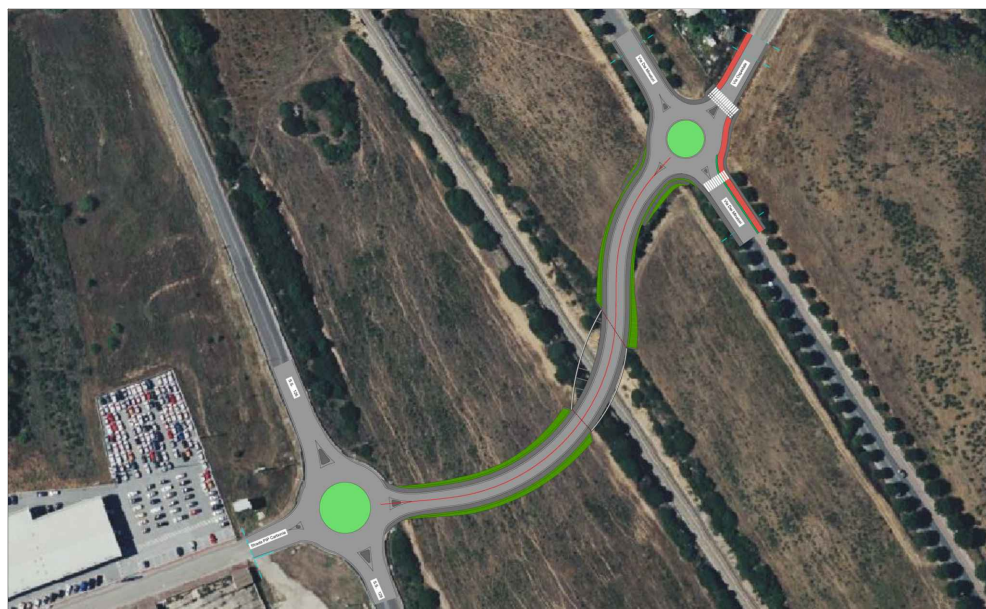




UNIONE DEI COMUNI DEL SULCIS

Progetto di completamento dei lavori di sistemazione delle intersezioni a rotatoria sulla S.S.126 "Sud-Occidentale Sarda". Strada di collegamento PIP - Via dei Minatori - Via Ospedale (1° Lotto funzionale) - Comune di Carbonia
CIP: 18STR01.00 - CUP I41B19000060006

PROGETTO DEFINITIVO



Codice Elaborato

SIC-D-A-0-4-0

Data

05/12/2025

Scala

Descrizione

Studio di compatibilità geologica-geotecnica

aggiornamenti						
	05/12/2025	0	Emissione	S.D.	P.P.M.	P.P.M.
	data	rev	descrizione	dis.	verif.	appr.

Raggruppamento Temporaneo di Professionisti:

Ing. Pietro Paolo Mossone (capogruppo)

Ing. Silvia Sulis

Geol. Stefano Demontis

Ing. Martina Lauretta Madeddu

Il RUP:

Ing. Mario Mammarella

Viale Monastir, 176 09122 Cagliari
Tel: +39 393 8955529 - e-mail: pietro.mossone@grandistrutture.com

INDICE

1	PREMESSA.....	2
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	5
3	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	7
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	8
5	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	12
6	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	13
7	CAMPAGNA D'INDAGINI GEOGNOSTICO GEOFISICHE E PROVE DI LABORATORIO	15
8	RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE.....	19
8.1	PROVE MASW	20
8.2	MASW M1.....	22
8.3	RIFRAZIONE R1.....	23
8.4	RIFRAZIONE R2	24
8.5	RIFRAZIONE R3	24
8.6	RIFRAZIONE R4.....	25
8.7	TOMOGRAFIA ELETTRICA	25
9	MODELLO GEOLITOLOGICO	27
10	INQUADRAMENTO DELL'AREA RISPETTO AL PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO	29
11	CONCLUSIONI.....	33

1 PREMESSA

Il progetto si riferisce alla realizzazione in Comune di Carbonia di una bretella di collegamento tra la S.S. 126 e la via dell'Ospedale, con innesto diretto alla rotatoria di via della Stazione. Data la presenza della linea ferroviaria Cagliari – Carbonia che corre parallelamente alla S.S. 126, sarà da prevedersi un'opera di scavalco che garantisca adeguato franco per il sottopasso dei treni, nonché la possibilità di realizzazione del doppio binario e della elettrificazione della rete.

Il presente studio di compatibilità geologica-geotecnica sviluppa l'analisi, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati geologici e geotecnici acquisiti in sito, derivanti dalla campagna geognostica e geofisica eseguita nell'area di intervento.

Le modalità d'indagine, l'analisi dei dati acquisiti e l'elaborazione del modello geologico rispettano i contenuti e le prescrizioni del Capitolo 6 "Progettazione Geotecnica" Paragrafo 6.2.1 "Caratterizzazione e modellazione geologica del sito" del Testo Unico sulle Costruzioni D.M. 17/01/2018.

Gli obiettivi principali della campagna d'indagini in sito e dell'esecuzione delle prove di laboratorio sui campioni di terreno sono stati quelli di:

1. avvalorare e/o affinare le informazioni geologiche rispetto a quelle desunte dagli studi preliminari;
2. approfondire e localizzare le indagini integrative lungo i settori dell'areale interessati dalle fondazioni più significative previste dal progetto ingegneristico.

Per la redazione della presente relazione si è fatto riferimento a precedenti lavori eseguiti nell'area oggetto dell'intervento e nelle sue adiacenze.

Nella Figura 1 si riporta l'ubicazione delle indagini eseguite, consistenti in:

- n. 2 sondaggi a carotaggio continuo verticali della profondità massima di 20 m;
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo verticale della profondità di 5 m.

Nel corso dei sondaggi sono state eseguite n. 5 prove penetrometriche S.P.T. e sono stati prelevati n.12 campioni geotecnici. Detti campioni sono stati inviati al laboratorio Geosystem e sono stati sottoposti a prove geotecniche di laboratorio.

Oltre ai campioni "geotecnici" sono stati prelevati n.9 campioni "ambientali" che sono stati inviati al laboratorio Leonardi per l'esecuzione delle analisi chimiche per la caratterizzazione delle terre e rocce da scavo.

Per quanto riguarda le indagini geofisiche sono state eseguite le seguenti prospezioni:

- n. 4 stendimenti di tomografia sismica a rifrazione;
- n. 1 stendimento superficiale di tipo M.A.S.W.;

- n. 2 stendimenti di tomografia elettrica.

Si rimanda agli elaborati delle indagini geognostiche e ai relativi allegati per la descrizione di dettaglio delle indagini eseguite.

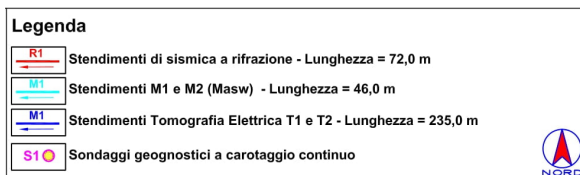


Figura 1 - Planimetria ubicazione indagini geognostiche

I risultati degli studi ed indagini svolti sono stati utilizzati oltre che per la definizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di sedime delle fondazioni, anche per l'individuazione e la mappatura delle zone soggette a pericolo di frana per fenomeni gravitativi denominati "SINKHOLE" (Hgsh) secondo il protocollo tecnico dell'Autorità di Bacino approvate dal comitato istituzionale con deliberazione n. 10 del 14 maggio 2025.

L'art.31 bis (già art.31 c.8) delle N.A. del PAI del 14/05/2025 riporta:

1. *Sono identificate quali aree (Hgsh) quelle aree in cui si siano manifestati in passato dissesti gravitativi denominati Sinkhole per crollo e subsidenza indotti sia da cavità sotterranee naturali, carsiche o di dissoluzione sia da attività antropiche o estrattive.*
2. *Sono identificate quali aree (Hgsh) quelle aree potenzialmente soggette a fenomeni gravitativi denominati Sinkhole per crollo e subsidenza indotti sia da cavità sotterranee naturali, carsiche o di dissoluzione sia da attività antropiche o estrattive.*
3. *Nelle aree di cui ai commi 1 e 2 è consentita la realizzazione di nuove costruzioni, ristrutturazioni, restauro conservativo del patrimonio edilizio, pubblico e privato e delle infrastrutture a rete o puntuali pubbliche o di interesse pubblico, previo studio di compatibilità dell'area da effettuarsi, a cura del proponente l'intervento, con l'estensione e le modalità previste nel protocollo tecnico "tipo" approvato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino. Gli interventi da realizzarsi nell'area, potranno effettuarsi solo a seguito dell'approvazione, da parte del soggetto competente ai sensi della L. R. n. 33/2014, dello studio di cui sopra che escluda la presenza del fenomeno Sinkhole o che, laddove accerti le condizioni predisponenti il fenomeno, dimostri la realizzabilità dell'intervento contestualmente all'esecuzione delle opere di salvaguardia eventualmente necessarie.*
4. *In ogni caso, le aree caratterizzate da fenomeni gravitativi denominati Sinkhole permangono assoggettate al vincolo di pericolosità che potrà essere declassato, con successiva variante al PAI, solo a seguito dell'approvazione di studi di cui al comma 3 su congrue estensioni contigue di territorio o di interventi di mitigazione effettuati e collaudati.*

