalla variegata associazione di facies oloceniche e attuali di ambiente alluvionale [bn, b], litorale [g, d], stagnale [e5].

Nei rilievi collinari le coperture sono costituite da depositi di pendio più o meno antichi (Olocene ed Attuale) perlopiù di genesi eluvio-colluviale [b2].

Nelle valli principali che ospitano i corsi d'acqua più importanti (Rio Mannu e Rio di Ottava, Fiume Santo) si individuano infine dei depositi alluvionali attuali e recenti composti in prevalenza da sabbie, limi e limi argillosi derivanti dall'erosione e dal trasporto delle litologie sedimentarie mioceniche [b].

Tra i depositi attuali si annoverano, per le importanti volumetrie, i depositi antropici costituiti da materiali di riporto legati alle attività della zona industriale di Porto Torres ed a quelle di edilizia urbana e residenziale dell'abitato [h].

Uno stralcio della cartografia geologica di inquadramento è restituito in **FIGURA 2.1**.

2.2. Assetto strutturale e tettonico

L'assetto strutturale regionale è l'eredità di eventi deformativi di varia età, varisica, mesozoica e terziaria e del loro inviluppo geometrico, in ragione dell'antichità delle successioni interessate, di cui solo le ultime sono significative nel contesto di intervento.

La tettonica mesozoica è caratterizzata da tre fasi principali:

- ⇒ distensiva mesocretacea con faglie ENE che riattivano le discontinuità tardo-varisiche e che sollevano il settore attuale NW della piattaforma carbonatica, responsabili della coeva fase continentale e della parziale erosione del Giura superiore e del Creta inferiore verso NW;
- ⇒ transpressiva con faglie trascorrenti sinistre e pieghe di direzione NNW e faglie dirette;
- ⇒ del Cretaceo terminale che rende possibile l'emersione di tutta la piattaforma mesozoica.

L'assetto strutturale del settore di interesse, come di tutta la Sardegna settentrionale è quindi contraddistinto dalla tettonica post-cretacea, caratterizzata da almeno tre sistemi di faglie principali, di probabile età oligo-aquitana, che mette in evidenza le seguenti fasi:

- ⇒ terziaria pre-vulcanica con pieghe principali N50 che fanno ammettere un accorciamento N140;
- ⇒ distensiva contemporanea all'apertura del bacino balearico nel Miocene inferiore e responsabile dello sbandamento verso NE delle principali morfostrutture;
- ⇒ pliocenica che induce il sollevamento generalizzato della Nurra attraverso faglie dirette circa N-S e riattivazione di discontinuità precedenti di varia direzione, che tendono a generare depressioni entro cui si sono conservate le vulcaniti ed i depositi terrigeni del Miocene.

L'interferenza dei tre sistemi di faglie principali ha delineato diversi bacini tettono-sedimentari, fra i quali quello di Porto Torres, di Chilivani-Berchidda e del Logudoro, formanti l'estremità settentrionale del grande rift oligo-miocenico sardo.

A partire dal Burdigaliano medio le condizioni sedimentarie e tettoniche, con la connessa attività vulcanica, cambiarono radicalmente ed il bacino di Chilivani-Berchidda subì un sollevamento tettonico rispetto a quello del Logudoro: in tali condizioni il primo divenne la zona di alimentazione di un esteso sistema alluvionale mentre nel Logudoro si depositarono i sedimenti marini.

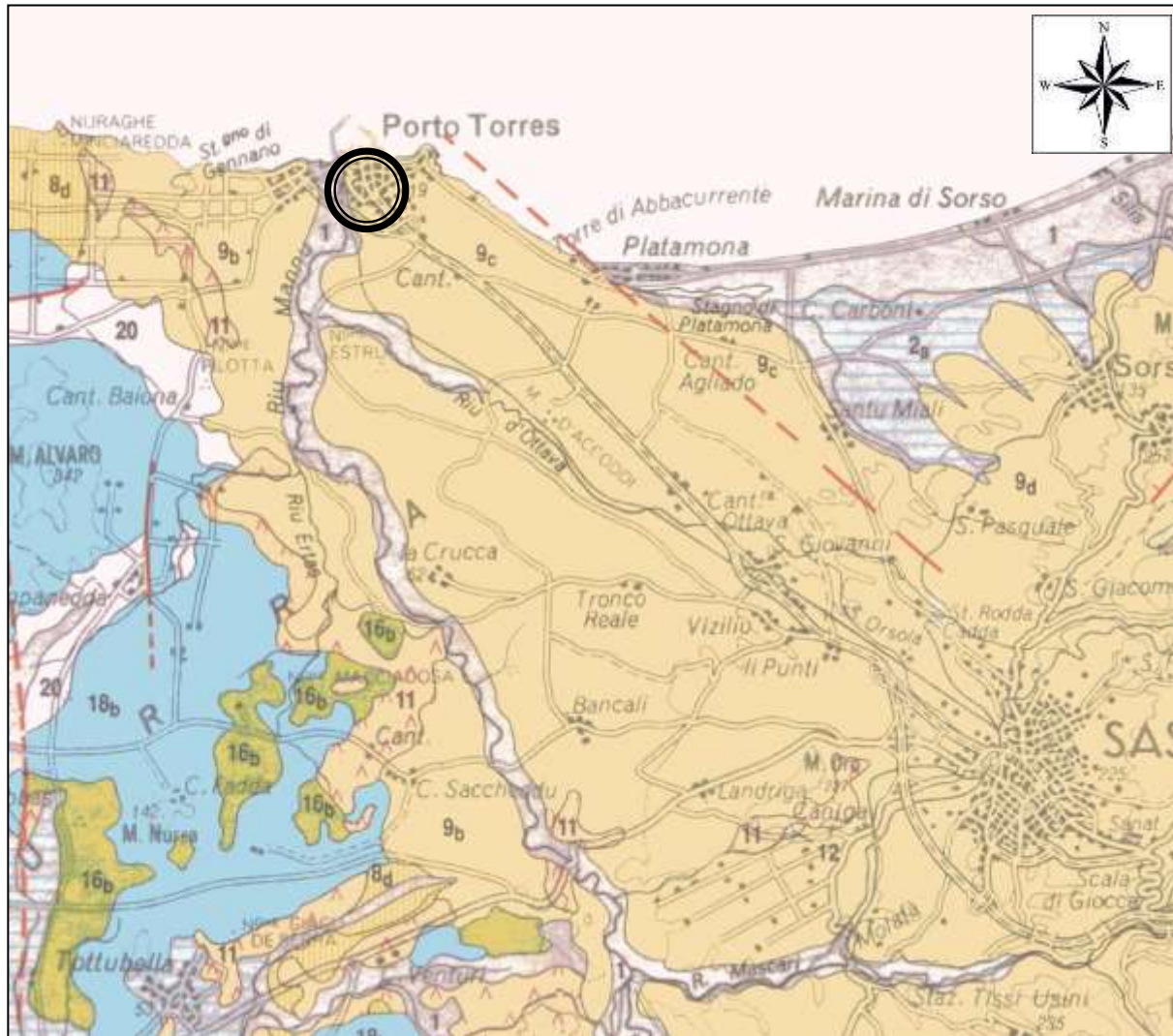


FIGURA 2.1 – Ubicazione dell'areale di intervento su stralcio "Carta Geologica della Sardegna" a cura di Coordinamento della Cartografia Geologica e Geotematica della Sardegna, modificata.

- 1] Ghiaie, sabbie, limi ed argille sabbiose dei depositi alluvionali, colluviali, eolici e litorali (Olocene).
- 8d] Conglomerati a matrice argillosa e arenarie di sistema alluvionale (Miocene superiore).
- 9b] Marne arenacee e siltose, arenarie, conglomerati (Miocene inferiore - medio).
- 9c] Marne e marne arenacee epibatiali con foraminiferi e coralli bianchi (Miocene inferiore – medio).
- 11] Rioliti, rioladiti daciti e subordinatamente comenditi in espandimenti ignimbrici, cupole di ristagno e rare colate (Oligocene superiore - Miocene inferiore – medio).
- 12] Andesiti, andesiti basaltiche e rari basalti (Oligocene superiore - Miocene inferiore).
- 16b] Depositi carbonatici di piattaforma: calcari, marne e calcareniti sublitorali, con foraminiferi bentonici, alghe, rudiste (Cretaceo superiore).
- 20] Dolomie, dolomie marnose e marne con gessi e argille ("Keuper") con palino formi, foraminiferi agglutinati, gasteropodi, brachiopodi encelenterati (Trias medio).

2.3. Assetto litostratigrafico locale

Con riferimento alla nomenclatura adottata nella Carta Geologica in scala 1:10.000 dell'APAT (Agenzia per l'Ambiente e per il Territorio) di cui uno stralcio è richiamato nella tavola fuori fascicolo a corredo (**PFTE_GEO_2**) e sulla base della base informativa in possesso, è possibile asserire con un buon grado di affidabilità, che l'area della specifica iniziativa edilizia ricade nel dominio carbonatico del Burdigaliano (Miocene medio), rappresentato dall'insieme di litofacies appartenenti alla FORMAZIONE DI MORES [**RES**] così descritte:

RESb Arenarie e conglomerati a cemento carbonatico, fossiliferi e bioturbati con intercalazioni di depositi sabbioso-arenacei quarzoso-feldspatici a grana medio-grossa, localmente ricchi in ossidi di ferro.

RESa Calcarei, calcari bioclastici fossiliferi, calcari nodulari a componente terrigena variabile, con faune a gasteropodi, ostreidi ed echinidi ("Calcari inferiori").

Di fatto nello specifico sito di intervento si prevede che il substrato geologico "autoctono" sia costituito dai soli termini calcarenitici [**RESa**].

La morfologia pianeggiante o debolmente ondulata presuppone la presenza di una copertura detritica di genesi eluvio-colluviale costituita da sabbie limo-argillose con scheletro clastico monogenico variamente disperso o talora formante dei livelli irregolari. Il colore di tale deposito, che mostra anche un discreto grado di consistenza in virtù della componente carbonatica residua che funge da blando legante, varia sulle tonalità dell'ocra e arancio sino al rosso mattone a causa della elevata presenza di ossidi di ferro.

Benché non indicata nella cartografia geologica ufficiale, dai rilievi di superficie è stato stimato per questa unità [**RESa**] uno spessore submetrico. Il passaggio alla sottostante roccia avviene gradualmente, a causa della elevata fratturazione che favorisce i fenomeni di degradazione corticale.

Non si esclude la presenza di terreni di riporto di derivazione edilizia urbanistica pregressa e attuale [**h**] in quanto trattasi di un lotto inserito in un contesto urbano fortemente antropizzato.

Schematicamente quindi la stratigrafia locale può essere ricondotta alla sovrapposizione delle seguenti unità litologiche a partire dalla più recente:

h	Depositi antropici	[Attuale]
b2	Coltri eluvio-colluviali	[Olocene]
RESa	Litofacies nella Formazione di Mores	[Burdigaliano superiore]

Di seguito descritte nelle caratteristiche salienti per gli obiettivi del presente lavoro, sulla base di quanto scaturito dai rilievi diretti e dalle informazioni desunte dalla miscellanea regionale.

h – Depositi antropici

Questa unità comprende i depositi clastici di origine antropica derivanti dagli interventi edilizi che hanno significativamente alterato l'assetto naturale dei luoghi. L'unità geotecnica in questione comprende quindi i rilevati stradali, i riporti antropici e/o rimaneggiati, frammenti a ciottoli derivanti dal rimaneggiamento delle litologie calcaree della Formazione di Mores, nonché i terreni di copertura caratterizzati da alterazione superficiale.

Questi terreni si ritrovano su tutta l'area in esame e sono costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie con ciottoli, frammenti lateritici e asfalto scarificato.

Lo spessore di questi materiali è presumibilmente di ordine metrico.



FIGURA 2.2 – Accumuli di terre di riporto al contorno del sito.

b2 – Coltri eluvio-colluviali

Depositi olocenici formati da percentuali variabili di sedimenti fini (sabbie fini e silt) mescolati a sedimenti più grossolani, in genere detriti da fini a medi, mescolati a sedimenti provenienti per degradazione fisica direttamente dal substrato. Localmente contengono suoli ad accumulo di carbonato di calcio in noduli, croste e lenti, più o meno induriti.

Lo spessore di questa coltre è generalmente inferiore al metro ma, localmente, in corrispondenza delle aree più depresse, può arrivare anche a 2,00 m. In ogni caso dovrà essere definito puntualmente in fase definitiva ed esecutiva con adeguate indagini geognostiche.

RESa – Litofacies nella Formazione di Mores

Questa unità è costituita da calcareniti e calcari organogeni di colore bianco giallastro, disposti in bancate con una giacitura sub-orizzontale, debolmente inclinata verso NE.

