

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



S.O. GEOLOGIA TECNICA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA DI 2° FASE

RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

RR0P 02 R 69 RG GE0001 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	A. Paone	03/2023	P. Balbi	03/2023	T. Paoletti	03/2023	G. Benedetti Marzo 2023
		F. Tassinari		<i>F. Tassinari</i>		<i>T. Paoletti</i>		
B	Emissione Esecutiva	P. Balbi	07/2023	F. Romano	07/2023	T. Paoletti	07/2023	G. Benedetti Luglio 2023
		<i>P. Balbi</i>		<i>F. Romano</i>		<i>T. Paoletti</i>		ITALFERR S.p.A. Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane Dott. Geol. Giampaolo Benedetti Ordine dei Geologi Emilia Romagna n. 1019

File: RR0P02R69RGGE0001001B

n. Elab.: 1

INDICE

1	PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
2	DESCRIZIONE GENERALE DELL'AREA ED INQUADRAMENTO CARTOGRAFICO	6
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO	7
3.1	ASSETTO GEOLOGICO REGIONALE	7
3.2	ASSETTO STRATIGRAFICO DEL CAMPIDANO E DELLA FOSSA DEL CIXERRI.....	12
3.3	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO.....	13
4	PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA	16
5	INQUADRAMENTO SISMICO.....	16
5.1	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO	20
5.2	CATEGORIE TOPOGRAFICHE.....	21
5.3	MACRO SISMICITÀ DELLE AREE DI INTERVENTO.....	22
6	INDAGINI GEOGNOSTICHE	24
6.1	SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO.....	25
6.2	INDAGINI SISMICHE MASW	25
6.3	INDAGINE SISMICA HVSR	27
6.4	PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE ONDE P.....	28
6.5	RISULTATI PROVE SPT IN FORO.....	29
6.6	RISULTATI PROVE DI PERMEABILITÀ	30
6.7	RISULTATI PROVE DILATOMETRICHE.....	31
6.8	RISULTATI PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO	37

7	CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA GSI.....	37
8	PROGETTO DI RADDOPPIO FERROVIARIO DELLA LINEA DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA: QUADRO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO DI RIFERIMENTO	40
8.1	MODELLO IDROGEOLOGICO E POSSIBILI INTERFERENZE CON LE OPERE IN PROGETTO.....	42
9	DESCRIZIONE DEI SETTORI D'INTERVENTO	42
9.1	Pk 0,0 – Pk 3,000	43
9.2	Pk 3,000 – Pk 5,250	44
9.3	Pk 5,250 – Pk 5,450	45
10	VERIFICHE DI SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	46
11	BIBLIOGRAFIA	48

1 **PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Nell'ambito del servizio di progettazione per il raddoppio della linea ferroviaria Decimomannu-Villamassargia nella Regione Sardegna è stato redatto il presente documento inerente lo studio dei terreni interessati dal Progetto di Fattibilità Tecnica Economica.

La modellazione geologica del territorio in esame è desunta dalle indagini in sito realizzate a supporto del progetto oltre che dallo studio del materiale bibliografico esistente e scopo del presente lavoro è analizzare e descrivere la situazione morfologica, idrogeologica e geo-litologica generale, determinare la natura dei terreni costituenti il primo sottosuolo e le loro caratteristiche fisico-meccaniche.

Le considerazioni di seguito riportate fanno riferimento alla vigente normativa del settore geotecnico e delle costruzioni ed in particolare modo si evidenziano:

- AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977.
- D.M 21 gennaio 1981 – “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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- Circ. Dir. Centr. Tecn. n°. 97/81 – “Istruzioni relative alle 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- ISRM International Society for Rock Mechanics: Rock characterization testing and monitoring suggested methods - Commission on Testing Methods, 1981.
- D.M LL.PP. 11 marzo 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 ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- Circ. Min. LL.PP. 24 settembre 1988 n°30483 – “Istruzioni applicative al D.M 11/03/88”.
- Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, Settembre 1988.
- Ordinanza 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.
- Circolare n. 5205 del 15/07/05 del Min. Ambiente – Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale ai sensi del D.M 08/05/03 n.203;
- D.M 14.09.2005 - “Norme tecniche sulle costruzioni”.

- D.M 14.01.2008 - “Norme tecniche per le costruzioni”.
- D.M. II.TT. del 04/02/2008 - Circolare 617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni» di cui al D.M. Infrastrutture del 14/01/2008”.
- D.M 17.01.2018 - “Norme tecniche per le costruzioni”.
- Circolare 7 del 21 gennaio 2019 C.S.LL.PP. - Istruzioni per l’applicazione dell’“Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

2 DESCRIZIONE GENERALE DELL’AREA ED INQUADRAMENTO CARTOGRAFICO

Il tracciato si sviluppa lungo una direttrice che si sviluppa da Est ad Ovest, da Decimomannu a Villamassargia.

La maggior percorrenza della linea ferroviaria risulta impostata all’interno della piana del Cixerri, la seconda più vasta pianura della Sardegna, situata nella porzione sud-occidentale dell’isola, all’incirca compresa tra i 40° e i 39° di latitudine Nord e gli 8°30' e i 9° di longitudine Est.



Figura 2-1 – Tracciato di progetto.

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Nel presente capitolo verrà descritta l'area in esame da un punto di vista geologico-geomorfologico e contestualmente verrà illustrata la componente idrogeologica locale.