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

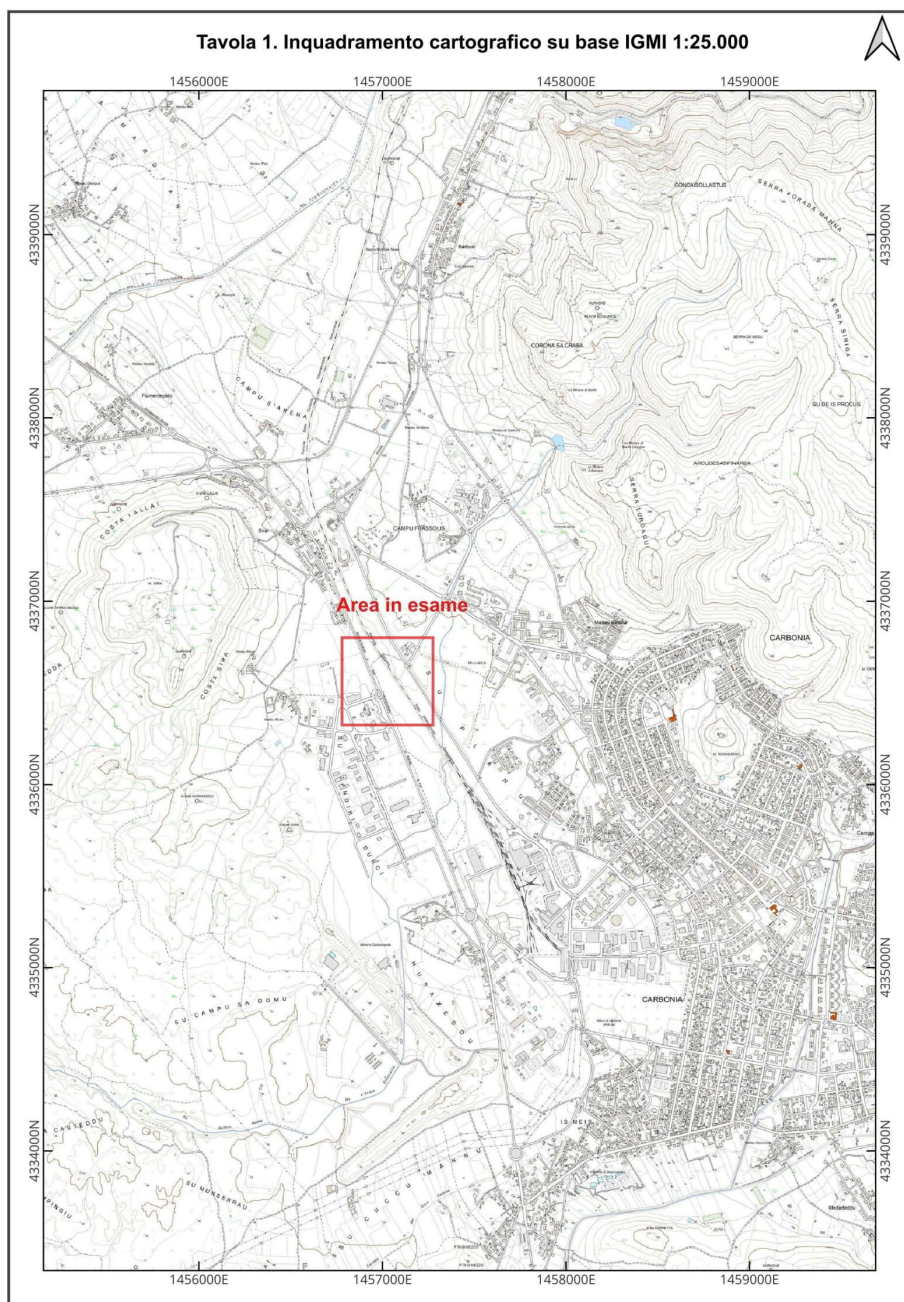
- Eurocodice 8 – Parte 1 (EN 1998-1) e Parte 5 (EN 1998-5)
- Eurocodice 7.1 (1997) – Progettazione geotecnica – Parte I: Regole Generali – UNI
- Eurocodice 7.2 (2002) – Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002) – UNI
- Eurocodice 7.3 (2002) – Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita con prove in sito (2002) - UNI
- D.M. 17.01.2018: Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”
- CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici “Istruzioni per l’applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008. Circolare 2 febbraio 2009”
- D.M. 14.01.2008: “Norme Tecniche per le Costruzioni”
- D.M.LL.PP. 11/0. 20243/88: “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”
- OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006: "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"
- OPCM 3 maggio 2005: Ulteriori modifiche ed integrazioni all’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche” (Ordinanza n. 3431) – (G.U. n. 107 del 10 maggio 2005 – Suppl. Or. n. 85)
- Ordinanza n. 3316 del 2 ottobre 2003: Modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003.
- Ordinanza PCM n. 3274 del 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”, All. 1-2-4
- Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche in Sito A.G.I., 2024;

- D.P.R. 120 del 13 giugno 2017: “Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell’art.8 del decreto legge 12 settembre 2014, n.133, convertito, con modificazioni dalla legge 11 novembre del 2014, n.164;
- Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (P.A.I.), redatto ai sensi della legge n. 183/1989 e del decreto-legge n. 180/1998, e approvato con decreto del Presidente della Regione Sardegna n. 67 del 10/07/2006;
- Allegato A alla delibera n.9 del 30.06.2008 della R.A.S. Protocollo tecnico “tipo” di cui all’art.31 c.8 delle N.A. del PAI – Indicazioni per le indagini e studi da effettuare nelle zone mappate a pericolosità di frana per fenomeni di Sinkhole.

3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto della presente indagine è ubicata a ovest del centro abitato di Carbonia lungo la S.S. 126 e ricade:

- nel foglio n° 564030 della C.T.R. in scala 1:10.000
- nell'omonima tavoletta I.G.M. Foglio n°564 Sez. I in scala 1:25.000
- nella carta geologica del bacino carbonifero del Sulcis in scala 1:25.000 redatta dalla Carbosulcis S.p.a.



4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il sito in esame ricade in una estesa depressione delineata da strutture tettoniche con direzione prevalente NNW-SSE e, subordinatamente, circa est-ovest, le quali hanno creato una morfologia a blocchi ribassati, di semigraben, su cui si sono depositati, successivamente, i sedimenti eocenici e le vulcaniti oligo-mioceniche.

I bordi della depressione sono delineati dai rilievi carbonatici cambrici e dai rilievi scistosi del Paleozoico.

Più in particolare i terreni paleozoici affiorano a est e a nord dell'abitato di Carbonia e sono costituiti da:

- Formazione di Nebida costituita da arenarie con lenti calcaree (Cambrico Inferiore);
- Formazione di Gonnese costituita da dolomie e calcari, sede delle maggiori concentrazioni minerarie dell'isola (Cambrico Inferiore);
- Formazione di Cabitza costituita da calcari nodulari e argilliti varicolori (Cambrico Medio) (Cocozza, 1979).

Alla fine del Cambrico questi sedimenti sono emersi dal mare dopo essere stati deformati e dislocati dai prodromi del ciclo orogenetico caledonico che vanno sotto il nome di fase sarda.

Dopo un lungo intervallo di tempo durante il quale i calcari subiscono una carsificazione più o meno spinta con accumulo di breccie di dissoluzione e di crollo, spesso mineralizzate e incrostazioni superficiali di quarzo, nell'Ordoviciano si è avuta una nuova trasgressione marina, con deposizione di conglomerati, arenarie, argille e, quindi, nel Siluriano, argilliti e liditi grafitose a Graptoliti con lenti di calcari a cefalopodi, depositi prevalentemente in condizioni di bacino euxinico.

Nella zona nord orientale del bacino è seguita la messa in posto di argilliti a pteropodi e calcari a Clymenie nel Devoniano inferiore.

Tutte queste litofacies sembrano connesse con una manifesta tettonica distensiva sinsedimentaria caledonica che a più riprese ha sbloccato in vario modo la piattaforma e ha permesso la risalita di rocce eruttive, parzialmente subaeree, durante l'Ordoviciano Superiore e il Siluriano (Carmignani et al., 1978; Minzoni, 1981; Barca et al.).

Segue quindi, tra il Devoniano e il Carbonifero inferiore, la messa in posto di una formazione costituita da una monotona alternanza di arenarie, siltiti e argilliti anchimetamorfiche, il cosiddetto "Postgotlandiano", che ricopre tettonicamente i sedimenti più o meno piegati e scagliati del Devoniano, Siluriano e Ordoviciano (Carmignani).

Tutti i sedimenti precedenti, che in parte avevano già subito i riflessi del ciclo orogenetico caledoniano nelle aree poste più a settentrione, vengono ripiegati dal corrugamento ercinico, al quale è da ricollegare la messa

in posto della massa granitica tardo orogenetica, con annesse fasce termometamorfiche e corteo filoniano, sviluppati soprattutto sui lati nord e nord orientale.

Nelle depressioni di questi nuovi rilievi montuosi si localizzano, nel Carbonifero superiore-Permiano inferiore, bacini lacustri in cui vanno ad accumularsi i materiali del loro smantellamento (bacino di San Giorgio, sud di Iglesias) e localmente, nella zona di Cala di Piombo, anche vulcaniti riolitiche e riodacitiche legate alla fase distensiva postorogenetica.

Questa fase continentale, che localmente continua anche nel Mesozoico, porta alla peneplanazione più o meno spinta di estese aree e all'instaurarsi di un intenso carsismo sui rilievi calcarei, facilitato anche dalle favorevoli condizioni climatiche presenti nella regione in questo periodo (Cocozza et al.,1974).

Bisogna arrivare fino al Paleocene superiore per una nuova trasgressione marina penetrata all'interno fino ai primi rilievi paleozoici, che delimitano verso nord e nord est il cosiddetto "bacino lignitifero del Sulcis"; in questo periodo si è avuta la deposizione nella depressione tettonica del Cixerri di calcari marnosi, marne, argille palustri d'acqua dolce, con intercalati banchi di carbone ("Formazione del Produttivo"), calcari a macroforaminiferi (Miliolidae) con sottostanti conglomerati basali ("Formazione del Miliolitico"). Paleocene superiore - Eocene inferiore.

Tale formazione ha direzione NW-SE e affiora prevalentemente nell'area di Bacu Abis, Tanas, Monte Rosmarino e Serbariu.

Questa successione paralicca, sedimentatasi durante una intensa tettonica disgiuntiva che portò allo sbloccamento e al rapido sprofondamento a gradinata verso ovest del bacino, è ricoperta dalla Formazione del Cixerri costituita da depositi continentali con prevalenza di facies fluvio deltizie e subordinate facies lacustri e lagunari, depositatasi nell'Eocene.

Detta formazione è costituita da arenarie policrome, spesso conglomeratiche e con elementi anche di notevole volume, e da marne ed argille siltose, talora ben stratificate

Nell'Oligocene superiore si è avuta la messa in posto di lave calco alcaline, a partire dal bordo della fossa del Cixerri, che si rinvengono a sud di Carbonia. Dette lave, accompagnate dai relativi tufi e brecce vulcaniche, si presentano sia sotto forma di ammassi, sia sotto forma di colate, localmente ignimbriche e, talora, attraversano la formazione del Cixerri.