L'ammasso roccioso nel suo insieme si presenta molto compatto, attraversato da pochi giunti di fratturazione poco marcati, molto spaziosi e persistenti che suddividono l'ammasso roccioso in blocchi di grandi e medie dimensioni, composti in prevalenza da bioclasti tenuti assieme da un cemento carbonatico. La formazione presenta nel suo insieme un aspetto nodulare con nuclei litoidi più resistenti contornati da argille residuali di colore rossastro ed è attraversata da un reticolo di piccole cavità da dissoluzione riempite da materiale argilloso.

Il grado di alterazione è variabile: nella porzione superiore si riconosce una bancata litoide più omogenea, interessata da un'alterazione mediamente intensa e attraversata da fratture irregolari riempite da argille residuali; in quella più bassa la roccia si presenta intensamente alterata. I processi di alterazione sono riconducibili sostanzialmente a processi di decarbonatazione che riducono il grado di resistenza della roccia e processi di ossidazione con accumulo di minerali ferrosi.

Nelle immediate vicinanze dell'areale di intervento sono osservabili facies siltitiche arenacee sormontate da suoli argillosi rossastri di potenza media circa 0,30÷0,50 m. Tali livelli litoidi sono, infatti, fortemente alterati e discontinui ed intervallati, irregolarmente, con argille limose e limi sabbiosi, con consistenza delle "terre".

Lo spessore di questa unità non è valutabile con precisione, ma si stima di ordine pluridecametrico.

In riferimento alla resistenza, questi litotipi possono essere classificati al più come una roccia tenera o molto tenera, facilmente disgregabile, ma comunque con discrete/buone caratteristiche geotecniche.



FIGURA 2.4 – Particolare del detrito superficiale derivante dalla degradazione del substrato carbonatico della Formazione di Mores.



FIGURA 2.3 – Particolare del detrito superficiale derivante dalla degradazione del substrato carbonatico della Formazione di Mores.

2.4. Stratigrafia dei terreni di fondazione

Dal rilievo geologico di superficie è stata ricostruita una plausibile sequenza stratigrafica del sito di intervento, al fine di indirizzare gli orientamenti progettuali della fase preliminare in essere ed affinare la campagna di indagini geognostiche e geotecniche funzionalmente alla natura del substrato e alle conseguenti problematiche in relazione alla tipologia di opera.

Di fatto ciò che è scaturito, è la soggiacenza di un substrato litificato [**Strato LL_C**], sepolto da una copertura di spessore variabile da qualche decimetro ad oltre un metro, costituita prima da terre rimaneggiate miste a materiali di origine antropica [**Strato LL_A**], a cui seguono detriti di origine colluviale e/o eluviale [**Strato LL_B**].

Allo stato attuale delle conoscenze e per le finalità del presente lavoro, la stratigrafia del settore di intervento può essere ricondotta alla seguente successione di unità litostratigrafiche, a partire dalle più recenti:

LL_A	Terre rimaneggiate	[Attuale]
LL_B	Terre eluvio-colluviali	[Olocene]
LL_C	Substrato carbonatico	[Burdigaliano superiore]

di seguito descritte nelle loro caratteristiche salienti per gli obiettivi del lavoro.

LL_A – Suoli e Terre di riporto

Spessore min	0,00 m
Spessore max	0,50÷0,80 m

Suolo con abbondante frazione scheletrica frammisto a materiali detritici di riporto con scheletro clastico di dimensioni da pluridecimetriche sino a quasi decimetriche, incoerente, con residui di materiali di origine antropica quali frammenti di laterizi frammisti a terre provenienti da scavi e/o demolizioni.

Pur non rivestendo alcun interesse come piano di posa delle fondazioni, la possibile interferenza con gli scavi, qualora localmente presentino spessori significativi, impone di valutare le loro proprietà fisico-meccaniche in termini di spinta e di tenuta dei fronti di scavo in fase operativa.

Si attendono spessori modesti, dell'ordine max del mezzo metro.

LL_B – Terre eluvio-colluviali

Spessore min	0,00 m
Spessore max	0,50÷2,00 m

Depositi olocenici formati da percentuali variabili di sedimenti fini più o meno pedogenizzati, arricchiti in frazione organica e mescolati a detriti più grossolani prodotti dal disfacimento del substrato carbonatico.

Nell'area di intervento, in ragione della conformazione morfologica, si prevede uno spessore inferiore al metro.

LL_C – Substrato carbonatico

Spessore	pluridecimetico
----------	-----------------

Nel sito specifico il substrato carbonatico è rappresentato da una formazione litoide massiva mediamente fratturata e localmente alterata, costituita da calcari micritici e bioclastici ben stratificati.

Sebbene si preveda un elevato stato di fratturazione della compagine rocciosa, con fratture talvolta riempite con materiali residuali, questa facies lapidea consente di garantire elevate capacità portanti in termini di resistenza al taglio e sostanziale incompressibilità.

Detta formazione presenta spessori variabili che possono raggiungere i 30÷40 m.

Per questo strato non sussistono limitazioni in ordine alla tipologia fondale.

2.5. Assetto geomorfologico

L'areale di intervento ricade nella piana costiera della Sardegna settentrionale ed esattamente nel tratto prospiciente il Golfo dell'Asinara, su un ampio tavolato impostato sulla formazione sedimentaria Miocenica, delimitato verso mare da una costa a falesia. Si inserisce in un ambito morfologicamente pianeggiante o con deboli ondulazioni e, limitatamente alle aree di pertinenza dei corsi d'acqua, di tipo fluvio-deltizio, con quote assolute di 10÷20 m.

Nel dettaglio, il plesso scolastico in parola è ubicato in un contesto in gran parte urbanizzato, pianeggiante con quota media di circa 14,00 m s.l.m..

L'esame dei fronti di scavo e dei tagli stradali nelle vicinanze ha evidenziato la presenza di una copertura detritica con prevalente componente sabbiosa-limosa, di colore rossastro-marrone di spessore variabile ma comunque generalmente non superiore al metro, che ricopre il substrato carbonatico miocenico.



FIGURA 2.5 – Assetto morfologico al contorno del sito.

Non sono state rilevate evidenze di forme carsiche di rilievo, come evidenziato da alcuni rilievi geofisici e sondaggi eseguiti per altri obiettivi nell'abitato di Porto Torres in aree viciniori a quella in studio.

In considerazione delle modestissime pendenze e della mancanza di rotture di pendio, gli unici fenomeni morfodinamici attivi nel sito in esame e in quelli immediatamente adiacenti sono dovuti a locali erosioni areali o lineari riconducibili a processi di dilavamento prodotti dall'acqua in occasione di piogge intense e durature.

Allo stato attuale non sono state ravvisate fenomenologie erosive degne di nota.

2.6. Assetto idrogeologico

Dal punto di vista idrogeologico, nel territorio di Porto Torres si distinguono 7 unità principali, ulteriormente suddivisibili in base alla permeabilità

- ◆ carbonatica mesozoica;
- ◆ delle vulcaniti oligo-mioceniche;
- ◆ detritico carbonatica oligo-miocenica inferiore
- ◆ detritico carbonatica miocenica superiore;
- ◆ delle alluvioni plio-quadernarie;
- ◆ detritica quadernaria.

Le falde acquifere che caratterizzano il settore in esame sono ospitate nell'acquifero carbonatico miocenico del Sassarese che si estende diverse centinaia di chilometri quadrati. Seppure le opinioni in tale senso siano contrastanti, è verosimile che la permeabilità delle varie facies calcaree sia essenzialmente riconducibile al carsismo e, solo su vasta scala, per fratturazione: infatti nei livelli più superficiali della roccia, ove le cavità sono riempite da terra rossa, non si instaurano flussi idrici che si rinvergono invece oltre i 40 m di profondità. A suffragio di quanto, l'archivio nazionale nelle indagini nel sottosuolo ai sensi della Legge 464/84 consultabile nel Geoportale ISPRA, che per il sito di intervento non indica alcun pozzo.

Nel dettaglio, il litotipo che contraddistingue il sito di intervento è riconducibile all'Unità Detritico Carbonatica del Miocene superiore, che è suddivisa in due sub-unità:

RESb delle marne e silti, che affiorano diffusamente nell'area industriale e lungo la falesia costiera, nel settore orientale del territorio comunale;

RESa dei calcari organogeni che affiorano nel settore centrale del territorio comunale e quindi nel sito in argomento

Sulla base delle caratteristiche di permeabilità, sia primaria (per porosità) che secondaria (per fessurazione) delle diverse formazioni geologiche si distinguono i seguenti complessi idrogeologici:

◆ Permeabilità medio-alta per porosità

b₂ Coltri eluvio-colluviali [Olocene]

h Depositi antropici costituiti da materiali di riporto e aree bonificate [Olocene].

bb Depositi alluvionali costituiti da sabbie con subordinati limi e argille [Olocene].

g₂ Depositi di spiaggia costituiti da sabbie e ghiaie, talvolta con molluschi, etc. [Olocene].

PVM2b Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (Sistema di Portovesme) – Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali [Pleistocene superiore].

◆ Permeabilità medio - alta per carsismo e fratturazione

RESa Calcareni, calcari bioclastici fossiliferi. Calcari nodulari a componente terrigena variabile [Burdigaliano superiore].

◆ Permeabilità medio - bassa per carsismo e fratturazione

RESb Arenarie e conglomerati a cemento carbonatico; intercalazioni di depositi sabbioso-arenacei quarzoso-feldspatici a grana medio-grossa, di ambiente litorale [Burdigaliano superiore].

◆ Permeabilità bassa per carsismo e fratturazione

h Depositi antropici costituiti da manufatti antropici [Olocene].

Come si evince dalla carta idrogeologica fuori fascicolo (**PFTE_GEO_3**), il comparto di intervento ricade nel dominio delle litologie a permeabilità medio-alta, nel caso identificabili con le Calcareni, calcari bioclastici fossiliferi e calcari nodulari a componente terrigena variabile afferenti alla *Formazione di Mores*.

Per quanto riguarda la circolazione sotterranea, le litologie incontrate presentano una permeabilità medio - alta di tipo secondario per fratturazione e carsismo che favorisce processi di infiltrazione delle acque superficiali. Non si hanno informazioni che suggeriscano la presenza di una falda superficiale, mentre alcune emergenze sottomarine ubicate in prossimità della costa e i dati piezometrici rilevati in alcuni pozzi ubicati nell'intorno, suggeriscono la presenza di una superficie freatica collocata poco sopra del livello marino e dunque approssimativamente attorno a 20 metri dal piano di campagna del lotto.

Per tale ragione si esclude la presenza di una falda acquifera di tipo "freatico" nel senso classico del termine, pur non dubitando che durante gli scavi, semmai operati durante periodi intensamente piovosi, possano rinvenirsi modesti flussi idrici in corrispondenza delle zone più intensamente fratturate. Detti accumuli o circolazioni idriche potranno essere agevolmente contrastati attraverso normali sistemi di aggettamento delle acque (motopompe).

Per le prevedibili quote di progetto, la falda profonda ospitata nel complesso reticolo di fratture del substrato metamorfico non ha alcuna rilevanza.

2.1. Assetto idrografico

Il sito di indagine è inserito in un'area urbana, in cui il sistema idraulico non permette l'infiltrazione delle precipitazioni meteoriche se non in misura ridotta.

A scala comunale, la direzione predominante degli elementi più significativi del reticolo idrografico del territorio è S-N e SE-NW, con andamento talora marcatamente meandriforme e valli a fondo piatto poco incise.

Il corso d'acqua principale della zona è il *Rio Mannu di Porto Torres* il cui alveo, ad andamento circa N-S, ortogonale alla linea di costa, è localizzato immediatamente a ridosso del centro abitato, ad ovest dell'area di intervento e ad una distanza da quest'ultimo di circa 520 m. Con il suo vasto bacino, di oltre 670 km², si sviluppa su vasta parte della Provincia di Sassari, trae origine da *Monte sa Figu* (376 m) in territorio di Siligo e sfocia nel Golfo dell'Asinara presso la spiaggia della Marinella a Porto Torres. È considerato un corso d'acqua naturale di primo ordine, in quanto recapita la propria acqua direttamente in mare.

I principali affluenti, anch'essi ad andamento lineare, ortogonale alla linea di costa, sono: nella destra idrografica, il *Rio Bidighinzu*, il *Rio Mascari* e il *Rio di Ottava*; nella sinistra idrografica il *Rio Minore* e il *Rio Ertas*.

A scala locale, l'assetto idrografico del sito di intervento risulta profondamente modificato ed occultato, in quanto si colloca in una zona urbanizzata scevra di interferenze con il reticolo superficiale: non si segnalano, infatti, corsi d'acqua significativi, ma solo modesti scorrimenti idrici localizzati in corrispondenza delle aree più depresse, attivabili in concomitanza di eventi idrometeorici molto intensi.