3.1 Assetto geologico regionale

Poche altre regioni italiane presentano una storia geologica documentata tanto lunga e una varietà petrografica così vasta come la Sardegna. Nell'isola sono infatti rappresentate, in misura all'incirca equivalente, sia le rocce metamorfiche che quelle magmatiche e sedimentarie.

Il passato geologico della Sardegna è caratterizzato da più periodi evolutivi, ciascuno dei quali apporta sostanziali cambiamenti strutturali fino a raggiungere l'assetto attuale.

Le rocce affioranti più antiche, che hanno età compresa tra il Precambriano ed il Paleozoico superiore, mostrano un metamorfismo variabile da quello di alto fino a quello di basso grado e deformazioni che si sono prodotte fin dall'Orogenesi Caledoniana (490-390 milioni di anni fa) ma soprattutto durante quella Ercinica (350 e 250 milioni di anni fa).

Nel tardo Paleozoico la collisione delle placche continentali di Laurasia e Gondwana determina l'Orogenesi Ercinica. Durante questo periodo, compreso tra il Carbonifero inf. ed il Permiano, le spinte orogenetiche incominciano ad interessare anche la Sardegna.

Nei settori centrale e meridionale dell'Isola, le rocce paleozoiche, con spessori potenti migliaia di metri, vengono compresse, piegate, ribaltate, accavallate una sull'altra e subiscono un metamorfismo da medio a basso grado, tipico delle zone assiali e frontali di una catena a falde.

Oltre a ciò, l'orogenesi ercinica produce imponenti attività magmatiche di tipo intrusivo ed effusivo, con conseguenti processi di metamorfismo termico sulle rocce di contatto.

In Sardegna gli affioramenti di rocce magmatiche sono molto estesi e costituiscono quasi un terzo della superficie dell'isola, ed in particolare nel settore nord orientale di questa; si tratta essenzialmente di un complesso intrusivo tardoercinico, indicante un ambiente di margine convergente di arco insulare che si è formato, come detto in precedenza, nel Carbonifero-Permiano.

Le successive coperture post-erciniche sono invece rappresentate da rocce sedimentarie e vulcaniche solo debolmente deformate durante le fasi collisionali dell'ultima orogenesi alpina ed appenninica e durante le fasi di rifting che hanno portato all'apertura del Bacino Ligure - Balearico e successivamente del Mar Tirreno, tramite la cosiddetta "rotazione del blocco sardo-corso" e la successiva migrazione del fronte compressivo verso est.

Osservando la Figura proposta di seguito, si ha un quadro sintetico della distribuzione regionale e della

grande varietà petrografica delle diverse tipologie di rocce presenti sull'isola.

Il basamento sardo, come illustrato nella successiva Figura, si configura quindi come un segmento di catena ercinica in cui si distinguono: una Zona esterna nell'Iglesiente-Sulcis, una Zona a falde (interne ed esterne) dall'Arburese al Sarrabus-Gerrei e alla Sardegna centro-settentrionale ed una Zona assiale coincidente con la Sardegna settentrionale.