Nel Pleistocene si è avuta la messa in posto dei seguenti sedimenti:

- depositi eolici sabbiosi talvolta a elevata componente limosa, moderatamente addensati e talora cementati, di colore giallastro-rossiccio, generalmente ben stratificati. Affiorano a W del territorio comunale quasi al contatto con il confine comunale;

- depositi alluvionali ciottolosi-sabbiosi a moderata componente limosa, poligenici ed eterometrici incoerenti, ben classati, talora mediamente cementati e addensati con intercalazioni di livelli sabbioso-limosi o limoso-argillosi. Affiorano in modo marcato nell'area a W del territorio comunale e coprono con direzione circa NS, una porzione di territorio che si estende dall'abitato di Cortoghiana a Arcu Sa Tiria.

Per ciò che concerne i depositi olocenici, si rinvencono ai piedi dei rilievi con estensione sulle zone pianeggianti circostanti: si tratta sia di detriti di falda che di alluvioni ciottoloso-sabbiose-argillose, che assumono colorazione rossastra nei termini più antichi, terrazzati.

Sono presenti, inoltre, nel territorio comunale in modo sparso e soprattutto in prevalenza dei territori interessati da coltivazioni minerarie discariche di R.S.U., discariche industriali quali Carbosulcis, Ecodump e più a nord parte della discarica di Genna Luas). Tra le discariche minerarie più imponenti si segnalano quelle della miniera grande di Serbariu in adiacenza all'area dell'intervento in progetto, a Carbonia e quella di Bacu Abis.

STUDIO DI COMPATIBILITÀ GEOLOGICA-GEOTECNICA

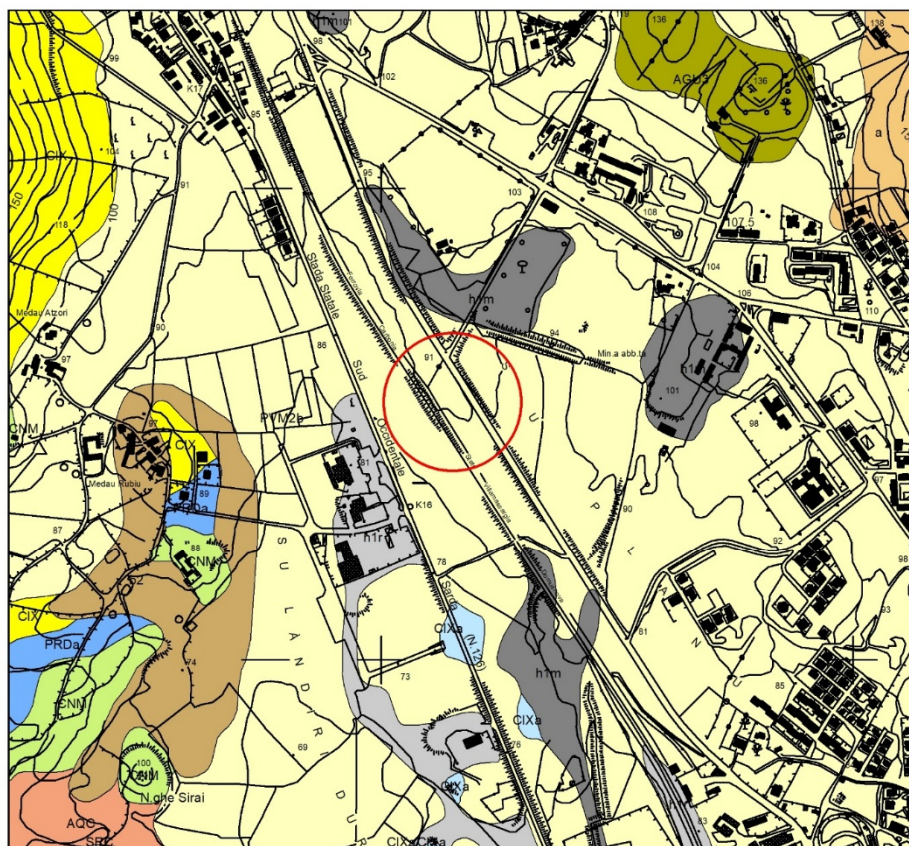
Progetto di completamento dei lavori di sistemazione delle intersezioni a rotatoria sulla S.S.126 "Sud-Occidentale Sarda". Strada di collegamento PIP - Via dei Minatori - Via Ospedale (1° Lotto funzionale) - Comune di Carbonia

CIP: 18STR01.00 - CUP I41B19000060006

CARTA GEOLOGICA

- Stralcio da "Carta Geologica di base della Sardegna in scala 1:25.000"
- CTR Sardegna: Foglio 564030

SCALA 1:10.000



Legenda

- h1r - Depositi antropici. Materiali di riporto e aree bonificate. OLOCENE
- h1m - Depositi antropici. Discariche minerarie. OLOCENE
- a - Depositi di versante. Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE
- b2 - Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOC.
- PVM2b - Litof. nel Subs. di Portoscuso (SINTEMA DI P.VESME). Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali. PLEIST. SUP.
- CIX - FORMAZIONE DEL CIXERRI. Argille siltose di colore rossastro, arenarie quarzoso-feldspatiche e conglomerati. EOCENE MEDIO - ?OLIGOCENE
- CIXa - Litofacies nella FORMAZIONE DEL CIXERRI. Breccie di quarzo e liditi ben cementate e noduli ferruginosi alla base. EOCENE MEDIO - ?OLIGOCENE
- AQC - DACITI DI ACQUA SA CANNA. Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbritica di colore da grigio chiaro fino a rosato - MIOCENE INF.
- CNM - DACITI DI CORONA MARIA. Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbritica a chimismo dacitico - MIOCENE INF.
- PRDa - Litofacies nelle ANDESITI DI CUCCURU PORCEDDUS. Breccie poligeniche, eterometriche, e arenarie vulcanoclastiche; subordinati tufi e tufi - MIOCENE INF.
- AGU3 - Membro di Medau Murtas (FORMAZIONE DI MONTE ARGENTU). Metarenarie e metasiltiti viola e verdi - ORDOVICIANO ?MEDIO-SUP.

Figura 3 - Stralcio Foglio Carta geologica di base della Sardegna in scala 1:25.000

5 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Dal punto di vista morfologico il Sulcis presenta un rilievo poco marcato, con morfologie generalmente dolci, in particolare in corrispondenza degli argilloscisti, leggermente più accentuato nelle arenarie, nella "puddinga ordoviciana e nei graniti. Nelle zone calcaree e dolomitiche si hanno invece forme talora aspre, con pareti verticali.

L'area risente di un'erosione protrattasi per tempi molto lunghi, culminata localmente con una peneplanazione e successiva ingressione triassica, seguita da dislocazioni che non hanno tuttavia cancellato la morfologia antecedente ad ampi penepiani, presenti in particolare a sud della miniera di San Giovanni.

Le valli principali sono quelle di Iglesias e del Rio Mannu di Fluminimaggiore, entrambe a direzione meridiana, impostate la prima nella sinclinale di Iglesias e la seconda sul lato nord del nucleo di arenarie Cambriche. Le valli minori sono poi conseguenti ai lineamenti tettonici E-W o li tagliano trasversalmente.

La ripresa, durante l'orogenesi alpina, delle direttrici tettoniche E-W e N-S ha determinato in particolare a sud e sud est dell'area in esame, la formazione di bacini subsidenti, riempiti da sedimenti eo-oligocenici e quaternari.

La forma predominante in tale area è quella tabulare, derivante dagli espandimenti ignimbrici, che si presentano con immersione verso S-W e inclinazione di circa 10°, disposti a blocchi su diverse quote, a gradinata. La morfologia cupoliforme delle lave andesitiche si rileva a sud dell'abitato di Carbonia, mentre le forme collinari caratterizzano i terreni della formazione del Cixerri.

La morfologia del territorio è segnata profondamente dall'attività mineraria con discariche sparse un po' dovunque, pozzi e laverie abbandonate e, soprattutto, laddove ci sono state coltivazioni a cielo aperto, profondi scavi.

6 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Il territorio del Sulcis è caratterizzato dalla presenza di diversi complessi idrogeologici ed in particolare:

- 1) Il complesso terrigeno inferiore, molto esteso e scarsamente permeabile, che costituisce la base dell'acquifero carbonatico, costituito dalla FORMAZIONE DI NEBIDA, formata da siltiti, argilliti e arenarie. A scala regionale il complesso deve considerarsi un impermeabile relativo caratterizzato da scarsa o nulla permeabilità per fessurazione; a scala locale sussiste una certa circolazione epidermica d'acqua che viene drenata quasi sempre dalle intercalazioni carbonatiche che costituiscono piccoli serbatoi che alimentano una miriade di sorgenti di portata limitata.
- 2) Il complesso carbonatico antico, che costituisce l'acquifero principale, comprende quattro diversi membri litostratigrafici: Dolomia rigata, Dolomia grigia, Calcare ceroide, Calcare nodulare. Mentre la Dolomia rigata è scarsamente permeabile, la Dolomia grigia e il Calcare ceroide, spesso in eteropia di facies, sono caratterizzati da elevata permeabilità per fessurazione e in subordine per carsismo. Il calcare nodulare segna il passaggio agli argilloscisti di Cabitza con una permeabilità decrescente.
- 3) Il complesso scistoso intermedio è costituito da argilloscisti policromi e siltiti varicolori del Cambrico medio, noti come ARGILLOSCISTI DI CABITZA, e costituisce una soglia di permeabilità all'acquifero carbonatico.
- 4) Il complesso terrigeno superiore comprende l'insieme dei terreni ordoviciani, conglomerato basale, argilloscisti arenacei, argilliti e siltiti ed è caratterizzato da scarsa o nulla permeabilità per fessurazione.
- 5) Il complesso magmatico e filoni del Paleozoico Superiore. Si distingue bassa permeabilità per fessurazione per graniti e porfidi, con circolazione idrica in corrispondenza dei corpi filoniani e delle discontinuità di natura tettonica.
- 6) Il complesso Carbonatico Superiore del Trias, formato da calcari, dolomie, brecce e conglomerati poligenici in giacitura orizzontale. Sono dotati di alto grado di permeabilità per fessurazione e carsismo.
- 7) Il complesso ercinico post triassico, comprende sia il "lignitifero" che la formazione del Cixerri, caratterizzati entrambi da bassa permeabilità per fessurazione.
- 8) Il complesso vulcanico oligomiocenico è caratterizzato da permeabilità medio-bassa per fessurazione.
- 9) Il complesso alluvionale quaternario è caratterizzato da elevata permeabilità per porosità negli orizzonti più grossolani e dilavati (alluvioni recenti), che diventa bassa negli orizzonti prettamente argillosi o in matrice argillosa (alluvioni antiche) e detriti di falda