Con riferimento alla Figura di seguito riportata, che rappresenta lo schema della circolazione idrica superficiale, non si ravvisano potenziali interferenze tra gli interventi in progetto e le principali linee di deflusso.

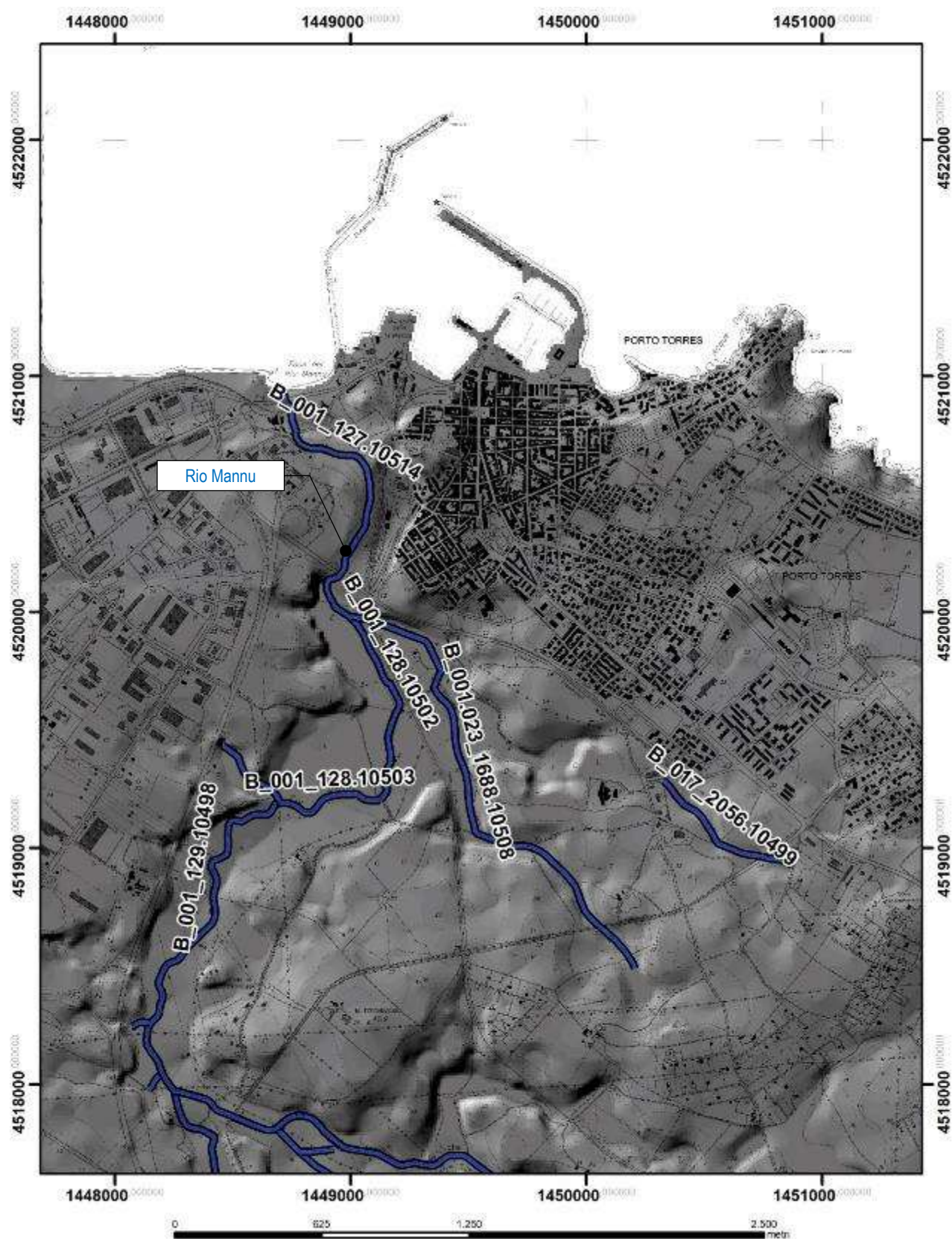


FIGURA 2.6 – Assetto idrografico (estratto da: www.sardegnaeopoitale.it/webgis2).

2.2. Sismicità dell'area

Le caratteristiche di sismicità del blocco sardo-corso sono da porre in relazione, sostanzialmente, con l'evoluzione geodinamica del Mediterraneo occidentale e delle catene montuose che lo circondano: il basamento della Sardegna rappresenta infatti un segmento della catena ercinica sud-europea originatasi a partire dal Paleozoico e separatosi dalla stessa durante il Miocene inferiore.

Durante il Miocene superiore, il principale evento geodinamico dell'area è rappresentato dalla strutturazione dell'attuale margine orientale dell'Isola, che si protrae fino a parte del Quaternario e durante il quale i principali eventi che hanno condizionato la tettonica distensiva della Sardegna sono rappresentati quindi dalla migrazione dell'Arco Appenninico settentrionale sull'avanfossa del margine adriatico e, soprattutto l'apertura del Bacino Tirrenico meridionale.

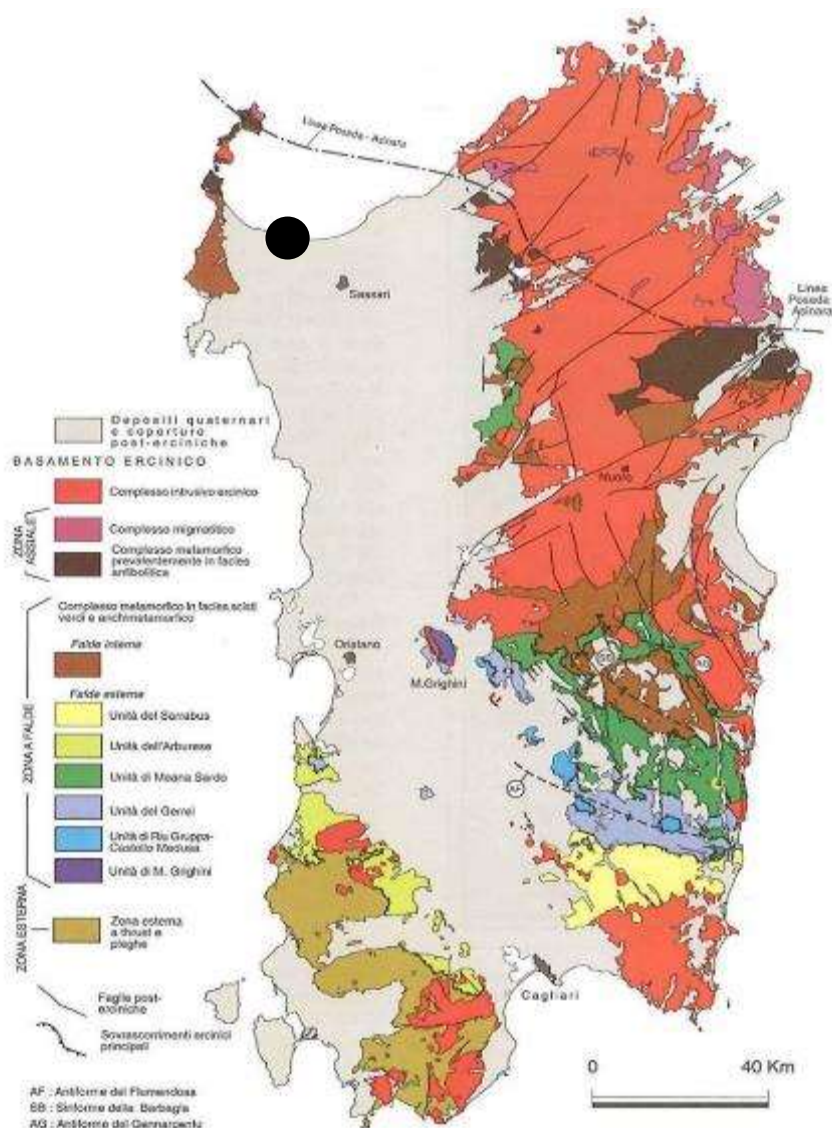


FIGURA 2.7 – Schema dei principali elementi strutturali del basamento ercinico sardo (da Carmignani et al. 2001).

2.3. Sismicità storica

Nonostante il Blocco Sardo-Corso sia una tra le zone più antiche e stabili dell'intera area mediterranea, negli ultimi decenni non pochi sono stati i terremoti di energia non trascurabile localizzati in Sardegna o nelle sue immediate vicinanze⁽³⁾.

Dai dati macrosismici provenienti da studi INGV e di altri enti utilizzati per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04, consultabili dal sito web "DBMI04", per l'Isola non sono segnalati eventi sismici significativi, al massimo del VI grado della scala Mercalli. Si porta ad esempio il terremoto del 04.06.1616 che determinò danneggiamenti vari a edifici della Cagliari di allora e ad alcune torri costiere attorno a Villasimius. Altri terremoti degni di nota (oltre ai primi registrati dall'Istituto Nazionale di Geofisica negli anni 1838 e 1870 rispettivamente del VI e V grado della scala Mercalli) risalgono al 1948 (epicentro nel Canale di Sardegna, verso la Tunisia, VI grado) e al 1960 (V grado), con epicentro i dintorni di Tempio Pausania).

Degno di attenzione è sicuramente anche quello avvertito nel cagliaritano il 30.08.1977 provocato dal vulcano sottomarino Quirino mentre, più recentemente (03.03.2001) è stato registrato un sisma di magnitudo 3,3 Richter (IV grado scala Mercalli) nella costa di San Teodoro ed un sisma di analoga magnitudo il 9 novembre 2010, nella costa NW dell'Isola.

Altri episodi, con epicentro nel settore a mare poco a ovest della Corsica e della Sardegna, sono stati registrati nel 2011 con magnitudo compresa tra 2,1 e 5,3 de ipocentro a profondità tra 11 km e circa 40 km di profondità. Si segnalano altri terremoti tra il 2006 e il 2007 nel Medio Campidano seppure di magnitudo mai superiore e 2,7 (13.07.2006, magnitudo 2,7 a 10 km di profondità con epicentro Capoterra; 23.05.2007, magnitudo 1,4 a 10 km di profondità con epicentro Pabillonis; 02.10.2007, magnitudo 1,4 a 10 km di profondità con epicentro tra Pabillonis e Guspini).

Per quanto attiene i siti di specifico intervento edilizio, la sismicità storica è stata ricostruita previa consultazione dei seguenti database resi fruibili online dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV):

- **CPTI15 – Catalogo Parametrico dei terremoti Italiani 2015**

Contiene i dati parametrici omogenei, sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o con magnitudo (M_w) ≥ 4 relativi a tutto il territorio italiano.

- **DBMI15 – Database macrosismico dei terremoti italiani 2015**

Fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nel periodo 1000-2014.

L'archivio CPTI15-DBMI15 indica per il Comune di Porto Torres indica 2 eventi verificatisi rispettivamente negli anni 1948 e 2000 (**FIGURA 2.8** **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), ma senza effetti significativi

L'ultimo è quello localizzato nel Mar Tirreno Centrale (Latitudine 40.955 N – Longitudine 10.097 E, profondità circa 1 km) e avvenuto il 26.04.2000 alle ore 13:37 la cui magnitudo è risultata di 4,77.

Dal database DISS relativo alle potenziali sorgenti sismogenetiche con magnitudo > 5.5 , si evince che il settore di intervento non è gravato da potenziali faglie sismogenetiche.

⁽³⁾ (<https://ingvterremoti.wordpress.com/2016/06/04/i-terremoti-nella-storia-cagliari-adi-4-juny-terremotus-factus-est-1616/>).

Asinara (Fornelli)

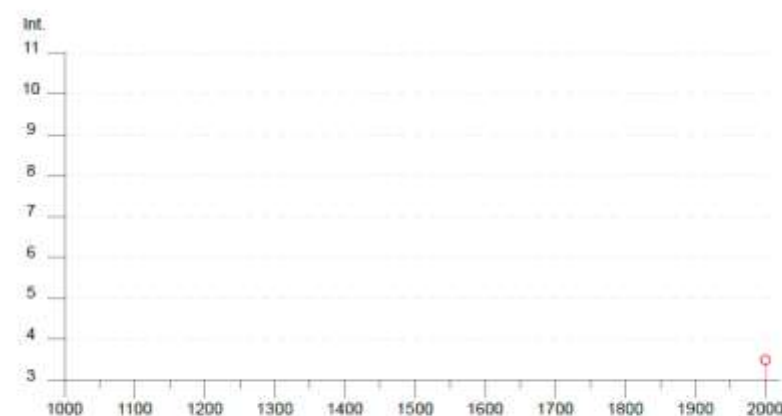
PlaceID IT_68312
 Coordinate (lat, lon) 40.994, 8.237
 Comune (ISTAT 2015) Porto Torres
 Provincia Sassari
 Regione Sardegna
 Numero di eventi riportati 1



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
5	1948	11	13	09	52		Mar di Sardegna	18	6	4.72

Porto Torres

PlaceID IT_68314
 Coordinate (lat, lon) 40.832, 8.402
 Comune (ISTAT 2015) Porto Torres
 Provincia Sassari
 Regione Sardegna
 Numero di eventi riportati 1



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
3-4	2000	04	26	13	37	4	Tirreno centrale	265		4.77

FIGURA 2.8 – Eventi sismici estratti dal catalogo CPTI15 e DBMI15 per il Comune di Porto Torres.