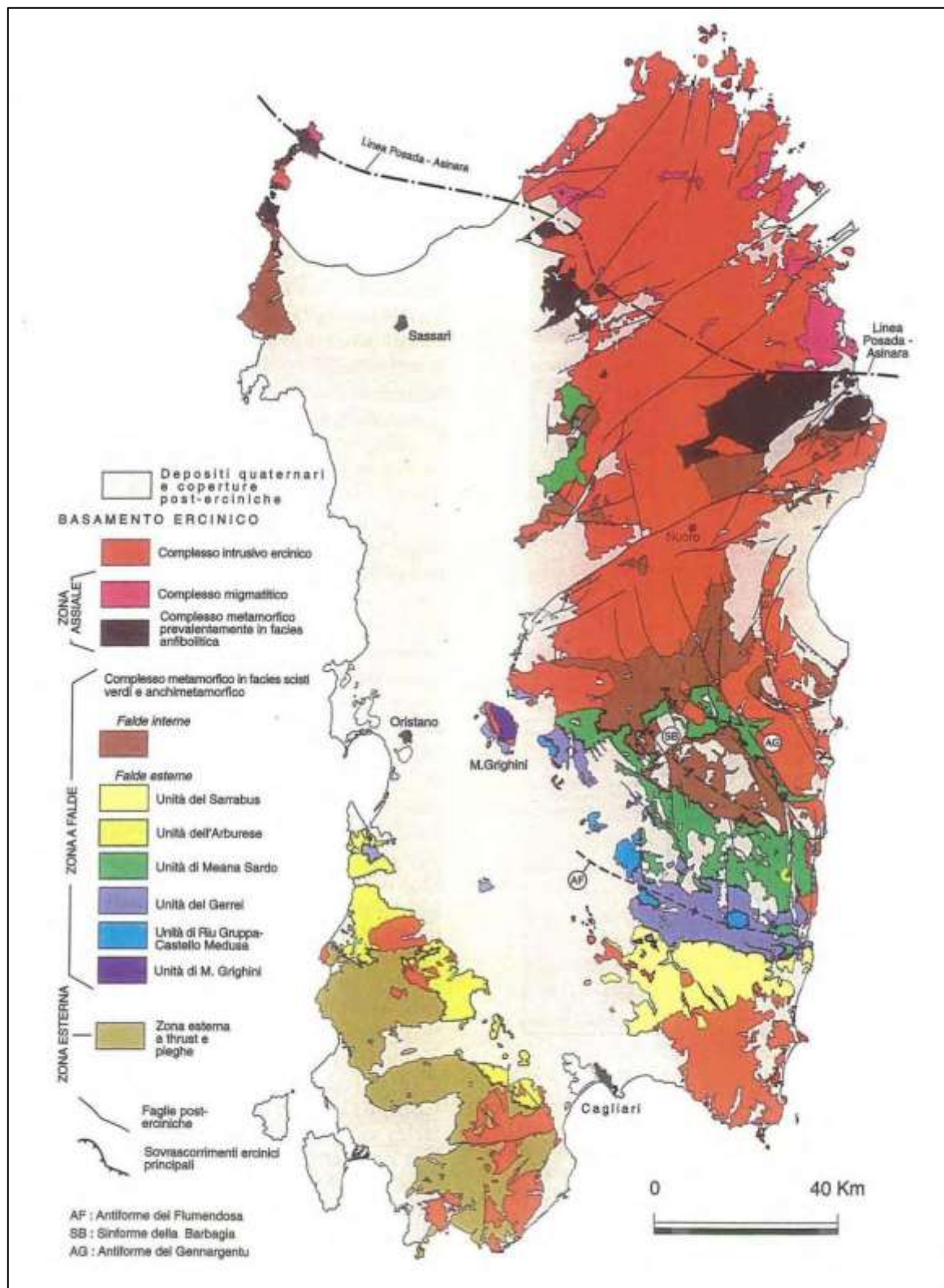


Figura 3-1 – Principali elementi strutturali del basamento sardo ercinico (Zona esterna, Zona a falde esterne e interne, Zona assiale) (Carmignani et al., 2001)

Tale basamento è caratterizzato da falde erciniche vergenti verso SO ("Zona a falde") interposte tra il Complesso metamorfico prevalentemente in facies anfibolitica della Sardegna settentrionale e la Zona esterna a sovrascorrimenti e pieghe ("Zona esterna") intensamente deformata, ma sostanzialmente autoctona, che affiora nella parte SO dell'Isola.

Trattandosi di un segmento della catena ercinica sud-europea separatosi dall'Europa solo nel Miocene inferiore (Burdigaliano), riposizionando, con una ricostruzione paleogeografica, il blocco sardo-corso nella sua originaria ubicazione pre-deriva miocenica, troviamo conferma che le strutture fondamentali del basamento delle due isole appartengono alla zolla europea ed hanno la loro prosecuzione in Provenza e Catalogna.

Infatti, nell'Oligocene la Corsica e la Sardegna si distaccarono dalle regioni di Francia e Spagna a cui erano contigue. La piccola placca che costituiva il blocco sardo-corso ruotò in senso antiorario e raggiunse la posizione attuale nel Miocene, circa 16-18 milioni di anni fa.

Anche i dati paleomagnetici, strutturali e le affinità litologiche e stratigrafiche confermano questa ricostruzione paleogeografica e indicano che il basamento sardo-corso era unito al basamento sud-europeo prima di staccarsi dal continente europeo e giungere nella sua attuale posizione.

Lo spostamento del blocco sardo-corso si accompagnò all'apertura di un piccolo oceano, il bacino Ligure - Provenzale. Il blocco sardo-corso ruotando verso Est andò a collidere con il promontorio di Adria e determinò l'attuale morfologia del settore occidentale dell'arco alpino.

Questa collisione provocò una serie di accavallamenti della crosta che, come illustrato schematicamente nella Figura 3-2, portarono alla formazione di una catena montuosa che possiamo definire come Appennini ancestrali.

Le diverse ricostruzioni della geometria di questa catena sono generalmente concordi nel delineare una cintura orogenica arcuata che dalla Spagna giungeva al Massiccio Centrale francese (Arco iberarmoricano).

La catena era bivergente, verso Nord e Sud, con al centro un'ampia fascia di rocce metamorfiche di medio e alto grado provenienti dai livelli medio-crostali, di età precedente al Carbonifero superiore in quanto i depositi di questa età la ricoprono in discordanza.