STUDIO DI COMPATIBILITÀ GEOLOGICA-GEOTECNICA

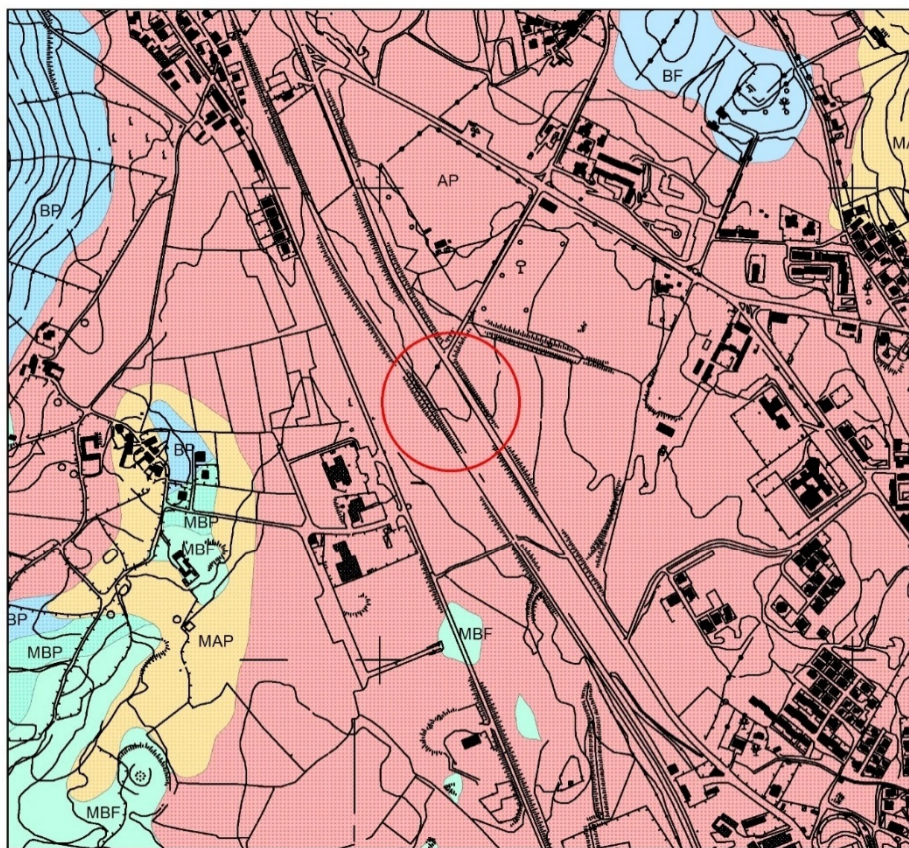
Progetto di completamento dei lavori di sistemazione delle intersezioni a rotatoria sulla S.S.126 "Sud-Occidentale Sarda". Strada di collegamento PIP - Via dei Minatori - Via Ospedale (1° Lotto funzionale) - Comune di Carbonia

CIP: 18STR01.00 - CUP I41B19000060006

CARTA DELLE PERMEABILITA'

- Stralcio da "Carta delle permeabilità dei substrati della Sardegna in scala 1:25.000"
- CTR Sardegna: Foglio 564030

SCALA 1:10.000



Legenda

- BF: Permeabilità bassa per fratturazione
- BP: Permeabilità bassa per porosità
- MBF: Permeabilità medio bassa per fratturazione
- MBP: Permeabilità medio bassa per porosità
- MF: Permeabilità media per fratturazione
- MCF: Permeabilità media per carsismo e fratturazione
- MP: Permeabilità media per porosità
- MAF: Permeabilità medio alta per fratturazione
- MACF: Permeabilità medio alta per carsismo e fratturazione
- MAP: Permeabilità medio alta per porosità
- ACF: Permeabilità alta per carsismo e fratturazione
- AP: Permeabilità alta per porosità
- Lg: Laghi e canali

Figura 4 -Carta delle permeabilità

7 CAMPAGNA D'INDAGINI GEOGNOSTICO GEOFISICHE E PROVE DI LABORATORIO

Come già esposto nell'introduzione, la campagna geognostico-geofisica è stata condotta tra il mese di aprile e maggio 2025.

Essa ha previsto l'esecuzione di:

- n. 2 sondaggi a carotaggio continuo verticali della profondità di 20 m;
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo verticale della profondità di 5 m.

Nel corso dei sondaggi sono state eseguite n. 5 prove penetrometriche S.P.T. e sono stati prelevati n.12 campioni geotecnici, di cui 5 campioni indisturbati Shelby e 7 campioni di carote di roccia. Detti campioni sono stati inviati al laboratorio Geosystem e sono stati sottoposti a prove geotecniche di laboratorio.

Oltre ai campioni "geotecnici" sono stati prelevati n.9 campioni "ambientali" che sono stati inviati al laboratorio Leonardi per l'esecuzione delle analisi chimiche per la caratterizzazione delle terre e rocce da scavo.

Per quanto riguarda le indagini geofisiche sono state eseguite le seguenti prospezioni:

- n. 4 stendimenti di tomografia sismica a rifrazione, lunghi 72 m;
- n. 1 stendimento superficiale di tipo M.A.S.W. lungo 48 m;
- n. 2 stendimenti di tomografia elettrica di lunghezza 235 m.

I campioni geotecnici sono stati sottoposti alle seguenti prove:

- n.5 granulometrie per setacciatura;
- n.5 limite liquido e limite plastico;
- n.1 indice di portanza C.B.R.;
- n.2 determinazione umidità naturale;
- n.2 determinazione peso di volume naturale;
- n.2 prove di taglio diretto;
- n.7 prove di compressione monoassiale su carote di roccia.

Nelle tabelle che seguono sono riepilogati i principali parametri ottenuti sia con le prove S.P.T. in situ che con le varie prove in laboratorio, mentre per ulteriori dettagli si rimanda agli allegati certificati di prova.

Tabella 1 - Riepilogo risultati prove SPT

Sondaggio	Profondità	Tipo litologico	SPT(colpi)	Nspt
S1	1,00	Limo argilloso sabbioso	11-19-23	42
S2	1,50	Ghiaia in matrice argillosa	11-18-22	40
S1	3,00	Limo argilloso	20-22-27	49
S2	3,00	Limo argilloso	Rifiuto	>100
S3	2,00	Sabbie fini	Rifiuto	>100

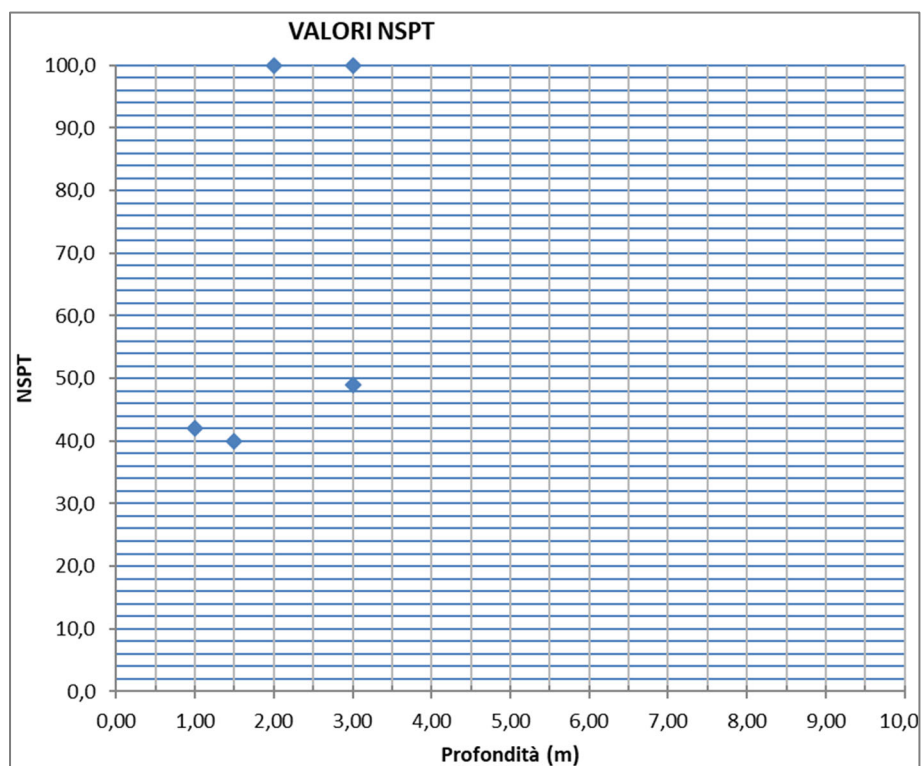
Figura 5 - Distribuzione dei valori di N_{SPT}

Tabella 2 - Prove di classificazione

ID sondaggio/campione	Prof. m da p.c.	Granulometria			LL %	IP	Class USCS	ClassUNI 11531
		2 mm	0,5 mm	0,06 Mm				
S1	0,00-1,00	72,27	65,69	44,10	38	19	SC	A6
S2	0,00-1,00	47,70	42,35	36,41	49	27	SC	A7-6
S3	0,00-1,00	85,74	76,88	42,77	26	12	SC	A6
S1	4,40-4,70	98,69	97,45	84,26	31	14	CL	A6
S2	2,60-2,90	90,79	82,44	73,52	25	9	CL	A4