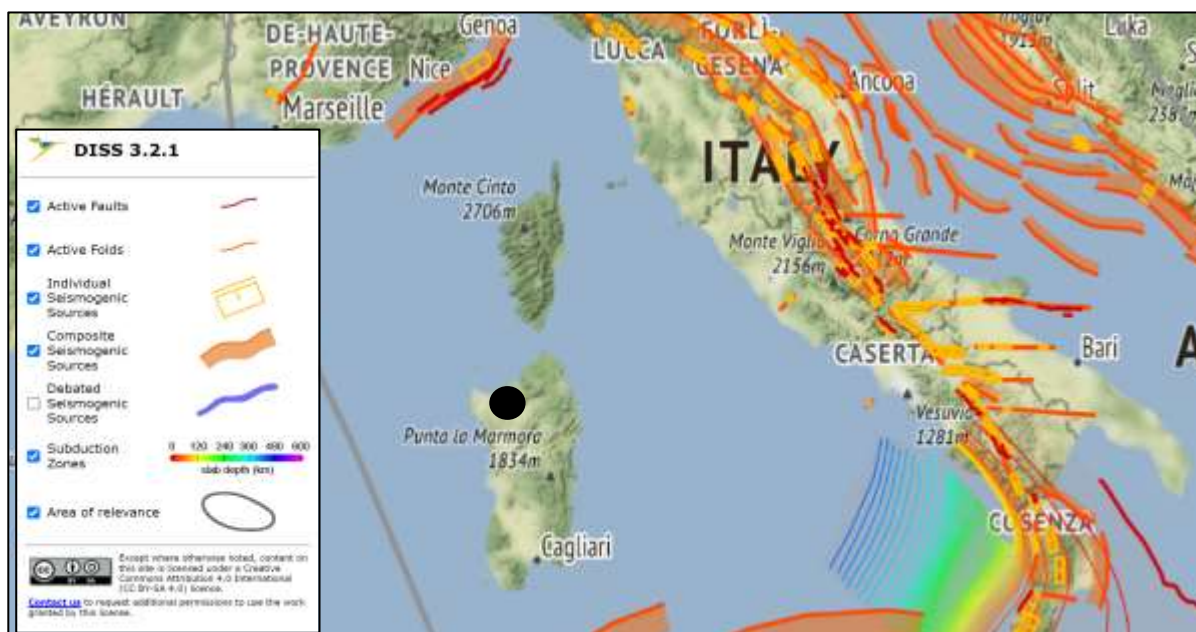


FIGURA 2.9 – Localizzazione delle potenziali sorgenti di terremoti con $M > 5,5$ rispetto all'area di intervento (estratto da DISS Working group 2018, Database of Individual Seismogenic Sources ver. 3.2.1., <http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml>).

2.4. Classificazione sismica

Il panorama legislativo in materia sismica è stato rivisitato dalle recenti normative nazionali, ovvero dall'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20.03.2003 «*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*», entrata in vigore il 25.10.2005 in concomitanza con la pubblicazione della prima stesura delle «*Norme Tecniche per le Costruzioni*» e dalla successiva O.P.C.M. n. 3519/2006 che ha lasciato facoltà alle regioni di introdurre o meno l'obbligo della progettazione antisismica in zona 4.

In relazione alla pericolosità sismica - espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi - il territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone con livelli decrescenti di pericolosità (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**1) in funzione di altrettanti valori di accelerazione orizzontale massima al suolo (a_{g475}), ossia quella riferita al 50esimo percentile, ad una vita di riferimento di 50 anni e ad una probabilità di superamento del 10% attribuiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s alle quali si applicano norme tecniche differenti per le costruzioni. L'appartenenza ad una delle quattro zone viene stabilita rispetto alla distribuzione sul territorio dei valori di a_{g475} con una tolleranza 0,025g: a ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido (a_g), che deve essere considerato in sede di progettazione.

Allo stato attuale delle conoscenze e del progresso scientifico, attraverso l'applicazione WebGIS, è possibile consultare in maniera interattiva le mappe di pericolosità sismica. Il sito di specifico intervento edilizio, così come tutto il territorio regionale ricade in **Zona 4**, contraddistinto da «pericolosità sismica BASSA» a cui corrisponde la normativa antisismica meno severa ed al parametro a_g è assegnato un valore di accelerazione al suolo (con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) compreso tra **0,025÷0,05 g** da adottare nella progettazione.

La consultazione del database del progetto Ithaca (*Italy Hazard From Capable Faults*) ha escluso la presenza di «faglie capaci», ovvero di lineamenti tettonici attivi potenzialmente in grado di produrre deformazioni in superficie e fenomeni dagli effetti distruttivi per le opere antropiche.

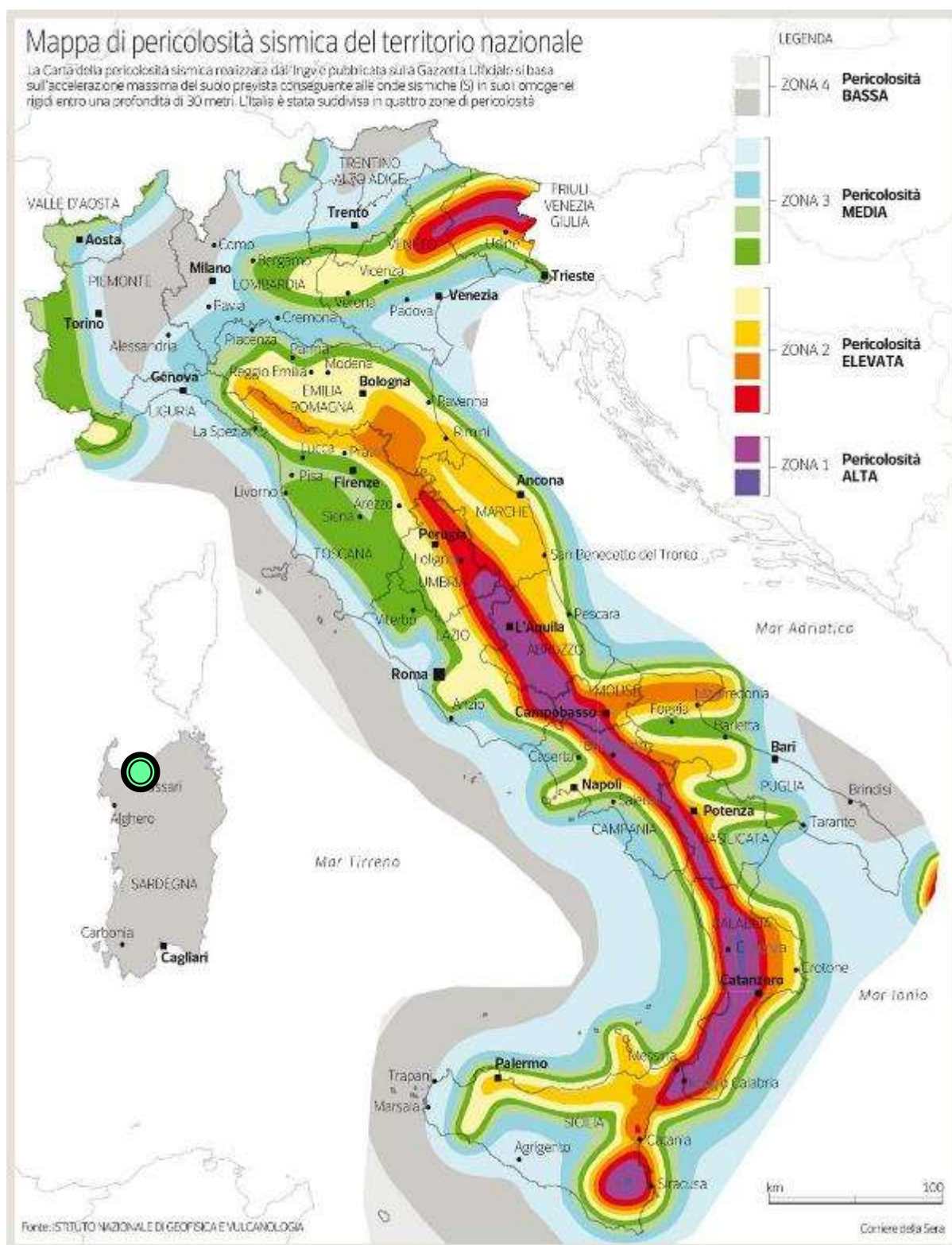


FIGURA 2.10 – Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale realizzata (INGV 2018).

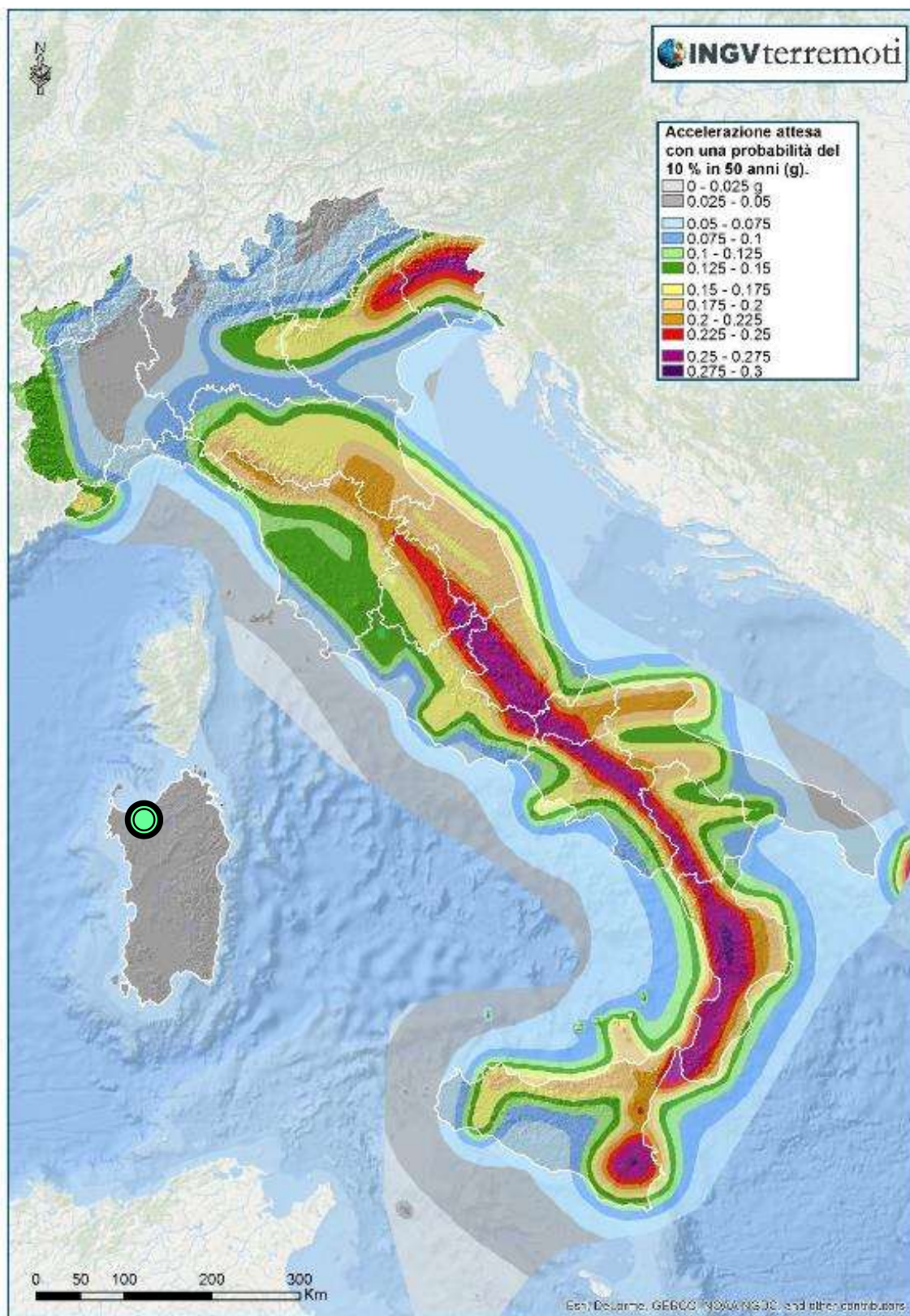


FIGURA 2.11 – Mappa dell’accelerazione attesa con una probabilità del 10% in 50 anni (INGV 2018).