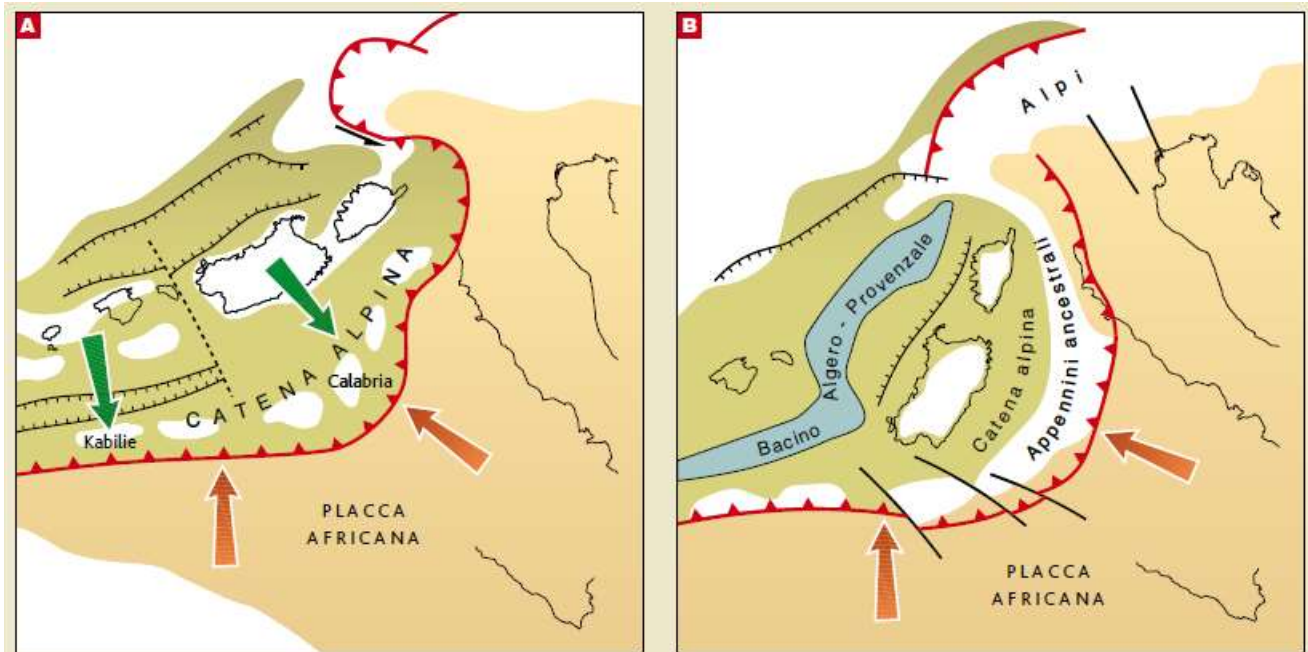


Figura 3-2 – In A e B si vedono due momenti diversi della Rotazione del blocco Sardo-Corso. Ruotando, questo blocco ha provocato la formazione degli Appennini ancestrali e ha trascinato verso Est una piccola porzione di catena alpina, che in seguito andò a formare gran parte della Calabria e i monti Peloritani in Sicilia. Le linee in nero indicano zone di distensione della crosta, mentre la linea in rosso indica la subduzione di litosfera africana sotto a quella europea (Fanucci F., Morelli D. “Caratteri e cronologia della deriva del blocco sardo-corso”). (Di Stefano et Al., 2019)

La catena nord-vergente proseguiva a Nord delle Alpi verso le Ardenne, fino in Boemia. Il basamento della Sardegna è l'elemento più orientale ancora facilmente raccordabile con la catena Sud-vergente. Più a Est, la formazione e l'evoluzione degli oceani mesozoici e terziari ed i raccorciamenti alpini ed appenninici hanno cancellato questa struttura ercinica.

In Sardegna invece affiora ancora una sezione completa della Catena ercinica: dalle zone esterne, in Sardegna sud-occidentale, fino alle zone interne, nel settore nord-orientale. La catena ha direzione NO-SE ed è caratterizzata da raccorciamenti e da una zonazione tettonico-metamorfica tipica delle orogenesi da collisione continentale.

L'età ercinica della deformazione è ben definita sia su basi stratigrafiche che radiometriche.

La polarità metamorfica varia con continuità dalla zona a basso metamorfismo, che caratterizza la Sardegna sud-occidentale, alla facies anfibolitica (facies metamorfica ad alte temperature e a medie pressioni) della parte nord-orientale e da una altrettanto netta variazione dello stile strutturale.

In generale quindi la struttura geologica della Sardegna è soprattutto rappresentata da plutoniti granitiche e da metamorfiti paleozoiche nonché, in minore entità, da formazioni vulcaniche e sedimentarie post-erciniche.

In senso cronostratigrafico, la geologia regionale sarda può essere così schematizzata:

- Paleozoico;
- Mesozoico;
- Cenozoico.

3.2 Assetto stratigrafico del Campidano e della fossa del Cixerri

Le conoscenze stratigrafiche sul semi-graben campidanese provengono soprattutto da sondaggi profondi svolti per la ricerca di idrocarburi. I primi tre pozzi (Oristano 1 – Oristano 2 - Campidano 1) perforati a terra tra il 1961 e il 1964 da SAIS hanno raggiunto profondità intorno ai 1800 m.

La serie stratigrafica ricavata da queste perforazioni evidenzia un forte spessore di sedimenti quaternari e pliocenici, fra i quali si intercala un sottile orizzonte basaltico che copre un complesso miocenico marino, potente almeno 1000 metri, con intercalazioni vulcaniche alla base. Il pozzo AGIP attraversa una successione stratigrafica quasi identica a quella incontrata dai pozzi SAIS anche se si è rilevato un maggior spessore di tutte le formazioni dell'intervallo Quaternario-Oligocene, specialmente delle arenarie e dei conglomerati alla base del Miocene marino ("Formazione di Ussana", continentale, di età oligocenica), e delle vulcaniti andesitiche. In queste ultime il pozzo si è arrestato alla profondità di m 2377 sotto il fondo del mare. La potenza delle andesiti è risultata pari a 670 metri, mentre quella del sedimentario ad esse sovrastante è complessivamente di 1700 metri circa, comprendendo Quaternario, Pliocene, Miocene e Oligocene, presumibilmente non in continuità di sedimentazione. In complesso, i quattro pozzi hanno riscontrato nel sottosuolo formazioni geologiche presenti anche in affioramento nelle aree attigue al semi-graben campidanese, con spessori pressoché uguali, ad eccezione della Formazione di Samassi costituita da sedimenti clastici grossolani, la quale appare entro il graben assai più potente di quanto non si rilevi nei pochi e scarsi affioramenti individuabili a Nord di Cagliari. Questa formazione, sconosciuta prima della sua identificazione nei logs dei pozzi SAIS, caratterizza la fossa campidanese dimostrando che essa ha acquisito la sua attuale struttura proprio durante il Pliocene, iniziando, dopo aver partecipato alle vicende della fossa sarda fino al Messiniano, un nuovo ciclo subsidente che è ancora oggi in atto. Pur facendo parte della più grande "Fossa Sarda" compresa fra il Golfo dell'Asinara e quello di Cagliari, il semi-graben campidanese se ne differenzia proprio perché contiene la Formazione di Samassi, sintettonica, tipica di un ambiente di sedimentazione in rapida subsidenza.