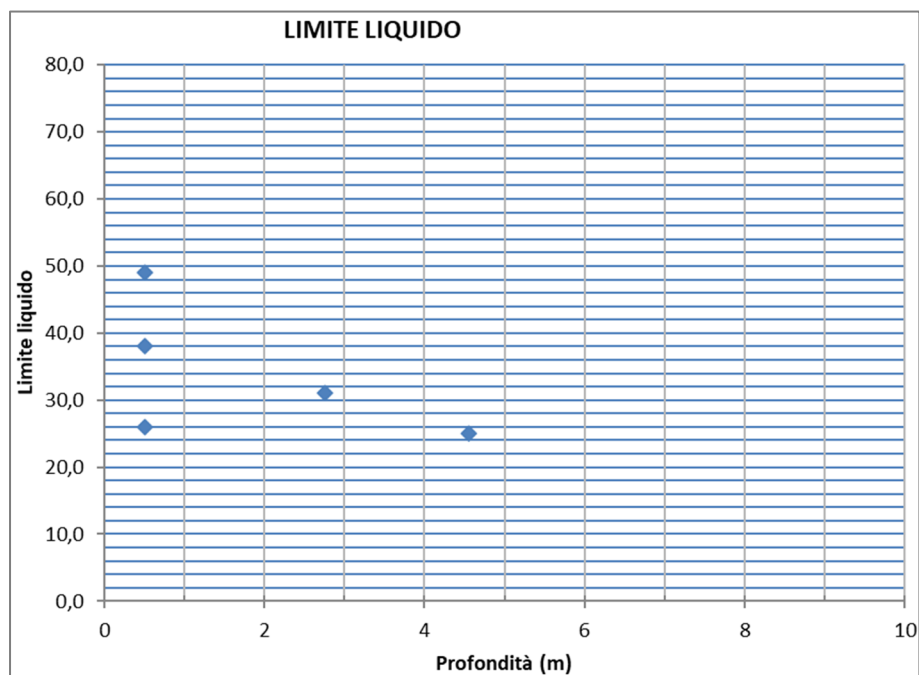


Figura 6 - Distribuzione dei valori del limite liquido

Tabella 3 - Prove di taglio diretto

ID sondaggio	Prof. m da p.c.	w _i	γ _n	P.P	Φ'	C'
		%	KN/m ³	KPa	°	KPa
S1	4,40-4,70	15,70	20,31	>450	22,4	25
S2	2,60-2,90	12,32	20,10	>450	25,8	43

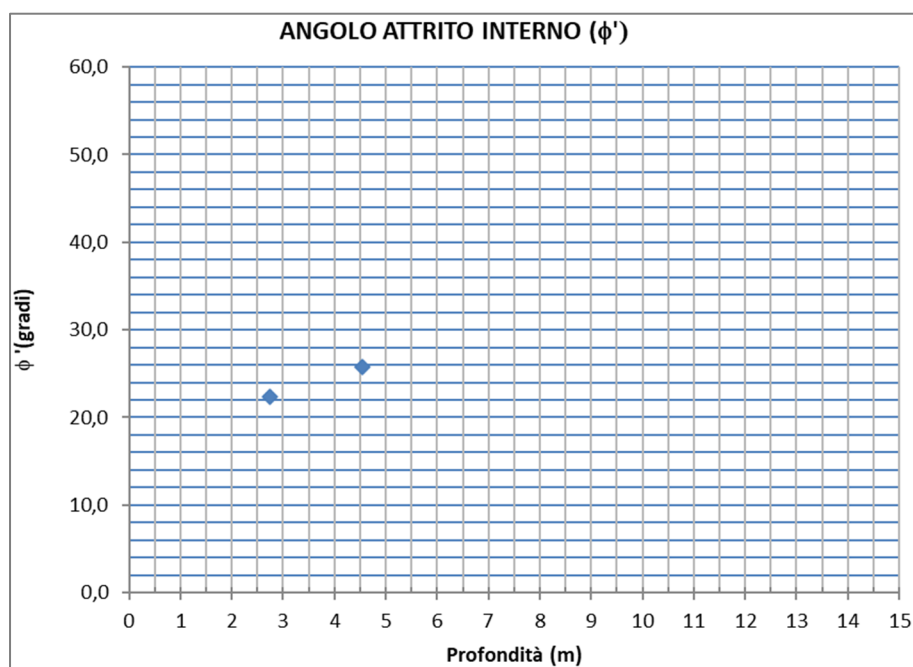
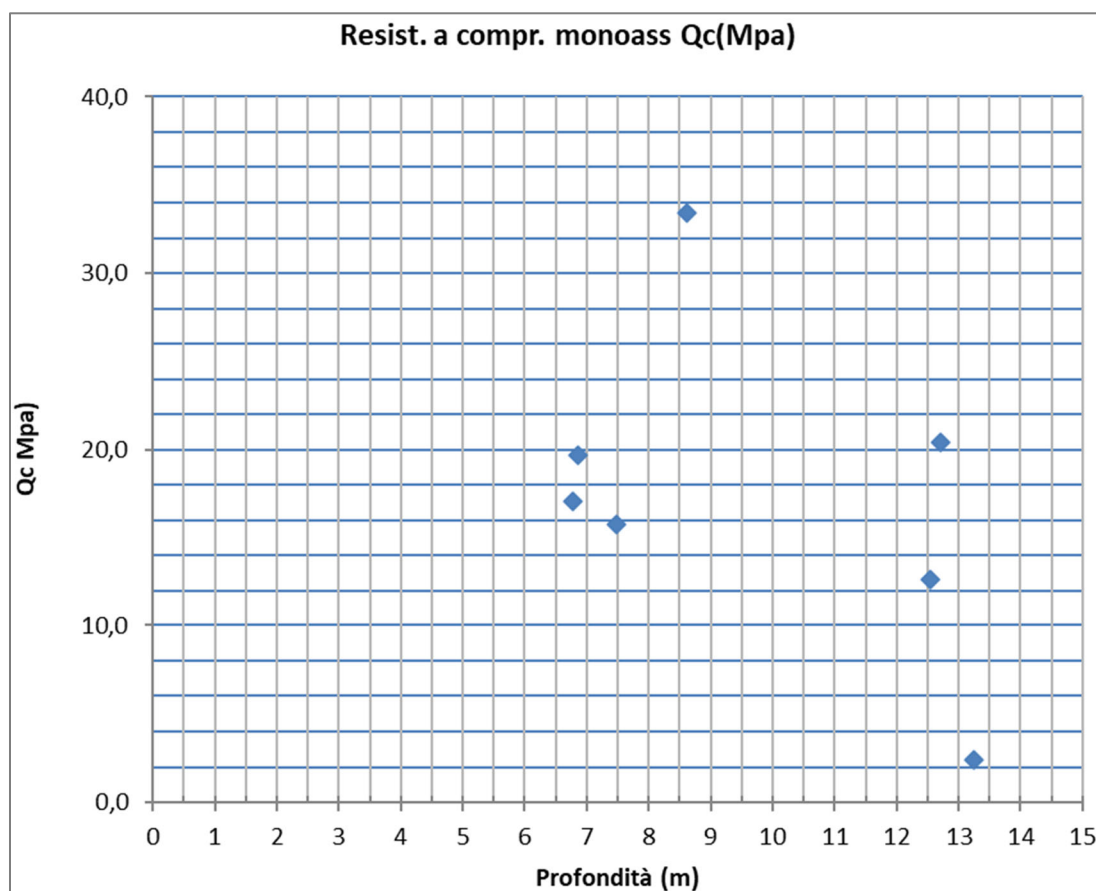


Figura 7 - Distribuzione dei valori dell'angolo di attrito interno

Tabella 4 - Prove di compressione monoassiale su roccia E.L.L.

ID sondaggio/campione	Profondità m da p.c.	γ_n kN/m ³	Q_c MPa
S1	6,55-7,00	25,92	17,08
S2	6,70-7,00	24,77	19,69
S2	7,15-7,80	25,94	15,75
S1	8,40-8,85	25,98	33,39
S2	12,30-12,80	25,40	12,66
S1	12,50-12,90	25,44	20,44
S2	13,00-13,50	23,13	2,42*

*roccia alterata friabile

Figura 8 - Distribuzione dei valori di resistenza a compressione monoassiale Q_c

8 RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE

I risultati dell'indagine geofisica sono esposti dettagliatamente nell'allegato.

Nella presente relazione vengono richiamati i punti salienti risultanti da detta indagine, mentre per maggiori dettagli ci si riferirà allo specifico allegato.

L'indagine è stata articolata secondo due differenti metodologie d'indagine: una di tipo sismico e l'altra di tipo geoelettrico.

Entrambe le metodologie sono state impostate e, successivamente, interpretate secondo le più moderne tecniche tomografiche.

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica e geoelettrica, di cui si riportano le caratteristiche generali:

1. L'indagine sismica con tecnica MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva che, attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del DM 17/01/2018;
2. L'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) e trasversali (S) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, andando a stimare lo stato di addensamento e/o fratturazione del terreno investigato. È molto utile anche per classificare la cosiddetta "rippabilità" degli ammassi rocciosi e per ottenere per via indiretta una classificazione dell'ammasso roccioso;
3. La tomografia elettrica è una tecnica geofisica che restituisce, del sottosuolo investigato, l'immagine 2D della distribuzione della resistività elettrica. Trova le sue migliori applicazioni in situazioni complesse, dove può manifestare tutto il suo elevato potere risolutivo, sia laterale che verticale.

Le indagini sismiche hanno avuto lo scopo di ricostruire l'andamento litostratigrafico dei terreni investigati e di determinare le caratteristiche sismostratigrafiche, mentre con la tomografia elettrica sono state desunte le loro caratteristiche in termini di resistività elettrica. Entrambe le metodologie sono state realizzate con lo scopo di verificare l'eventuale presenza di cavità, le quali in genere si manifestano attraverso delle anomalie di resistività, sia positive (per presenza di aria) che negative (per presenza di acqua di riempimento), e di velocità (negative, a causa della riduzione di densità).

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma:

- n°2 stendimenti (M1, M2) di sismica con tecnica MASW;
- n°4 stendimenti (R1, R2, R3 e R4) di sismica a rifrazione in onde P e S;

- n°2 stendimenti (T1, T2) di tomografia elettrica.
- Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G e livella digitale Leica (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di sismica a rifrazione e tomografia elettrica;
- Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche e geoelettriche con l'impiego di software specialistici.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, la direzione di esecuzione (da geofono o elettrodo iniziale a quello finale) e la loro lunghezza complessiva.

Tabella 5 - Quadro riassuntivo delle indagini svolte

Stendimento	SETTORE	METODOLOGIA	ORIENTAMENTO	GEOFONI/ PICCHETTI	INTERDISTANZA (m)	LUNGHEZZA (m)
M1	Nord	MASW	SO-NE	24	2,0	48
R1	Nord	SISMICA RIFRAZIONE	SSE-NNO	24	3,0	72
R2	Nord	SISMICA RIFRAZIONE	SO-NE	24	3,0	72
R3	Sud	SISMICA RIFRAZIONE	SSE-NNO	24	3,0	72
R4	Sud	SISMICA RIFRAZIONE	SO-NE	24	3,0	72
T1	Nord	TOMOGRFIA ELETTRICA	SSE-NNO	48	5,0	235
T2	Sud	TOMOGRFIA ELETTRICA	SSE-NNO	48	5,0	235

8.1 PROVE MASW

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 17/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 del citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

con:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio 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 le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H 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 (v. schema seguente).