Per quanto riguarda la massima intensità macrosismica I_{max} (che rappresenta una misura degli effetti che il terremoto ha prodotto sull'uomo, sugli edifici e sull'ambiente) si fa riferimento alla classificazione del Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti (G.N.D.T.).

Per i comuni della Sardegna, così come per quelli ove si segnalano intensità massime molto basse o non esiste alcun dato osservato, è stato assegnato un valore "ponderato" di intensità (**$I_{max/pon}$**), stimato per estrapolazione dai valori osservati nei comuni limitrofi oppure calcolando un risentimento massimo a partire dal catalogo NT.3 mediante opportune leggi di attenuazione.

Dei 375 comuni della Sardegna, meno del 5% ha comunicato al G.N.D.T. i dati relativi all'intensità macrosismica MCS: in ogni caso, nella totalità delle rilevazioni, i valori sono risultati minori di 6.

2.5. Categoria di sottosuolo

In ottemperanza alle N.T.C. 2018, per la misura delle azioni sismiche di progetto è stata valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale, attraverso la classificazione dei terreni compresi fra il piano di campagna ed il "bedrock" attraverso la stima delle velocità medie delle onde di taglio (V_s).

L'approccio semplificato prevede una classificazione del sottosuolo in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio (V_{seq} in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s(strato)}}} \quad [m/s]$$

dove:

h_i = spessore dello strato i-esimo (in m)

N = numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore h (strato) e dalla velocità delle onde S V_s (strato);

$V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m sommitali;

H = profondità del substrato definito come formazione rocciosa o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

La profondità del substrato viene riferita al piano di imposta delle fondazioni superficiali piuttosto che alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera e al piano di imposta della fondazione per i muri di sostegno. Quando la profondità H del substrato è > 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V_{seq} è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H = 30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Alla luce di quanto, ai fini della definizione delle azioni sismiche secondo le «*Norme Tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni*», un sito può essere classificato attraverso il valore delle V_{seq} con l'appartenenza alle differenti categorie sismiche; ovvero:

- A] Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
- B] Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

- C]** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
- D]** Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
- E]** Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Nel caso specifico, l'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti è stata effettuata attraverso uno stendimento di sismica a rifrazione con metodo MASW, che ha consentito di ricostruire la sequenza stratigrafica secondo le caratteristiche legate alla velocità delle onde di taglio e quindi di classificare il sito secondo le categorie di suolo previste dalle NTC 2018 e ss.ii..

Dall'elaborazione complessiva del dato sismico, per profondità di piano di posa a 0,00 m, è scaturito un valore di $V_{s,eq} (H = 30,00 \text{ m}) = 407,23 \text{ m/sec}$, da cui una categoria di suolo «B» che annovera *«Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s»*.

3. PERICOLOSITÀ GEOLOGICA

3.1. Pericolosità idrogeologica

L'assetto idrogeologico del settore è contraddistinto da un basamento calcareo-calcarenitico ove i flussi idrici si instaurano a profondità decametriche ed una limitata coltre detritica che può ospitare una falda freatica occasionale di modesta produttività. Alla luce di quanto, per le previste quote di progetto, non sussistono i presupposti affinché l'opera possa influenzare in qualche modo le caratteristiche qualitative o idrodinamiche delle acque sotterranee.

Per le suddette ragioni non sussistono i presupposti affinché le opere in progetto possano influenzare in qualche modo le caratteristiche qualitative o idrodinamiche delle acque sotterranee.

3.2. Subsidenza

Se si esclude un lentissimo abbassamento ancora in atto in tutta l'area costiera meridionale, la subsidenza è irrilevante tra i processi morfodinamici dell'Isola: gli unici fenomeni riconducibili a subsidenza nella Regione Sardegna sono i "sink-holes" localizzati negli hinterland di Carbonia ed Iglesias.

Non sono noti nell'area sink-hole o altre tipologie di subsidenza naturale. Analogamente, non si è a conoscenza di abbassamenti del suolo provocati dallo sfruttamento delle falde acquifere.

3.3. Pericolosità idraulica

L'intervento in parola ricade nel Sub-Bacino 3 "Coghinas - Mannu - Temo". Le cartografie ufficiali di cui al Piano di Assetto Idrogeologico, il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali e il Piano Gestione e Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) non indicano alcuna criticità idraulica per il sito specifico.

. In ragione di quanto e della posizione marginale rispetto alle principali direttrici di deflusso incanalato, allo stato attuale dei luoghi non sono stati ravvisati elementi predisponenti a pericolosità idraulica coerentemente alla cartografia PAI.

Dalla medesima fonte cartografica ufficiale, non risulta che l'areale di intervento né quelli vicini siano state allagate in concomitanza del cosiddetto "ciclone Cleopatra". A suffragio di quanto rilevato e della posizione marginale rispetto alle principali direttrici di deflusso incanalato delle acque di dilavamento superficiale, allo stato attuale dei luoghi non sono stati ravvisati elementi predisponenti a condizioni di pericolosità idraulica coerentemente alla cartografia PAI. Come emerge dalla cartografia PAI riportata fuori fascicolo, infatti, le aree perimetrate a rischio idraulico elevate (Hi4) sono quelle relative all'alveo del Rio Mannu, che sono localizzate a Sud del sito di intervento.

3.4. Pericolosità da frana

L'intervento in parola ricade nel Sub-Bacino 3 "Coghinas - Mannu - Temo". Dalla consultazione della relativa cartografia per l'areale in studio ed un suo congruo intorno, non sono indicate condizioni di pericolosità da frana. L'intervento in progetto infatti ricade in aree perimetrate come Hgq1, a pericolosità moderata da frana, per cui non si rende necessaria la predisposizione del relativo Studio di compatibilità geologica e geotecnica.

Questa constatazione è altresì suffragata dall'esito dei rilievi all'uopo condotti che non hanno fatto ravvisare condizioni di criticità ante e post operam. Già in condizioni di seminaturalità dei luoghi, infatti, il settore in studio è risultato esente da problematiche legate a dissesto per franosità in quanto non sottoposto all'influenza diretta delle dinamiche morfogenetiche connesse con la presenza dei rilievi al contorno perché troppo distanti.

4. PROGRAMMA SOMMARIO DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

Per supportare adeguatamente la progettazione definitiva ed esecutiva degli interventi, si ritiene necessario prevedere una campagna di indagini geognostiche e geotecniche finalizzata a chiarire gli aspetti litostratigrafici ancora indefiniti e le incertezze sulla reale caratterizzazione litotecnica del sottosuolo.

In considerazione del prevedibile assetto geologico del sedime che vede la soggiacenza di un substrato lapideo di natura carbonatica a profondità variabili da pochi decimetri ad alcuni metri, sarà opportuno realizzare sondaggi a carotaggio continuo e di saggi stratigrafici a mezzo escavatore meccanico, nonché prove geotecniche di laboratorio su campioni rappresentativi di terreno/roccia.

In termini indicativi e non limitativi si prevede:

- | | |
|---|------|
| – sondaggio a carotaggio continuo (profondità minimo 10.00 da p.c.) | n. 3 |
| – pozzetti a mezzo escavatore meccanico | n. 4 |
| – prelievo di campioni rappresentativi di terreno | n. 9 |

5. CONCLUSIONI

Il previsto intervento, così come la totalità del comparto edificato, ricade, secondo le ipotesi avanzate in questa specifica fase progettuale, in un contesto geologicamente contraddistinto da un substrato lapideo di età miocenica costituito da fitte alternanze di calcari bioclastici e calcareniti, sormontato da una coltre detritica recente, di spessore variabile da pochi decimetri ad alcuni metri.

A luoghi si rinvenivano accumuli di materiali di riporto costituiti perlopiù da sfridi di roccia, prodotti da scavi in aree più o meno contermini per opere di urbanizzazione

Per le loro intrinseche elevate caratteristiche di resistenza al taglio le rocce del basamento carbonatico, seppur fratturate e localmente alterate, rappresentano un piano di posa sufficientemente performante per fondazioni superficiali anche con minimo incasso, capaci di sopportare i carichi indotti dalle strutture in progetto senza il verificarsi di cedimenti apprezzabili.

Si rimanda alla fase definitiva per la conferma delle ipotesi avanzate in questa sede, che potrà essere supportata da una specifica campagna geognostica a mezzo sondaggi, scavi e prove.

DATA: 27 gennaio 2023

IL GEOLOGO

Dott.ssa Maria Francesca Lobina

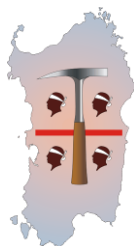


appendice
REPORT SULL'INDAGINE GEOFISICA

COMUNE DI PORTO TORRES

PROVINCIA DI SASSARI

VERIFICA STRUTTURALE DELL'ISTITUTO SCOLASTICO IN VIA PORRINO



Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

Dott. Geol. Giancarlo Carboni

Via Nazionale 277

09039 Villacidro (SU)

cell. 329 4177709

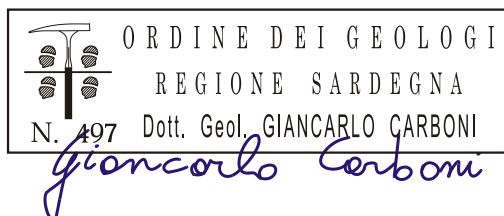
e-mail: info@geosardegna.it

www.geosardegna.it

IL GEOLOGO INCARICATO

Dott. Geol. Giancarlo CARBONI

Ordine dei Geologi della Sardegna n° 497



Il committente:

Dott. Geol. Maria Francesca Lobina

Oggetto:

Indagini geofisiche mediante metodologia MASW per calcolo della categoria di sotto-suolo.

D.M. 17.01.2018

Villacidro, li 26/01/2023

INDICE

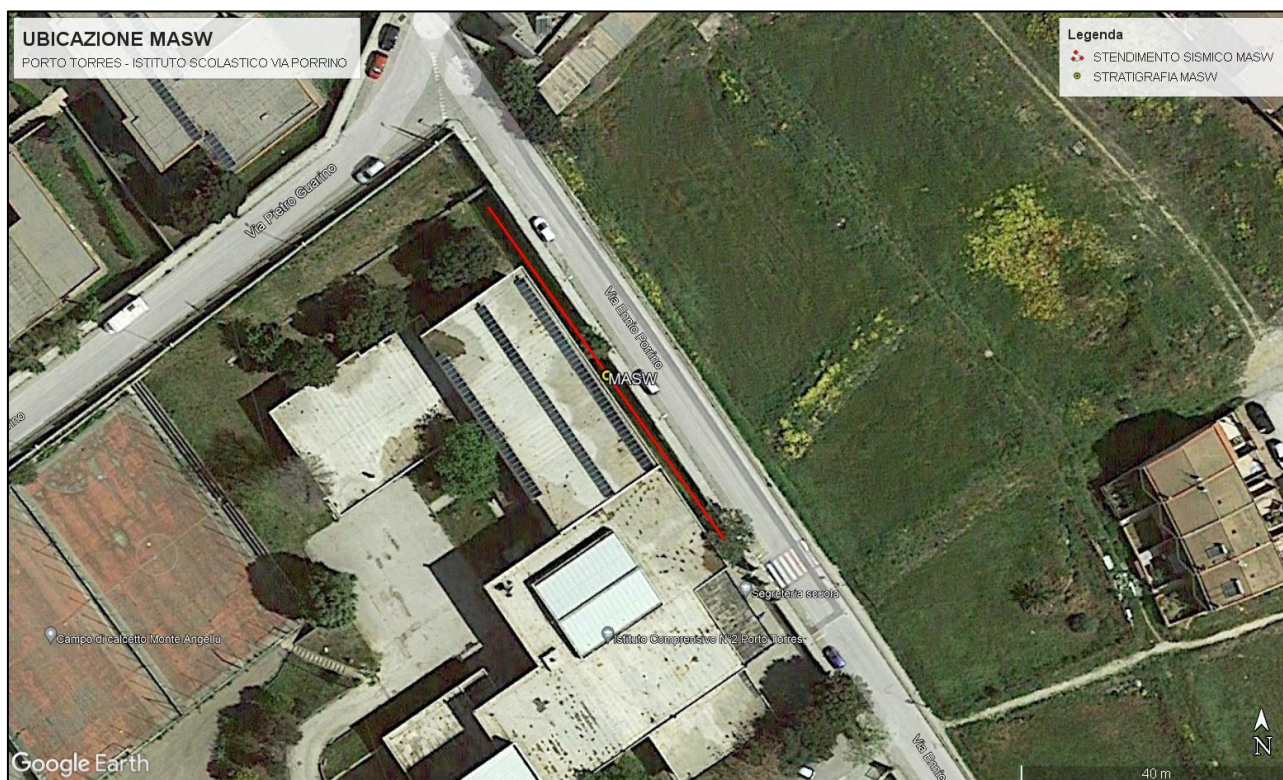
Premessa.....	1
Ubicazione punti di indagine MASW	1
Repertorio fotografico dell'esecuzione delle sismiche MASW	2
Prospezione sismica	3
Caratteristiche strumentali	3
Generalità sulle indagini sismiche mediante onde di superficie.....	4
Metodologia MASW	4
Schema operativo acquisizioni MASW	7
Elaborazione Dati	7
Rigidità sismica (R)	8
Frequenza fondamentale di Nakamura (F_0)	8
Categorie del sottosuolo di fondazione	9
Risultati delle indagini sismiche	10
Tabella Vs equivalente MASW	10
Sismogrammi MASW.....	11
Spettri di dispersione MASW	11
Profilo Vs MASW	12
Correlazioni geotecniche	12
Correlazione ϕ -Vs.....	12
Correlazione Cu-Vs	12
Portanza	13
Risultati della sismica a rifrazione	14
Moduli dinamici	16
Tabelle dei moduli dinamici calcolati	17



PREMESSA

Su incarico conferito nell'ambito dell'attività di verifica strutturale dell'Istituto comprensivo scolastico n° 2 di Via Porrino nel Comune di Porto Torres, allo scrivente dott. Geol. Giancarlo Carboni, iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Sardegna con il n° 497, con Studio Tecnico in Via Nazionale n° 277 – Villacidro (SU), è stata realizzata una indagine geofisica con la metodologia MASW (Multichannels Analysis Surface Waves) allo scopo di definire le caratteristiche stratigrafiche del terreno interessato dal progetto e misurare la velocità media delle onde Vs fino ad una profondità adeguata per la definizione dell'interazione della struttura sul terreno di fondazione in relazione alla risposta sismica locale nelle norme delle NTC 2018.