I suoi sedimenti, spesso caotici, con spessori fino a 400-500 metri, si sono formati dal ciclo erosione-sedimentazione delle rocce mioceniche e testimoniano il forte sollevamento, ai bordi del Campidano, della

serie miocenica qua e là ricoperta dagli strati marini trasgressivi del Pliocene inferiore e, per contro, un abbassamento dell'area centrale campidanese.

Il bacino meridionale (Campidano di Cagliari) è molto più esteso e si approfondisce in mare verso Sud, in direzione della Tunisia.

La zona a SO della Sardegna, è rappresentata dalle litologie scistoso-metamorfiche Paleozoiche del basamento ercinico appartenenti alla zona a falde esterne e alla zona esterna a trust e pieghe, e da quelle magmatiche granitiche connesse all'orogenesi ercinica. Tali litologie occupano l'intera area montana e pedemontana posta a Sud e le zone collinari a Nord e ad Est del territorio.

I rilievi scistoso-calcarei paleozoici sono orlati da una fascia di detriti pedemontani, costituiti da grandi conoidi di deiezione modellati in una successione di ampi terrazzi, riferiti a diverse idrografie del Pliocene - Quaternario. Nelle incisioni dei depositi terrigeni continentali del fondovalle affiorano la "Formazione del Cixerri" e alcuni edifici coniformi di vulcaniti oligo — mioceniche tra cui emerge il duomo andesitico dell'Acquafredda. La Formazione del Cixerri, essendo discordante sul Paleozoico e sul Mesozoico, viene dalla maggior parte degli autori attribuita all'Oligocene e rappresenta comunque il tetto del "Lignifero", di età eocenica. È ricoperta dalle vulcaniti pre- mioceniche (PECORINI e POMESANO CHERCHI, 1969).

La porzione di territorio pianeggiante, incastonata tra i rilievi paleozoici e su cui sorge l'abitato di Siliqua, è la così detta "Fossa del Cixerri" che, secondo recenti studi (Carmignani et al., 2004), rappresenta una ampia sinclinale che si allunga per circa 30 km con asse EW di età Oligocenica. Tale area è colmata prevalentemente da depositi superficiali di età quaternaria, posti stratigraficamente sopra le formazioni sedimentarie paleogeniche e le vulcaniti oligo-mioceniche. Al di sotto delle formazioni suddette, in discordanza stratigrafica si trova il substrato roccioso costituito dal basamento paleozoico scistoso-metamorfico.

3.3 Inquadramento idrogeologico

L'area del bacino del Riu Cixerri include, in prossimità del suo limite meridionale, una piccola porzione del bacino del Rio Palmas.

Il Riu Cixerri, un tempo il più importante affluente del Flumini Mannu, è diventato corso d'acqua autonomo dopo che, a seguito dei lavori di bonifica nello Stagno di Santa Gilla, il suo alveo canalizzato è stato dotato di una foce indipendente. La sua lunghezza totale è 50,6 km e il suo bacino idrografico si estende su una superficie di 534,7 kmq.

A sud dell'abitato di Siliqua il Riu Cixerri riceve dalla destra idrografica il Riu de su Casteddu, un corso d'acqua che nasce M. Is Caravius e percorre con direzione S-N 19,2km. Il Riu de su Casteddu ha un

bacino con una superficie di 59 km e, in localita Medau Zirimilis, é sbarrato da una diga a scogliera con il paramento di monte rivestito in bitume. La capacità utile di invaso é di circa 16,65 milioni di mc.

Anche il Riu Cixerri in Loc. P.te Genna is Abis é stato sbarrato da una diga di notevoli dimensioni (Lago del Cixerri): 1300 m di lunghezza, 26 m nel punto di massima altezza. Lo sbarramento permette un invaso di 23,9 milioni di mc d'acqua. Si é resa necessaria la realizzazione di un manufatto a gravita massiccia in calcestruzzo in quanto i deflussi irregolari del corso d'acqua consigliavano uno sbarramento tracimabile.



Figura 3-3 – Schema idrogeologico del Foglio CARG 556 “Assemini”.

Sono state distinte diverse Unità Idrogeologiche sotterranee in base ai diversi caratteri di permeabilità delle rocce e dei depositi affioranti. Le Unità Idrogeologiche sono state classificate seguendo lo schema riportato nelle linee guida R.A.S. utilizzando quattro livelli con grado diverso di permeabilità:

- Impermeabile ($K < 10^{-7}$ cm/sec);
- Bassa Permeabilità ($10^{-4} > K > 10^{-7}$ cm/sec);
- Media Permeabilità ($10^{-2} > K > 10^{-4}$ cm/sec);
- Alta Permeabilità ($K > 10^{-2}$ cm/sec);

distinguendo due tipi differenti di permeabilità:

- per porosità;

- per fessurazione.