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.

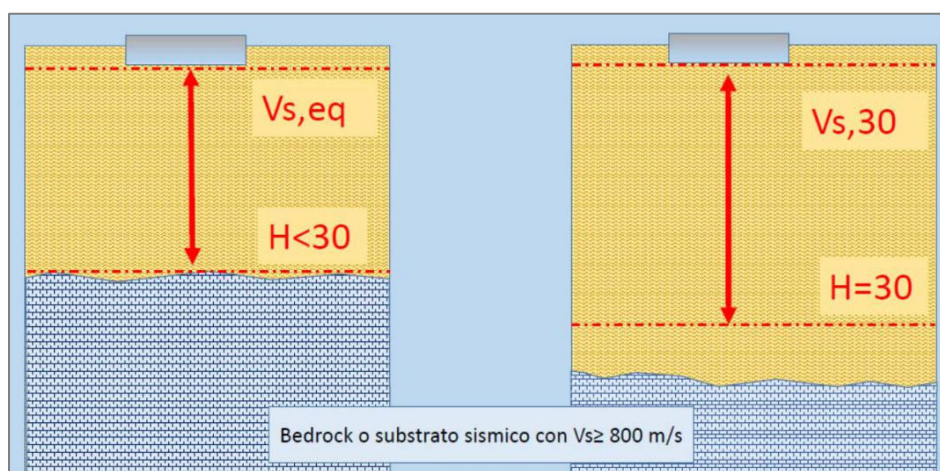


Figura 7 - Schema di Calcolo delle $V_{s,eq}$ e delle $V_{s,30}$

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tabella 6. Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC

2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Tabella 6 - Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

Categoria	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>Depositi 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>Depositi 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.

8.2 MASW M1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Tabella 7 - Successione Sismostrati MASW M1

Profondità [m sotto il pc]		Descrizione
Da	A	
0	0,9	1° sismostrato con Vs di 190 m/s Terre poco addensate
0,9	3,3	2° sismostrato con Vs di 260 m/s Terre moderatamente addensate
3,3	4,6	3° sismostrato con Vs di 330 m/s Terre moderatamente addensate
4,6	7,3	4° sismostrato con Vs di 580 m/s Terre molto addensate
7,3	13,6	5° sismostrato con Vs di 840 m/s Substrato roccioso
13,6	20,0	6° sismostrato con Vs di 1240 m/s Substrato roccioso
20,0	32,0	7° sismostrato con Vs di 1680 m/s Substrato roccioso

Tabella 8 - Sismostratigrafia e calcolo $V_{s,eq}$ MASW M1

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	0,9	0,9	190	0,9	0,9	0,004737
2	3,3	2,4	260	3,3	2,4	0,009231
3	4,6	1,3	330	4,6	1,3	0,003939
4	7,3	2,7	580	7,3	2,7	0,004655
5	13,6	6,3	840	13,6	6,3	n.c.
6	20	6,4	1 240	20	6,4	n.c.
7	32	12	1 680	30	10	n.c.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 7,3 m ($V_s > 800$ m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 7,3 m di profondità dal p.c., per fondazioni posate in prossimità del piano di campagna, è pari a:

$$V_{s,eq} = \frac{7,3}{0,022562} = 323 \frac{m}{s}$$

che dà luogo ad una categoria E ossia:

Categoria 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

Per fondazioni poste a partire da 1,0 m sotto il p.c. (o in caso di bonifica del terreno sino a tale profondità o fondazione su pali) la categoria di sottosuolo viene ricalcolata, per substrato posto a 7,3-1,0= 6,3 m e si ottiene una velocità equivalente pari a:

$$V_{s,eq} = \frac{6,3}{0,017441} = 361 \frac{m}{s}$$

che dà luogo ad una categoria B, ovvero:

Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

8.3 RIFRAZIONE R1

Nella sezione di sismica a rifrazione **R1**, eseguita parallelamente alla linea ferroviaria lungo il lato nord-est, sulla base anche dei dati puntuali del sondaggio geognostico S1, è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità onde P [m/s]	Velocità onde S [m/s]
A: Unità delle terre di copertura: limi argillosi da mediamente a molto consistenti (facilmente rippabili)	da 0,0 a 5,0/6,0	400-1000	200-400
B: Unità del substrato allentato/parzialmente fratturato alternato – (rippabile)	da 5,0/6,0 a 9,5/11,0	1000-1900	400-800
C: Unità del substrato poco allentato/fratturato alternato – (difficilmente rippabile)	da 9,5/11,0 a 12,5/15,0	1900-2500	800-1000
D: Unità del substrato sano/poco fratturato – (non rippabile)	> 12,5/15,0	>2500	>1000

Dall'esame delle sezioni sismiche si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P e S all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3400 m/s per le onde P e tra 200 e 1700 m/s per le onde S sino alla massima profondità di indagine pari a 60/63 m slm (circa 27/30m sotto p.c.).

Tutti i sismostrati presentano andamento piano sostanzialmente parallelo al piano di campagna senza variazioni e anomalie di velocità riconducibili alla possibile presenza di cavità o fratturazione importante

8.4 RIFRAZIONE R2

Nella sezione di sismica a rifrazione **R2** in onde P e S, realizzata lungo la sede di imposta della viabilità in progetto e circa perpendicolarmente alla R1 sulla base anche dei dati puntuali del sondaggio geognostico S1, è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità onde P [m/s]	Velocità onde S [m/s]
A: Unità delle terre di copertura: limi argillosi da mediamente a molto consistenti (facilmente rippabili)	da 0,0 a 3,5/4,5	400-1000	200-400
B: Unità del substrato allentato/parzialmente fratturato alternato – (rippabile)	da 3,5/4,5 a 8,0/12,0	1000-1900	400-800
C: Unità del substrato poco allentato/fratturato alternato – (difficilmente rippabile)	da 8,0/12,0 a 16,0/17,0	1900-2500	800-1000
D: Unità del substrato sano/poco fratturato – (non rippabile)	> 16,0/17,0	>2500	>1000

Dall'esame delle sezioni sismiche si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P e S all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3400 m/s per le onde P e tra 200 e 1700 m/s per le onde S sino alla massima profondità indagata pari a 70 m slm (circa 20 m sotto p.c.).

I sismostrati presentano un andamento senza importanti variazioni e anomalie di velocità riconducibili alla possibile presenza di cavità o fratturazione importante.

8.5 RIFRAZIONE R3

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3** in onde P e S, realizzata parallelamente alla linea ferroviaria lungo il lato sud-ovest, sulla base anche dei dati puntuali del sondaggio geognostico S2, è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità onde P [m/s]	Velocità onde S [m/s]
A: Unità delle terre di copertura: limi argillosi da mediamente a molto consistenti (facilmente rippabili)	da 0,0 a 2,5/4,0	400-1000	200-400
B: Unità del substrato allentato/parzialmente fratturato alternato – (rippabile)	da 2,5/4,0 a 6,0/11,0	1000-1900	400-800
C: Unità del substrato poco allentato/fratturato alternato – (difficilmente rippabile)	da 6,0/11,0 a 15,0/17,0	1900-2500	800-1000
C: Unità del substrato sano/poco fratturato – (non rippabile)	> 15,0/17,0	>2500	>1000

Dall'esame delle sezioni sismiche si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P e S all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3400

m/s per le onde P e tra 200 e 1700 m/s per le onde S sino alla massima profondità indagata pari a 65 m slm (circa 25 m sotto p.c.).

Il sismostrato del substrato C presenta delle modeste variazioni laterali di velocità sia in P che in S correlabili a variazioni dello stato di fratturazione/composizione ma difficilmente legate alla possibile presenza di cavità, così come indicato anche nella sezione di tomografia elettrica T2.

8.6 RIFRAZIONE R4

Nella sezione di sismica a rifrazione R4 in onde P e S, realizzata parallelamente alla linea ferroviaria lungo il lato sud-ovest, sulla base anche dei dati puntuali del sondaggio geognostico S2, è possibile distinguere i seguenti sismostrati

Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità onde P [m/s]	Velocità onde S [m/s]
A: Unità delle terre di copertura: limi argillosi da mediamente a molto consistenti (facilmente rippabili)	da 0,0 a 3,0/4,0	400-1000	200-400
B: Unità del substrato allentato/parzialmente fratturato alternato – (rippabile)	da 3,0/4,0 a 7,0/10,0	1000-1900	400-800
C: Unità del substrato poco allentato/fratturato alternato – (difficilmente rippabile)	da 7,0/10,0 a 16,0/18,0	1900-2500	800-1000
C: Unità del substrato sano/poco fratturato – (non rippabile)	> 16,0/18,0	>2500	>1000

Dall'esame delle sezioni sismiche si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P e S all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3400 m/s per le onde P e tra 200 e 1700 m/s per le onde S sino alla massima profondità indagata pari a 65 m slm (circa 25 m sotto p.c.).

Il sismostrato del substrato C presenta delle modeste variazioni laterali di velocità in onde P ed in subordine in onde S correlabili a variazioni dello stato di fratturazione/composizione ma difficilmente legate alla possibile presenza di cavità, così come indicato anche nella sezione di tomografia elettrica T2.

8.7 TOMOGRAFIA ELETTRICA

Come descritto in premessa con la tomografia elettrica si è potuto ricostruire l'andamento elettrostratigrafico dei terreni investigati, andando anche a ricercare eventuali anomalie riconducibili alla presenza di cavità.

Le sezioni di resistività elettrica, rappresentate con due grafici – il primo con variazioni di colore (smooth section) e il secondo a isoline (contour section) –, hanno messo in luce in maniera abbastanza chiara l'assetto elettro-stratigrafico della zona. Questo assetto, basato sulle caratteristiche elettriche dei terreni in posto

(costituiti da arenarie siltitiche che, in virtù della loro composizione variabile, si contraddistinguono per un range molto ampio dei valori di resistività, cfr. tabella del paragrafo 6.2), può essere schematizzato nel seguente modo:

1. un primo elettrostrato (E_{s1}) con spessore compreso tra 6,0 e 10,0 m riconducibile alla presenza di limi argillosi con valori di resistività compresa tra 5 e 25/40 $\Omega \cdot m$. Lateralmente, ad inizio e fine sezione la resistività aumenta probabilmente per la presenza di materiale grossolano di copertura;
2. un secondo elettrostrato (E_{s2}), oltre i 6,0/10,0 sino a circa 18,0/20,0 m sotto il p.c., caratterizzato da valori di resistività tra 25/40 e 250 $\Omega \cdot m$, ascrivibili alla presenza del substrato roccioso costituito dalle arenarie lapidee;
3. un terzo elettrostrato (E_{s3}), oltre i 18,0/20,0 m sotto il p.c., caratterizzato da valori di resistività tra 5 e 18 $\Omega \cdot m$, ascrivibili alla presenza del substrato roccioso costituito dalle arenarie in facies siltitica probabilmente con presenza di falda acquifera.