Stralcio aerofotogrammetrico con localizzazione delle indagini eseguite

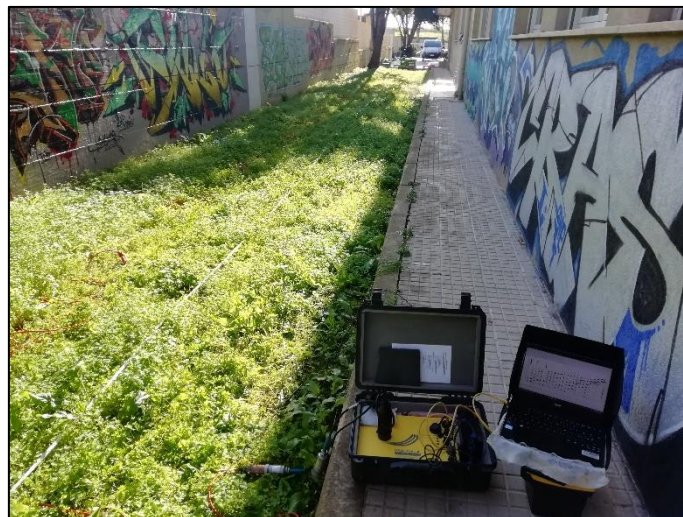
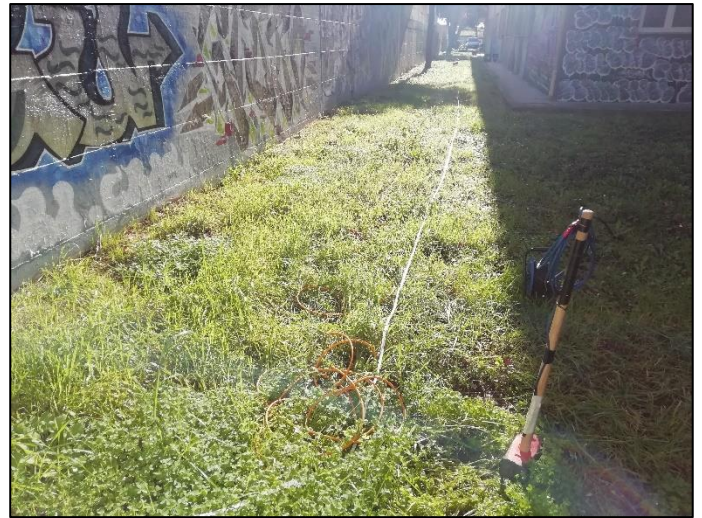


Ubicazione punti di indagine MASW

UBICAZIONE MASW Coordinate chilometriche UTM WGS84		
Denominazione	Coordinate est	Coordinate nord
MASW	449 559	4 520 053



Repertorio fotografico dell'esecuzione delle sismiche MASW

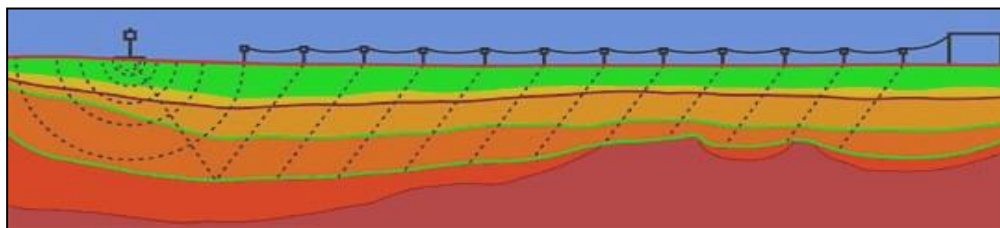




PROSPEZIONE SISMICA

L'esecuzione di indagini sismiche ha lo scopo di ottenere informazioni di tipo geotecnico sul comportamento fisico-meccanico dei corpi geologici investigati, attraverso la determinazione dei relativi parametri, ed informazioni di tipo geologico sui caratteri strutturali e stratigrafici del volume del sottosuolo indagato.

Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consiste nel creare delle onde artificiali nel terreno (energizzazione) battendo una piastra poggiata a terra con una mazza. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità; questa dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fratturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, ecc.



Rappresentazione schematica di una tipica prospezione sismica

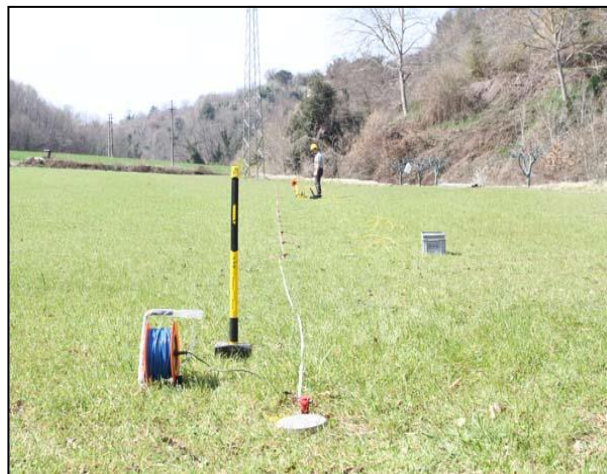
Caratteristiche strumentali

La strumentazione utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, numero di canali da 3 a 24, ampio range dinamico 144db, output dei dati in SEG-Y, SEG-2 o ASCII, opzione per test dei geofoni ed accelerometri, lunghezza di registrazione fino a 4 mld di campioni, intervalli di campionamento: 0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 ms. L'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation); l'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter su piattello di battuta).

Per la ricezione delle onde longitudinali (P), durante l'indagine sismica, sono stati usati geofoni verticali a lungo periodo (4.5 Hz).



Sismografo DaqLinkIII



Operazioni di acquisizione



GENERALITÀ SULLE INDAGINI SISMICHE MEDIANTE ONDE DI SUPERFICIE

La necessità dettata dalle NTC2018 di fornire una solida stima della velocità di propagazione delle onde S nel sottosuolo ha dato un forte slancio alla diffusione di tecniche basate sull'analisi della dispersione delle onde di superficie (Rayleigh e Love). La dispersione rappresenta una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. In un mezzo stratificato le varie componenti (lunghezza d'onda, quindi frequenza $\lambda = v/f$ del segnale sismico si propagano ad una velocità diversa in funzione delle caratteristiche del mezzo. Le componenti a frequenza minore (lunghezza d'onda maggiore) penetrano più in profondità e sono quindi influenzate dagli strati più profondi rispetto a quelle a frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore) che risentono delle proprietà fisiche dei livelli superficiali, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

Metodologia MASW

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale 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 alla direzione di propagazione delle onde che vengono così 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 $0.92 V_s$. La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).



Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto al senso 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 r^{-2} e non da r come per le onde di volume.

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

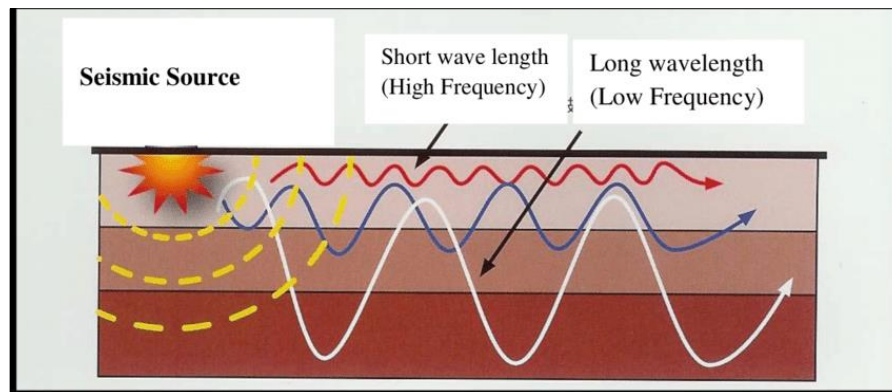
Inoltre, la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione, innanzi tutto, della V_s , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dalle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" D.M. del 17/01/2008. 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 Vs, è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati.

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



Le onde di Rayleigh si disperdono con lunghezze d'onda differenti a seconda della profondità

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio Vs sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

L'ampiezza delle onde superficiali diminuisce esponenzialmente con la profondità. In realtà la rapidità di questa attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda associata.

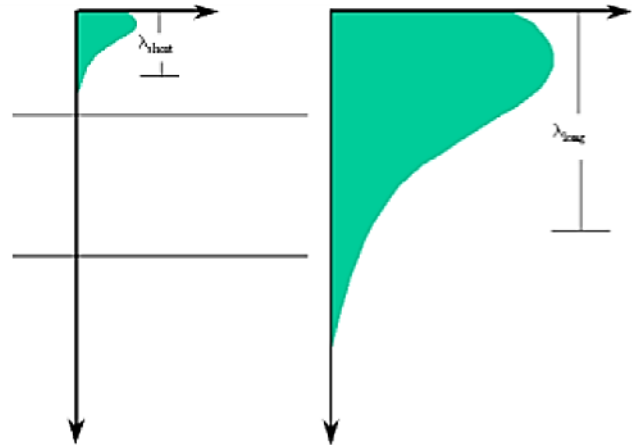


In particolare, all'aumentare della lunghezza d'onda λ , aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione; la lunghezza d'onda è legata al periodo T o se si preferisce alla frequenza f dell'onda mediante la relazione

$$\lambda = V_r \times T = V_r / f$$

Quindi, a parità di velocità di fase (V_r), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza. In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde

Quindi, la massima profondità di esplorazione dipende dalla massima lunghezza d'onda misurabile con lo stendimento di sensori disponibili. Si è riscontrato che le lunghezze d'onda di dimensioni fino al doppio della lunghezza massima dello stendimento sono effettivamente misurabili. Sapendo che la profondità di investigazione è pari a circa 0.5-0.8 della massima lunghezza d'onda misurabile, la profondità in genere raggiungibile è pari alla metà della lunghezza dello stendimento.



Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

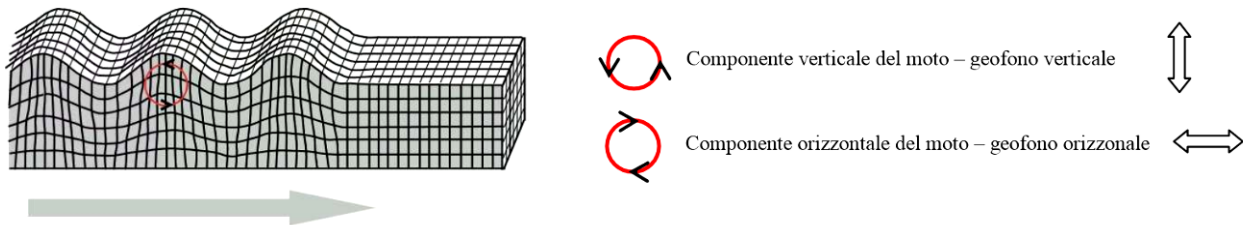
Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S .