Sulla base delle caratteristiche di permeabilità, le litologie del territorio sono state classificate nella maniera seguente:

UNITÀ IDROGEOLOGICA	UNITÀ LITOLOGICA	DESCRIZIONE
Alluvioni plio-quadernarie	Alluvioni terrazzate, alluvioni attuali, Litofacies nel Subsistema di Portoscuso	Permeabilità per porosità medio-bassa; localmente medio-alta nei livelli a matrice più grossolana.
Detritico carbonatica oligo-miocenica inferiore	(Formazione del Cixerri) Argille siltose, arenarie quarzoso-feldspatiche in bancate, conglomerati eterometrici e poligenici debolmente cementati.	Permeabilità per porosità bassa
Detritico carbonatica eocenica.	Brecce di quarzo e idriti ben cementate (Litofacies nella Formazione del Cixerri). Calcarei di colore biancastro con resti di bivalvi e oogoni di corofite, brecce cementate e rari livelli carboniosi (Lignitifero)	Permeabilità complessiva media; media per porosità nei termini arenacei e conglomeratici; medio-alta per fessurazione e carsismo nei termini carbonatici; bassa per porosità nei termini argillosi
Vulcaniti oligomioceniche	Depositi di flusso piroclastico (Piroclastiti di Siliqua), debolmente cementati, grossolanamente stratificati. Daciti e andesiti porfiriche (Daciti e andesiti di Monte sa Pibionada).	Permeabilità per fessurazione complessiva medio-bassa, più alta nei termini con sistemi di fratturazione marcati (espandimenti ignimbrici e lavici) e più bassa nei livelli piroclastici ed epiclastici.
Magmatica paleozoica	Complesso intrusivo ercinico: leucograniti; Filoni idrotermali a prevalente quarzo e filoni di gabbro	Permeabilità complessiva bassa per fessurazione; localmente media in corrispondenza delle aree intensamente arenizzate o con sistemi di fratturazione sviluppati.
Metamorfica superiore paleozoica	Complesso metamorfico a metarenarie e metasiltiti	Permeabilità complessiva bassa per fessurazione, localmente in corrispondenza delle lenti carbonatiche per fessurazione.

Per il modello idrogeologico sito specifico delle aree di intervento, si faccia riferimento agli elaborati tematici prodotti, dove sono riportate le cartografie e le sezioni idrogeologiche di dettaglio. A causa della carenza di dati bibliografici disponibili non risulta possibile ricostruire le condizioni idrodinamiche.

4 PERICOLOSITÀ GEOMORFOLOGICA

In corrispondenza del tracciato di progetto, la Regione Sardegna, nel proprio Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.), perimetra un'area a pericolosità geomorfologica, classificata come a pericolosità nulla (Hg0).