In entrambe le sezioni con particolare riferimento al substrato lapideo probabile sede di posa delle fondazioni nonostante una certa variabilità della resistività elettrica legata alla composizione litologica (con eventuale presenza di falda acquifera) non si rilevano anomalie riconducibili alla possibile presenza di cavità nelle aree oggetto di interventi.

9 MODELLO GEOLITOLOGICO

Sulla base alle evidenze stratigrafiche emerse e sulla base dei risultati delle prove in campo e di laboratorio geotecnico, è stato possibile individuare 4 orizzonti geolitologici.

- ORIZZONTE A: trattasi dell'orizzonte più superficiale, presente nella zona più depressa in prossimità dell'innesto con la rotonda della S.S.126, costituito da limisabbiosi e sabbie limose, da poco a mediamente addensati.

Il limite inferiore è posto a -1,60 m in S3.

COLTRI ELUVIO COLLUVIALI - OLOCENE

- ORIZZONTE B: trattasi di limi argilloso sabbiosi, con inclusi lapidei a spigoli vivi, mediamente addensati.

Il limite inferiore è posto a -2,20 m in S1 e a -1,0 m in S2.

DEPOSITI ANTROPICI - OLOCENE

- ORIZZONTE C: trattasi di limi argilloso sabbiosi da beige giallastri a marron rossicci, consistenti.

Il limite inferiore è posto a -3,0 m in S3, -2,90 m in S2 e a -6,20 m in S1.

SINTEMA DI PORTOVESME – PLEISTOCENE SUPERIORE

- ORIZZONTE D: trattasi di alternanze di arenaria, siltiti e argilliti, lapidee.

Il limite superiore è posto a -3,0 m in S3, -2,90 m in S2 e -6,20 m in S1.

FORMAZIONE DEL CIXERRI – EOCENE MEDIO-OLIGOCENE

Si rimanda alla Figura 8 per una ricostruzione dell'andamento dei vari orizzonti lungo l'asse del ponte, mentre per la definizione del modello geotecnico si rimanda alla relazione geotecnica.

Si riporta l'elenco dei sondaggi eseguiti con le profondità della base degli orizzonti A, B e C in ogni sondaggio, oltre che il livello della falda rilevato nel mese di maggio 2025.

Tabella 9 - Elenco sondaggi con profondità orizzonti geolitologici

ID Sondaggio	Parte opera	Base orizz. A da p.c. m	Base orizz. B da p.c. m	Base orizz. C da p.c. m	Profondità falda da p.c. m
S1	Spalla lato Carbonia	Assente	2,20	6,20	Assente
S2	Spalla lato S.S. 126	Assente	1,00	2,90	-4,25
S3	Rotonda pressi S.S. 126	1,60	Assente	3,00	-3,00

STUDIO DI COMPATIBILITÀ GEOLOGICA-GEOTECNICA

Progetto di completamento dei lavori di sistemazione delle intersezioni a rotatoria sulla S.S.126 "Sud-Occidentale Sarda". Strada di collegamento PIP - Via dei Minatori - Via Ospedale (1° Lotto funzionale) - Comune di Carbonia

CIP: 18STR01.00 - CUP I41B19000060006

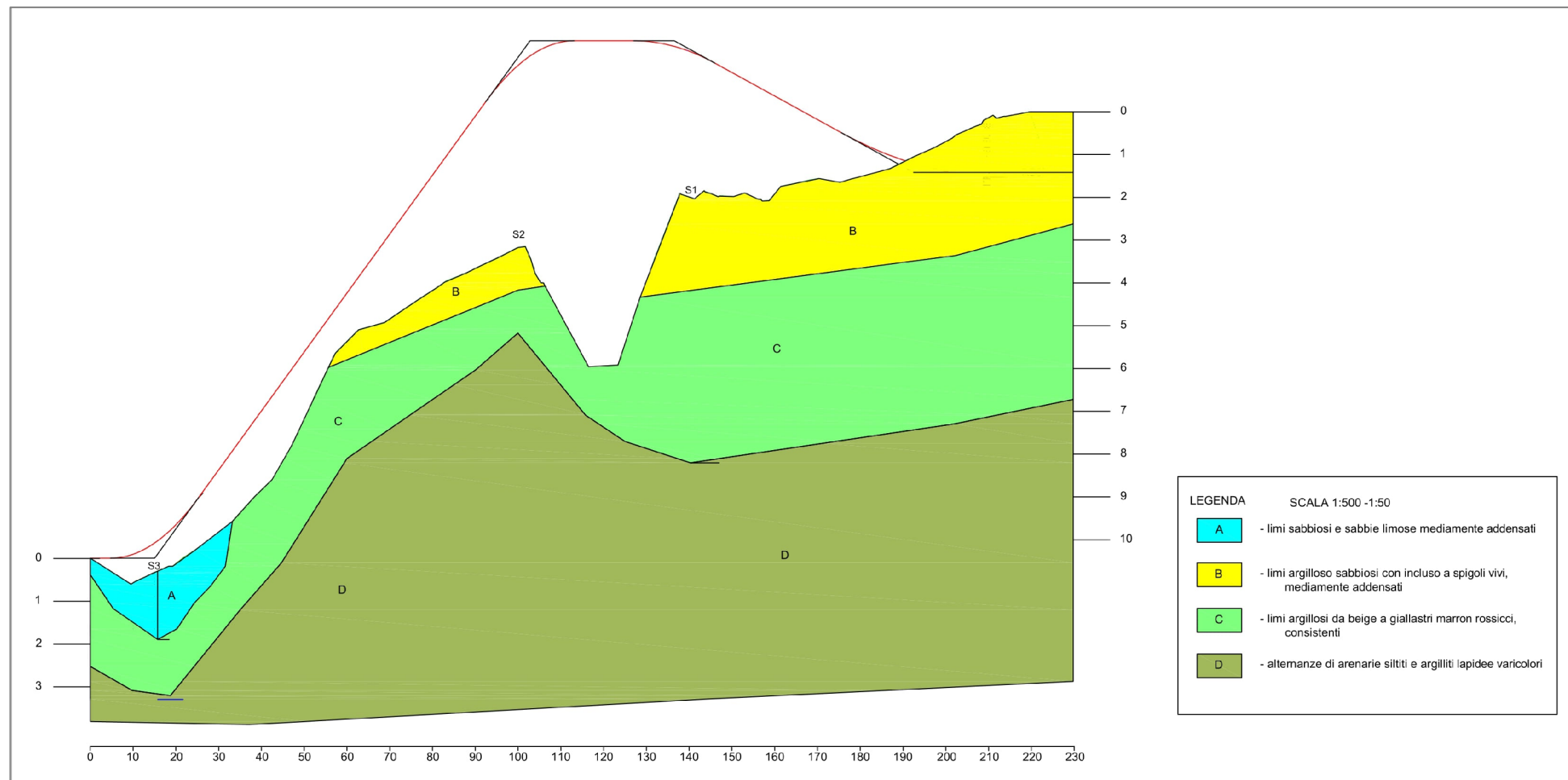


Figura 8 - Profilo geologico longitudinale

10 INQUADRAMENTO DELL'AREA RISPETTO AL PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO

L'area in esame ricade all'interno del Sub-Bacino Idrografico n.1 "Sulcis" e non rientra nelle perimetrazioni di rischio e pericolosità di piene e frane del P.A.I.

Tuttavia, il territorio comunale di Carbonia è stato oggetto in passato di un'intensa attività di coltivazione mineraria, che ha comportato l'esecuzione, a profondità variabile rispetto al piano campagna, di strutture minerarie.

Lo studio comunale di assetto idrogeologico dell'agosto 2022, redatto dal dott. Geol. Lorenzo Ottelli, ha aggiornato il PAI approfondendo gli aspetti legati al rischio Sinkhole per la presenza delle strutture minerarie, effettuando uno screening ed individuando le aree che insistono nell'intero territorio comunale di Carbonia.

Più in particolare sono state evidenziate le zone in cui l'eventuale possibilità che si verifichino fenomeni di cedimento delle strutture minerarie profonde quali vuoti coltivazione, gallerie ecc. si propaghino sino all'esterno andando ad incidere quindi sulle zone antropizzate.

La quasi totale mancanza di studi di dettaglio delle aree interessate dalle coltivazioni minerarie, siano esse ascrivibili alle miniere di carbone, siano esse ascrivibili alle miniere metallifere ecc., non ha consentito tuttavia di circoscrivere al meglio le aree di coltivazione.

Per rappresentare le zone che potrebbero essere soggette a fenomeni di Sinkhole o subsidenza dovuta a vecchi lavori minerari si è quindi partiti dall'analisi dei dati dei pozzi minerari, la loro quota sul p.c., la quota di sviluppo dei lavori minerari e il franco presunto in prossimità degli stessi pozzi tra il piano campagna attuale e i lavori minerari. L'analisi delle quote di inteso e delle quote finali dei pozzi, nonché l'analisi delle quote in cui si sviluppano i lavori minerari nella zona dei pozzi, mostrano che lo spessore litologico a tetto dei lavori in sotterraneo è generalmente superiore ai 40-50 metri. Tuttavia in alcune zone i lavori minerari si sviluppano a quote più superficiali. Si segnala soprattutto l'area a Nord compresa tra Pozzo 11 e Pozzo Vigna dell'area di Carbonia, dove i lavori minerari sono prossimi alla quota +80 circa s.l.m. e nella zona a W dell'ospedale Sirai, dove il bacino carbonifero è più prossimo alla superficie. Inoltre anche se in zone dove gli insediamenti abitativi sono poco frequenti, si segnala la zona di Bau Abis in corrispondenza del pozzo di Cortoghiana Vecchia.

Sono stati inoltre analizzati gli studi effettuati dalla PROGEMISA (Progetto RECHAR) ricadente nell'area del PIP e studi privati effettuati per conto dello IACP e AREA nella zona dell'abitato di Bacu Abis che hanno permesso di definire con più dettaglio quale sia il grado di pericolosità da adottare.