L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

Rayleigh Wave



Schema operativo acquisizioni MASW

Sulla base delle caratteristiche morfologiche del sito, è stato posizionato lo stendimento sismico, in parte nell'area d'ingombro della struttura. L'analisi è stata eseguita adottando la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 4,5 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2.5 m per complessivi 57.5 m di stendimento;
- Offset di battuta: n° 2 battuta disposta a 2.5 m di distanza dal primo e dall'ultimo geofono.

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Tempo di acquisizione: 1 s;
- Frequenza di campionamento: 1000 Hz;
- Periodo di campionamento: 1.0 ms.

I dati acquisiti in campagna sono stati, quindi, elaborati ed è stato possibile ricostruire un modello attendibile Vs/profondità. Il metodo di investigazione MASW è detto "attivo" in quanto la generazione di onde sismiche si effettua artificialmente a mezzo di idonea massa battente, fucile sismico o altro. Il punto di energizzazione è posto lungo l'allineamento dei geofoni ad una certa distanza da un geofono esterno. Con questa procedura si ricostruisce l'assetto sismo-stratigrafico del sottosuolo che si basa sull'analisi delle onde di Rayleigh che si propagano entro un semispazio stratificato.

Il metodo prevede l'utilizzo di strumentazione classica per sismica a rifrazione ad elevata dinamica (24 bits di conversione A/D), con geofoni a bassa frequenza. Una volta acquisiti i dati son stati riversati direttamente su p.c. per la successiva elaborazione.

La battuta di andata è stata denominata ADT, mentre quella inversa o di ritorno è stata denominata RDT.

Elaborazione Dati

L'elaborazione dei dati è stata fatta una volta definita la curva di dispersione. I dati sono stati processati attraverso il codice SeisImager (Pickwin v. 3.14 WaveEq v. 2.07).

La procedura di elaborazione consiste nell'intervenire e modificare il profilo delle velocità Vs fino al raggiungimento di un buon accordo fra la curva di dispersione rilevata in sito e la curva simulata numericamente.

L'analisi dei dati acquisiti dalla metodologia avviene attraverso le seguenti fasi:

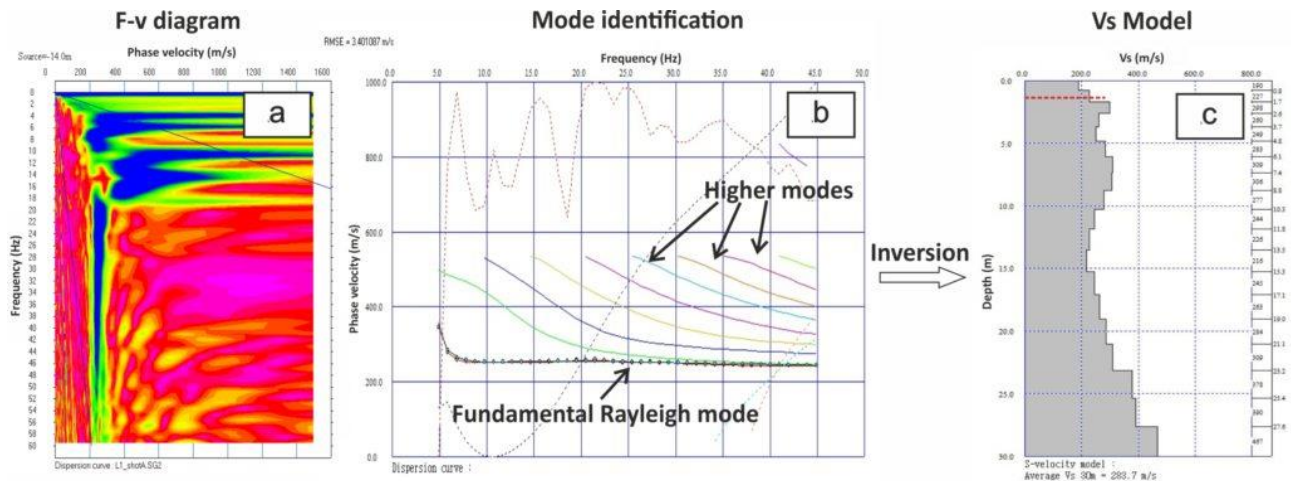


- Acquisizione dei sismogrammi;
- Esportazione del file in formato SEG-2 idoneo all'elaborazione finale;
- Calcolo dello spettro di velocità;
- Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
- Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo;
- Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

I valori di dispersione appartenenti a disturbi a bassa frequenza e ai modi superiori sono stati esclusi dall'interpretazione del profilo di velocità.

Nella Tabella e nelle Figure sottostanti vengono riportati: l'andamento del profilo di velocità; gli spessori; le relative velocità Vs (dalle onde di Rayleigh) e la densità stimati, ricordando che, come in tutti i metodi geofisici, può essere ottenuta solo una stima del modello sismostratigrafico a causa del problema della non univocità.



La gamma di frequenza è rappresentata sul grafico della velocità di fase da linee nere (mostrate alla pagina precedente nel grafico 4) con pendenze che corrispondono alle lunghezze d'onda minima e massima. La curva di dispersione si presenta interpretabile sino a frequenze di circa 40-50 Hz.

Rigidità sismica (R)

La rigidità sismica è un parametro legato all'amplificazione sismica locale; tanto più alto risulta R tanto minore sarà l'incidenza del danno dovuto al sisma;

$$R = \gamma \cdot V_s$$

- γ = peso di volume naturale
- Vs = Velocità di taglio.

Frequenza fondamentale di Nakamura (F_0)

In cui:

$$F_0 = \frac{V_s}{4 \cdot H}$$



- H = spessore dello strato.
- Velocità delle onde longitudinali (Vs)

Categorie del sottosuolo di fondazione

Nei paragrafi che si riportano nel seguito sono riassunti i dati medi principali desunti dall'indagine. Nel calcolo della "Velocità equivalente" V_{seq} si è tenuto conto di tutti gli strati rilevati nei profili completi riportati in precedenza. La V_{seq} rappresenta la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s(strato)}}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h_{(strato)}$ e dalla velocità delle onde S $V_{s(strato)}$.

Per H si intende la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs 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_{seq} è definita dal parametro Vs30, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il parametro V_{seq} consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018 e sono riportate nella tabella che segue.

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE SECONDO LE NTC DEL 2018

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.



RISULTATI DELLE INDAGINI SISMICHE

L'analisi del profilo sismico per il calcolo delle Vs equivalenti nelle due sponde del torrente è stata effettuata utilizzando un modello composto da 9 sismostrati, di seguito rappresentati in tabella con delle indicazioni di massima della stratigrafia riscontrata.

Stratigrafia Vs MASW								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	Vs (m/s)	γ_1 (kN/m ³)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Basamento lapideo alterato	406	19,3	7837	173	0,017
2	3,7	2,1		317	18,1	5752	166	0,026
3	6,3	2,5	Basamento lapideo	505	20,4	10294	316	0,020
4	9,2	2,9		625	21,5	13438	453	0,019
5	12,5	3,3		534	20,7	11038	441	0,025
6	16,2	3,7		686	22,0	15096	635	0,022
7	20,4	4,2		636	21,6	13734	668	0,026
8	25	4,6		611	21,4	13062	703	0,030
9	-	-		669	21,9	14630	-	-

L'indagine sismica MASW eseguita non ha riscontrato la presenza di un substrato rigido con Vs>800 m/s entro i primi 30 m di profondità; pertanto, la velocità della Vs equivalente è stata calcolata utilizzando le Vs misurate fino alla profondità di 30 m, coerentemente alle prescrizioni delle NTC 2018.

Tabella Vs equivalente MASW

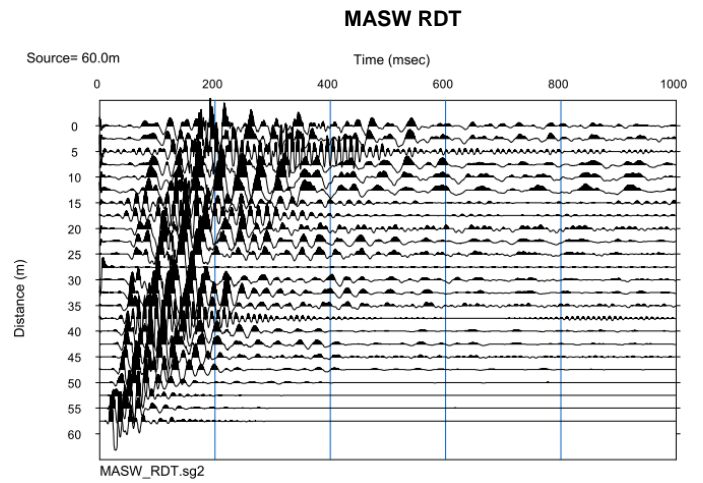
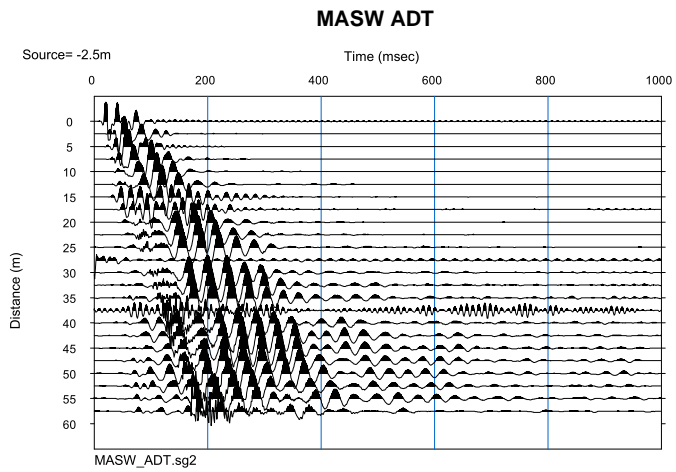
Denominazione	Vs equivalente	Categoria
MASW	560 m/s	B

Resta sempre in capo al progettista l'utilizzo della categoria di sottosuolo di riferimento da utilizzare in funzione delle scelte progettuali.

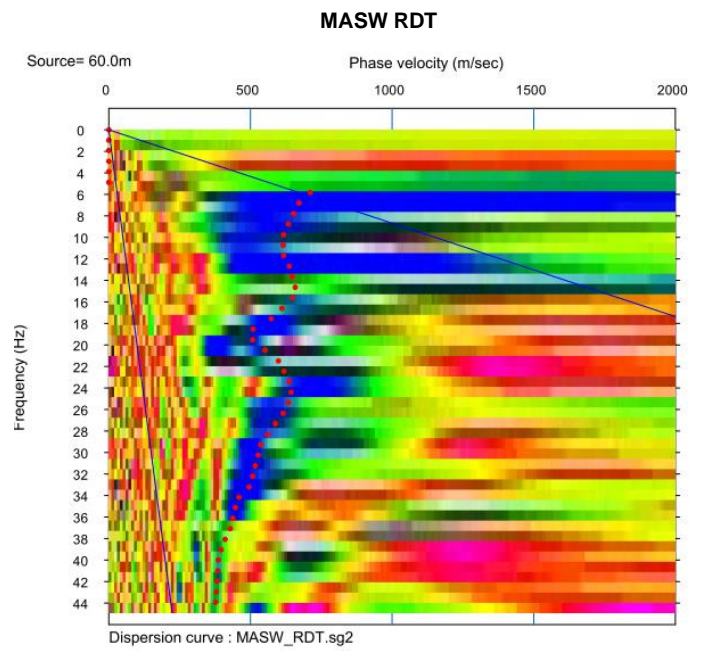
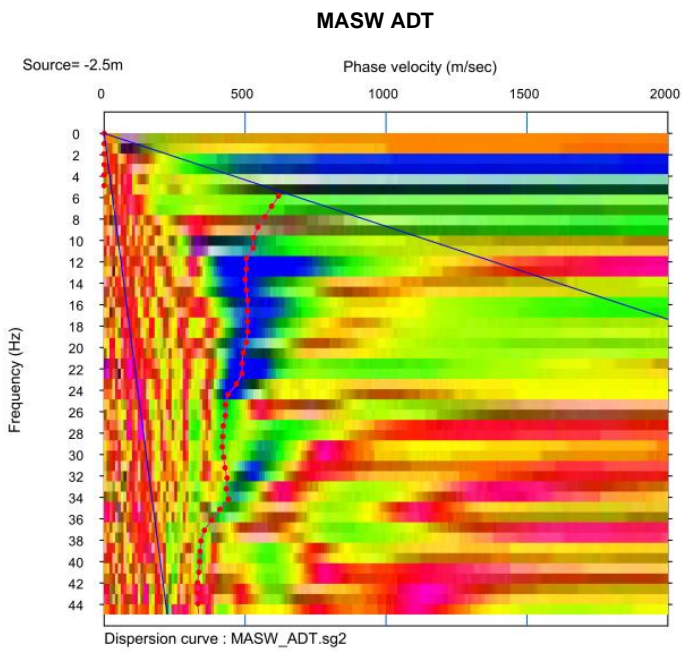
¹ Keceli (2012) $\gamma = 4,3 \cdot Vs^{0,25}$