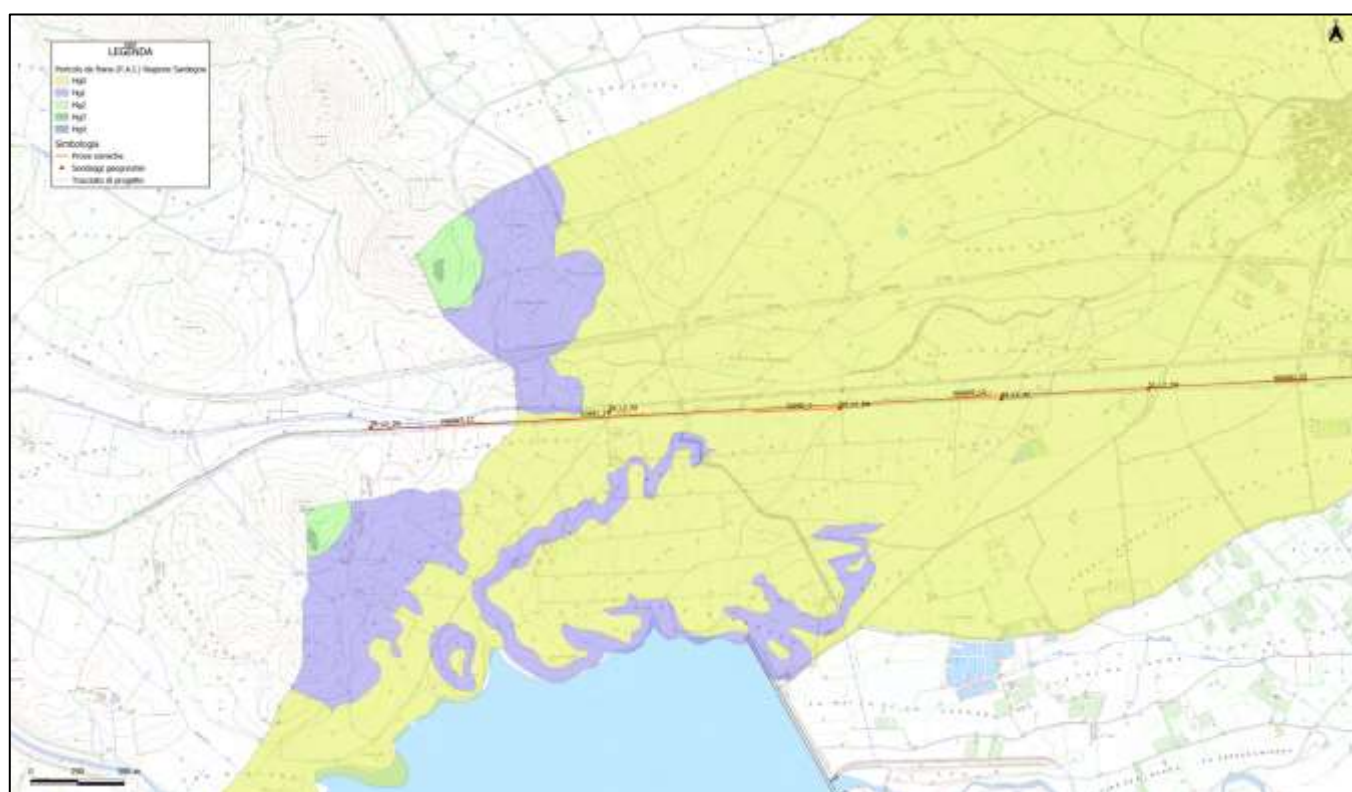


Figura 4-1. Stralcio della Carta di Pericolosità geomorfologica (PAI Regione Sardegna)

5 INQUADRAMENTO SISMICO

La normativa in materia di costruzioni vigente (D.M 14/01/2008 e sgg.) asserisce che “le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati si definiscono a partire

dalla pericolosità sismica di base del sito interessato dalla costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale”. Come stabilisce l’allegato A delle NTC/18 “la pericolosità sismica in un generico sito deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC/18 e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali”; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità sono forniti: in termini di valori di accelerazione massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC/18, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopracitate, in corrispondenza dei punti di un reticolo di riferimento i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (distanti non più di 10 Km) per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodo di ritorno dell’azione sismica T_r ricadenti in un intervallo di riferimento compreso tra 30 e 2475 anni, estremi esclusi. L’azione sismica così calcolata (azione sismica di base) è ulteriormente caratterizzata sulla base della risposta sismica locale, individuata dalle condizioni stratigrafiche e topografiche del sito. L’INGV, attraverso un reticolo di riferimento con maglia di 10 Km e un periodo di ritorno ricadente in un intervallo di riferimento (30-2475 anni) ha definito la pericolosità di base sull’intero territorio nazionale. Per qualunque punto del territorio nazionale non ricadente nei nodi di riferimento, i valori dei parametri (F_0 , a_g e T_c) di interesse per la definizione dell’azione sismica di progetto possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici nella maglia del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, secondo quanto riportato nell’Allegato A delle NTC/18. Le azioni di progetto si ricavano in funzione di:

- a_g : accelerazione orizzontale massima del sito;
- F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali si valuta il rispetto dei vari stati limite considerati, vengono definite a partire dalla pericolosità sismica di base sito-specifica. La pericolosità sismica è figlia di stime probabilistiche che sfruttano un catalogo dei terremoti, una zonazione simogenetica del territorio e relazioni di attenuazione sismica. La pericolosità sismica rappresenta la probabilità di eccedenza di un determinato parametro descrittivo del moto del terreno (intensità macrosismica, picco di accelerazione, valori spettrali). Questo è generalmente rappresentato in termini di accelerazione orizzontale massima attesa (o PGA_0) al substrato rigido (>800 m/s) con topografia piana e condizione di *free-field*, nonché di ordinate dello spettro elastico al substrato roccioso (bedrock). Questi valori sono riferiti a determinate probabilità di eccedenza P_{vr} nel periodo di riferimento VR . La rappresentazione di riferimento per le componenti dell’azione sismica è lo spettro di risposta elastico, che rappresenta la massima accelerazione

(o spostamento, o velocità) orizzontale o verticale a cui sarà sottoposto un oscillatore armonico con periodo proprio T ad un grado di libertà nel campo elastico. Il metodo semplificato previsto da normativa permette di ottenere lo spettro di risposta elastico in accelerazione (anche relativo alla superficie) della componente orizzontale tramite le espressioni di seguito riportate, le quali sono risolvibili a partire dai parametri di base (a_g , F_0 , T_C), dalla categoria di suolo (A, B, C, D, E) e dalla categoria topografica (T1, T2, T3 e T4), dalla Vita nominale (VN) e dalla Classe d'uso dell'Opera (Cu).

$$\begin{array}{ll}
 0 \leq T < T_B & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \\
 T_B \leq T < T_C & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \\
 T_C \leq T < T_D & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right) \\
 T_D \leq T & S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)
 \end{array}$$

Ne consegue che, per una determinata area, ricostruendo lo spettro di risposta elastico sia in superficie che e al bedrock è possibile ottenere informazioni quantitative riguardanti l'amplificazione sismica del sito (stratigrafica e topografica) e il contenuto in frequenza del moto. Il fenomeno di amplificazione sismica viene parametrizzato tramite i Fattori di Amplificazione Sismica. In alternativa all'approccio semplificato, è possibile un approccio numerico deterministico, come previsto negli studi di Risposta Sismica Locale (RSL) e negli studi di Microzonazione Sismica di III livello. Questa pratica richiede l'utilizzo di una serie di accelerogrammi spettro-compatibili alla sismicità di base del sito, che vengono (nei codici 1D di RSL) ricondotti ad un'onda s polarizzata sul piano orizzontale che oscilla in verticale dal bedrock alla superficie e viceversa e che, in caso di monostrato su bedrock, va in risonanza alle frequenze che sono i multipli dispari di $f = VS/4 \cdot H$.