La mancanza di studi di dettaglio o evidenze di dissesti riferibili a fenomeni di subsidenza delle aree minerarie, diversamente come fatto per le aree di Bacu Abis e del PIP, consente solo di indicare quale sia l'area

interessata dai lavori e attribuire ad essa il grado di pericolosità minimo a partire dall'HG1SH dove il fenomeno potrebbe manifestarsi e zone HG4SH dove il fenomeno è stato accertato. A seconda della possibilità o meno di realizzare l'intervento in entrambi i casi è richiesto uno studio di compatibilità geologico-geotecnica. Nelle zone in cui invece i lavori minerari sono a notevoli profondità rispetto al piano campagna, il grado di pericolosità è stato valutato come Hg1 o Hg0.

Per quanto riguarda le zone in cui i lavori minerari sono più "superficiali", deve essere realizzato uno studio di dettaglio al fine di accertare quale sia la consistenza delle litologie sovrastanti i lavori stessi adottando il protocollo tecnico "tipo" di cui all'art. 31 c.8 delle n.a. P.A.I. - Indicazioni per le indagini e studi da effettuare nelle zone mappate a pericolosità di frana per fenomeni di sinkhole.

L'area in esame dove dovrà essere realizzato il cavalcavia è indicata nella carta della pericolosità da frana (di cui si riporta uno stralcio), redatta dal dott. Ottelli, a pericolosità HG1SH.

L'art.31 c.8 delle Norme di attuazione del piano di assetto idrogeologico per le aree sinkhole prevede: "Nelle sole situazioni in cui il pericolo di frana scaturisce da fenomeni gravitativi denominati Sinkhole (crollo/subsidenza indotti da cavità sotterranee naturali, carsiche o di dissoluzione; o antropiche, estrattive) è consentita nelle aree pericolose la realizzazione, in materia di patrimonio edilizio, pubblico e privato, e in materia di infrastrutture a rete o puntuali pubbliche o di interesse pubblico, di nuove costruzioni, ristrutturazioni, restauro conservativo previo studio dettagliato dell'area da effettuarsi con l'estensione e le modalità previste nel protocollo tecnico "tipo" approvato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino. Gli stessi interventi da realizzarsi nell'area, salvo quelli specificatamente vietati dalle N.A., potranno effettuarsi solo a seguito dell'approvazione, da parte del Comitato istituzionale su proposta dell'autorità idraulica dello studio di cui sopra e della realizzazione delle opere di salvaguardia eventualmente necessarie. In ogni caso l'area rimarrà sottoposta al vincolo di pericolosità che potrà essere declassato successivamente, con opportuna variante al PAI, solo a seguito di studi ed eventuali lavori di salvaguardia già effettuati su congrue estensioni contigue di territorio."

Con riferimento alla D.G.13/22 del 4.3.2008 e ai fini del superamento dei vincoli delle aree comprese nel perimetro delle aree a pericolosità di frana di cui alla cartografia allegata al PAI è stato dimostrato, con ragionevole certezza, ricorrendo ad opportune indagini e studi, l'assenza del rischio di fenomeni gravitativi denominati Sinkhole sulle aree sulle quali sono previsti gli interventi di cui all'art. 31 bis delle N.A. del PAI.

Le aree investigate hanno interessato in particolare le spalle del cavalcavia e hanno compreso, così come previsto dal protocollo Sinkhole, l'utilizzo di metodologie di indagine sia indiretta che diretta e andranno completati da un idoneo piano di monitoraggio.

Così come descritto nei paragrafi precedenti gli studi sono consistiti in:

1. **Rilievo geolitologico di superficie** correlato alla situazione geologico strutturale e idrogeologica dell'area in cui si inserisce il sito in oggetto. L'area non ricade in zone con accumuli di sterili di minerari.
2. **Indagine storica** degli eventuali fenomeni morfologici riscontrati nel tempo nell'area di intervento ed in quella circostante corredato. Sulla base della tabella 11 dello studio di compatibilità redatto dal Dott. Lorenzo Ottelli sui dati dei pozzi e discenderie dell'area di Carbonia, Cortoghiana e Bacu Abis, i pozzi minerari più prossimi all'area in esame sono:
 - Pozzo Sirai ubicato circa 300 m a Nord Est del cavalcaferrovia in Progetto, con quota dei lavori minerari compresa tra +40/+4 m s.l.m.;
 - Pozzo 12, ubicato circa 350 m a Ovest nella zona PIP, con quota dei lavori minerari compresa tra +0/+46 m s.l.m.

La quota del piano di campagna in corrispondenza delle spalle cavalcaferrovia in Progetto è circa 88 m s.l.m. per cui le gallerie minerarie si trovano nel caso peggiore circa 48 m in profondità.

3. **Indagine geofisica** che è stata condotta utilizzando due metodi di prospezione di seguito specificati:
 - A. Indagini sismiche effettuate con tecnica tomografica di superficie e con metodologia MASW, non essendo state riconosciute condizioni critiche tali da rendere necessaria l'esecuzione di tomografie sismiche tra fori adiacenti o tra punti diversi del piano topografico;
 - B. Indagine geoelettrica con tecniche tomografiche.
4. **Indagine geognostica.** Sono stati eseguiti due sondaggi profondi 20 m, uno in corrispondenza di ogni spalla, in quanto si è intercettata, a partire da profondità variabili tra 3 e 7 m dal piano di campagna, la formazione del Cixerri, costituita da arenaria, siltii e argilliti, non interessata da fenomeni di Sinkhole.

I sondaggi non hanno evidenziato la presenza di acque in pressione e non, per cui non è stato necessario attrezzare i fori di sondaggio con idoneo tubo piezometrico che consenta il monitoraggio della falda.
5. **Piano di monitoraggio.** In base ai risultati delle indagini, e anche se nessuna particolare anomalia è stata messa in luce, andrà predisposto un piano di monitoraggio delle mutazioni planoaltimetriche dell'area mediante il posizionamento razionale di capisaldi di misura, preferibilmente ai margini della sede stradale, in numero adeguato rispetto all'estensione dell'area e alle sue caratteristiche emerse dalle indagini. I capisaldi saranno battuti, con cadenza semestrale, mediante operazione di livellazione geometrica di alta precisione; le misure dovranno essere annotate in apposito registro reso costantemente disponibile presso la sede del gestore e trasmessi all'amministrazione locale ed all'autorità idraulica che operano nell'area per l'aggiornamento del sistema generale di monitoraggio. Le misure da effettuarsi saranno obbligatorie per almeno due anni dall'intervento;

successivamente, in assenza di movimenti planoaltimetrici, andrà assicurata la conservazione e la manutenzione dei capisaldi e garantito l'accesso ai siti per un utilizzo dei punti di misura da parte degli organi tecnici della P.A.. Queste misurazioni locali andranno riferite, sempre mediante livellazione d'alta precisione e con cadenza annuale, alla rete di monitoraggio generale una volta che questa sia stata realizzata. Le indagini andranno concentrate in prossimità degli elementi sensibili e delle vie di accesso al lotto



Figura 9 - Stralcio della Tav.GI.3 Carta della Pericolosità di frana – Dettaglio Centro abitato-Carbonia centro Studio comunale di assetto idrogeologico. Proposta di Variante (art.8 delle NA del PAI)

11 CONCLUSIONI

Sulla base delle risultanze della campagna geognostica e geofisica, sono state individuati 4 differenti orizzonti geolitologici:

- depositi colluviali limoso sabbiosi rivenuti solo in prossimità dell’innesto con la S.S.126;
- -depositi antropici limoso argilloso sabbiosi con inclusi lapidei a spigoli vivi fino a -2,20 m da p.c. in corrispondenza della spalla nel lato della S.S.126 e a -1,00 m nella spalla lato Carbonia;
- limi argilloso sabbiosi consistenti del Sintema di Portovesme del Pleistocene Superiore fino a -2,90 m nel lato della S.S.126 e fino a -6,20 m nel lato Carbonia;
- alternanze di arenarie, siltiti e argilliti lapidee della formazione del Cixerri dell’Eocenemedio-Oligocene.

La falda idrica non è stata intercettata con le perforazioni effettuate nel mese di Maggio 2025.

I carotaggi hanno mostrato continuità litologica, nessun grande vuoto o zone franate fino a 20 m, e le tomografie (elettrica e sismica) non evidenziano anomalie nette o ad alto contrasto fino a 40 m.

Inoltre, la natura litologica del “Cixerri”, non trattandosi di rocce carbonatiche o gessose suscettibili a karstificazione, bensì arenarie, siltiti e argilliti poco suscettibili a dissoluzione, né soggette a problemi di piping non essendo stata verificata la presenza di circolazione di acque sotterranee.

Inoltre, in superficie non sono stati individuati avvallamenti del terreno o zone depresse che trattengono acqua che possono far presagire un fenomeno di Sinkhole.

Le risultanze delle varie verifiche effettuate, sia con i sondaggi che con le tomografie sismiche ed elettriche, consentono pertanto di escludere la presenza di cavità fino a 40 m di profondità, essendo stata intercettata la presenza di terreni lapidei facenti parte della formazione del Cixerri, a partire da una profondità variabile da 3 a 7 m circa dal piano di campagna, per tutta la lunghezza degli stendimenti geofisici. Gli stessi stendimenti non hanno rilevato anomalie riconducibili alla presenza di cavità nelle aree oggetto degli interventi.

Considerata la vicinanza del nuovo impalcato alle scarpate della trincea entro la quale passa la ferrovia, si ritiene necessario realizzare fondazioni profonde al fine di non innescare fenomeni di instabilità nelle scarpate stesse.

Nonostante i terreni limoso argillosi superficiali siano dotati di buone caratteristiche di consistenza, la realizzazione di fondazioni superficiali del viadotto comporterebbe l’applicazione di un sovraccarico in prossimità del ciglio delle scarpate, attualmente profilate con un angolo di circa 70°.

La scelta di fondazioni profonde è mirata al trasferimento dei carichi al di sotto dei livelli argillosi più superficiali le cui caratteristiche geotecniche variano sensibilmente al variare del contenuto d'acqua e potenzialmente instabili a seguito dell'applicazione di un sovraccarico in prossimità delle scarpate.

Si è optato pertanto per la soluzione su micropali che dovranno intestarsi nel substrato arenaceo lapideo, il cui estradosso è posto a circa – 6,20 m nel lato Carbonia e a – 2,90 m nel lato S.S. 126.