Sismogrammi MASW



Spettri di dispersione MASW

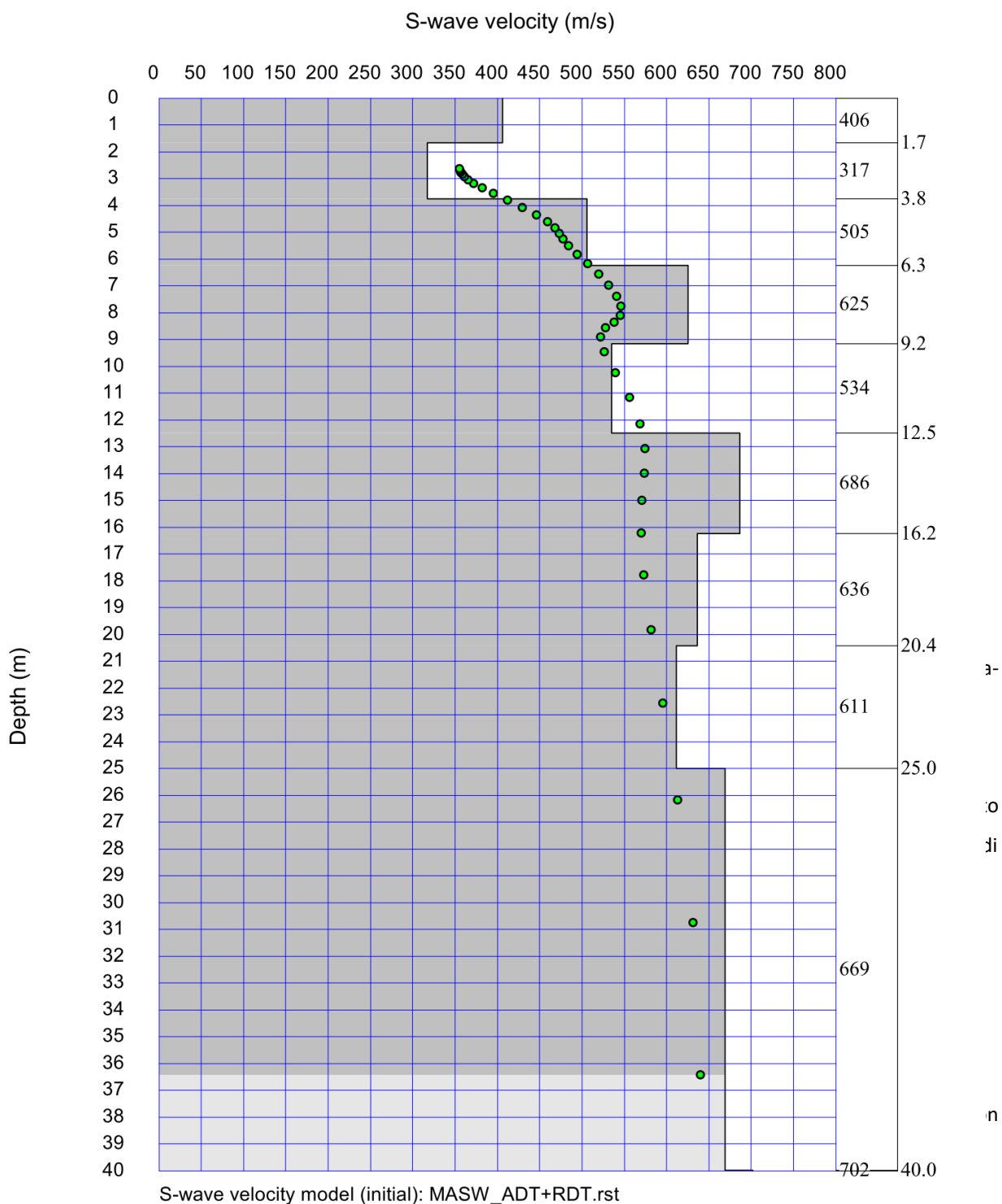




Profilo Vs MASW

Nei profili MASW viene rappresentato la variazione della velocità delle Vs alle diverse profondità d'indagine. La successione di pallini verdi indica la velocità delle Vs nella distribuzione spettrale, nonché l'effettiva profondità di investigazione raggiunta.

La stratigrafia è stata ottenuta mediando i risultati ottenuti dalle due battute sismiche.



² Tratto da "Stima dei parametri geotecnici in geofisica applicata" di Roccaforte-Cucinotta – Ed. Dario Flaccovio



Portanza

La capacità portante dei terreni di fondazione (q_{ult} in kPa) in funzione di V_s si può calcolare secondo Keceli (2012)

$$q_{ult} = 0,43 \cdot V_s^{1,25}$$

il carico ammissibile si stima in base ad un fattore di sicurezza F_s applicato nella formula precedente che porta:

$$q_{amm} = 0,123 \cdot V_s^{1,25}$$

per $V_s < 400$ m/s

$$q_{amm} = 0,143 \cdot V_s^{1,25}$$

400 m/s < V_s < 700 m/s

MASW 1

P	Vs	φ_{min}	φ_{max}	Cu	q_{ult}	q_{amm}
[m]	[m/s]	[°]	[°]	kPa	[kN/m²]	[kN/m²]
1.7	406	48,6	54,8	422	784	261
3.7	317	43,0	49,2	250	575	191
6.2	505	54,1	60,3	667	1029	342
9.2	625	60,1	66,3	1045	1344	447
12.5	534	55,6	61,8	751	1104	367
16.2	686	62,8	69,0	1272	1510	502
20.4	636	60,6	66,8	1084	1373	457
25	611	59,4	65,6	997	1306	434
-	669	62,1	68,3	1206	1463	487



RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE

Allo scopo di fornire ulteriori parametri utili per la caratterizzazione stratigrafica del sito in studio³, nei punti di esecuzione delle MASW 2 e è stata anche eseguita una analisi a rifrazione semplificata con l'esecuzione di una battuta in corrispondenza del primo geofono. Infatti, mediante l'analisi dei primi arrivi è possibile elaborare una sismostratigrafia mediante onde Vp, con la semplificazione di una stratigrafia piano parallela.

La massima profondità di indagine è stata assunta pari a circa 20 m.

Tempi primi arrivi ADT

Geofono (n°)	Distanza (m)	Tempo (ms)
1	0	0,1
2	2,5	10,3
3	5	15,6
4	7,5	19,2
5	10	22,8
6	12,5	29,2
7	15	30,3
8	17,5	35,0
9	20	38,4
10	22,5	38,9
11	25	44,5
12	27,5	46,4
13	30	48,6
14	32,5	49,2
15	35	48,9
16	37,5	50,0
17	40	52,3
18	42,5	52,8
19	45	56,2
20	47,5	56,7
21	50	57,8
22	52,5	57,3
23	55	59,5

Tempi primi arrivi RDT

Geofono (n°)	Distanza (m)	Tempo (ms)
1	0	0,1
2	2	6,1
3	4	12,8
4	6	17,0
5	8	20,6
6	10	22,2
7	12	25,0
8	14	26,4
9	16	27,5
10	18	29,2
11	20	30,0
12	22	32,2
13	24	33,9
14	26	34,5
15	28	35,3
16	30	35,9
17	32	37,0
18	34	37,8
19	36	39,2
20	38	40,0
21	40	41,7
22	42	42,8
23	44	43,9

³ $V_x = m_x = d_x - d_0 / t_x - t_0$

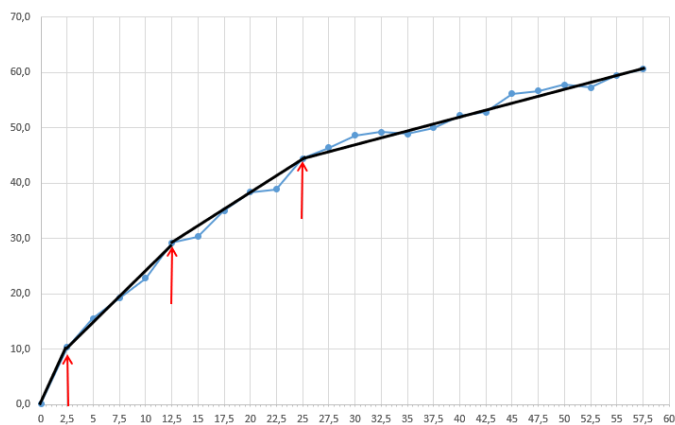
V_x = velocità dell'orizzonte sismico; m = coefficiente angolare curva di interpolazione lineare della dromocrona di riferimento; d_0 e d_x distanze geofoniche iniziale e finale di registrazione della dromocrona di riferimento; t_0 e t_x tempi di ritardo iniziale e finale della dromocrona di riferimento.

$H_x = d_x / 2 \cdot (V_x - V_0 / V_x + V_0)^{0.5}$

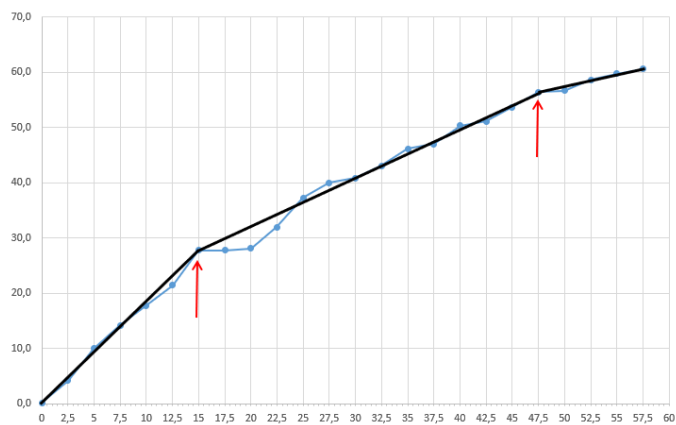
H_x = spessore dell'orizzonte sismico; d_x distanza geofonica al punto di "ginocchio"; V_x e V_0 velocità del primo e secondo orizzonte sismico.



Dromocrona sismica rifrazione ADT



Dromocrona sismica rifrazione RDT



Stratigrafia interpretata

Tipologia substrato interpretato	Velocità Vp (m/s)	Profondità strato (m)
Suolo piuttosto addensato	243	0,0 – 0,8
Basamento litoide alterato	537	0,8 – 4,0
Basamento litoide massivo	976	4,0 – 15,2
Basamento litoide molto massivo	2200	15,2 –



MODULI DINAMICI

Per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici, può essere utile fornire ulteriori parametri che le prove eseguite sono in grado di ricavare, oltre ai dati delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nel sottosuolo. I moduli elastici dinamici del terreno possono infatti contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte di manufatti sul terreno di fondazione.

Le principali costanti elastiche legate alle velocità di propagazione delle onde sismiche sono:

Modulo di Young (E): esprime la resistenza di un corpo alla deformazione lineare quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o compressione, esso è pari a:

$$E = V_s^2 \rho \cdot \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

Modulo di Taglio o di Rigidità (G): esprime la resistenza di un corpo alle variazioni lineari di forma quando lo si sottopone ad uno sforzo di taglio puro, esso è pari a:

$$G = \rho V_s^2$$

Modulo compressibilità volumetrica (E_v): esprime la resistenza di un corpo alla deformazione volumetrica quando lo si sottopone ad uno sforzo di dilatazione o compressione, esso è pari a:

$$E_v = \rho \cdot \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

Coefficiente di Poisson (ν): esprime la misura della deformazione totale subita da un corpo, esso è pari a:

$$\nu = 0.5 \frac{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Il coefficiente di Poisson è fondamentale; esso è un parametro adimensionale che offre un criterio di valutazione della deformazione totale che può subire una roccia o un terreno, ed è legato al grado di litificazione, alla porosità ed al grado di saturazione della roccia stessa.

In linea di massima, una roccia massiccia può avere un rapporto di Poisson da circa 0.15 sino a 0.30 (valori tipici attorno a 0.25), mentre materiali non consolidati (silt ed argille) hanno tipicamente valori tra 0.35 e 0.45. Le sabbie presentano valori molto variabili (da 0.3 sino quasi al valore massimo teorico di 0.5). L'idea di massima è che tanto più "sciolto" ed "inconsistente" è un materiale tanto più alto è il valore del modulo di Poisson (sino appunto al massimo teorico di 0.5 – valore valido per i fluidi).



Tabelle dei moduli dinamici calcolati

MASW 1

P [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	E [MPa]	G [MPa]	Ev [MPa]	v
1.7	240	300	949	164	-	-
3.7	540	317	460	186	292	0,24
6.2	970	505	1393	530	1249	0,31
9.2	970	625	1961	856	921	0,15
12.5	970	534	1542	601	1182	0,28
16.2	970	686	2111	1056	703	0,00
~ 20	2200	636	2591	891	9470	0,45

Villacidro 26/01/2022