Per valutare se un'opera strutturale è sicura bisogna far riferimento a degli stati limite, che possono verificarsi durante un determinato periodo di riferimento della stessa opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica, che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo, la vita nominale dell'opera, che congiuntamente alla classe d'uso, permette di determinare quel periodo di riferimento;
- una volta definito il periodo di riferimento e i diversi stati limite da considerare, una volta definite le relative probabilità di superamento, è possibile stabilire il periodo di ritorno associato a ciascun stato limite;

- a questo punto è possibile definire la pericolosità sismica di base per il sito interessato alla realizzazione dell'opera, facendo riferimento agli studi condotti sul territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro 2004 nell'ambito della convenzione-progetto S1 DPC-INGV 2004-2006 e i cui risultati sono stati promulgati mediante l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) 3519/2006.

Per la definizione dei parametri descritti la sismicità di base le NTC18 prendono in considerazione 4 possibili stati limite (SL), i quali sono individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono stati limite di esercizio (SLE) e due sono stati limite ultimi (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.

Gli stati limite di esercizio sono:

- Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

A partire dai parametri sopra elencati è possibile definire la sismicità di sito, fissando un coefficiente di smorzamento viscoso ξ , un fattore di alterazione dello spettro elastico η e definendo la categoria di

sottosuolo e topografica, è possibile definire l'azione sismica di progetto in termini di spettro di risposta elastico della componente orizzontale e verticale in superficie.

5.1 Categorie di sottosuolo

Per la caratterizzazione dinamica delle aree studio è possibile utilizzare la classificazione riportata nella seguente tabella, in cui la suddivisione in classi di sottosuolo avviene in funzione dei valori delle V_{seq} .

Categoria	Descrizione
A	<i>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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>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.</i>

Ai sensi delle NTC/2018: “La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (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, caratterizzato da V_s non inferiori a 800 m/s.

“Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la

profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione. 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 $H=30m$ nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità".

Quando non disponibili indagini indirette mirate alla definizione delle V_{seq} sito specifiche, per individuare la classe di sottosuolo si è utilizzata la classificazione riportata nella seguente tabella, in cui la suddivisione in classi di sottosuolo avviene in base ai valori di N_{spt} per terreni granulari e C_u per terreni coesivi.

	Descrizione del profilo stratigrafico	N_{spt} (colpi/30 cm)	C_u (kPa)
A	<i>Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi, caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m</i>	-	-
B	<i>Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 e 800 m/s ovvero resistenza penetrometrica $N_{SPT}>50$ e $c_u>250$ kPa</i>	> 50	> 250
C	<i>Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 e 360 m/s ($15<N_{SPT}<50$ e $70<C_u<250$ kPa)</i>	15 - 50	70 - 250
D	<i>Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di $V_{s,30}<180$ m/s ($N_{SPT}<15$, $C_u<70$ kPa)</i>	< 15	< 70
E	<i>Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di $V_{s,30}$ simili a quelli dei tipi C o D e spessore tra 5 e 20 m giacenti su un substrato di materiale più rigido con $V_{s,30}>800$ m/s</i>	-	-

5.2 Categorie topografiche

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva delle categorie topografiche fornite entro le NTC-2018, seguito da una schematizzazione grafica del contesto morfologico per la selezione della categoria.

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

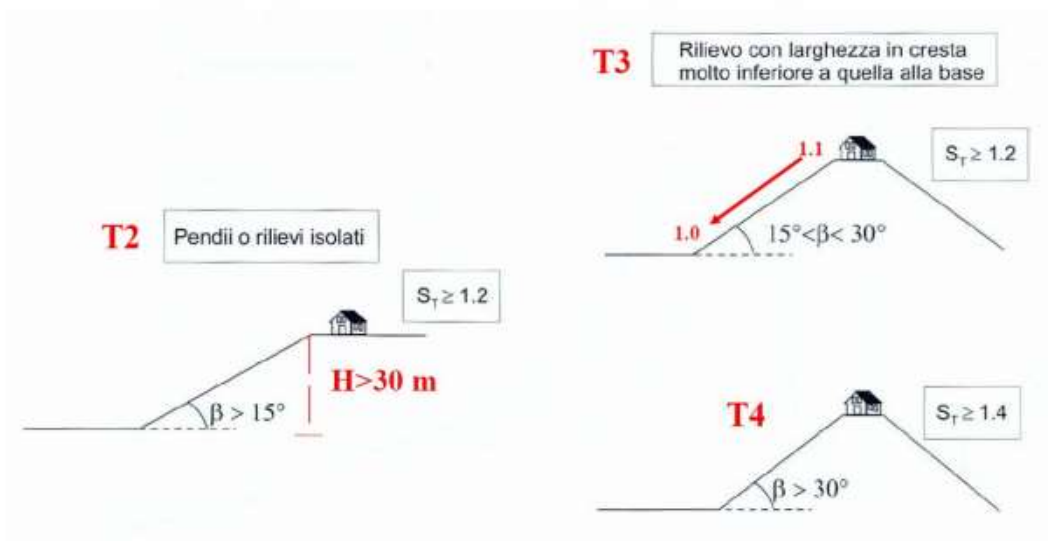
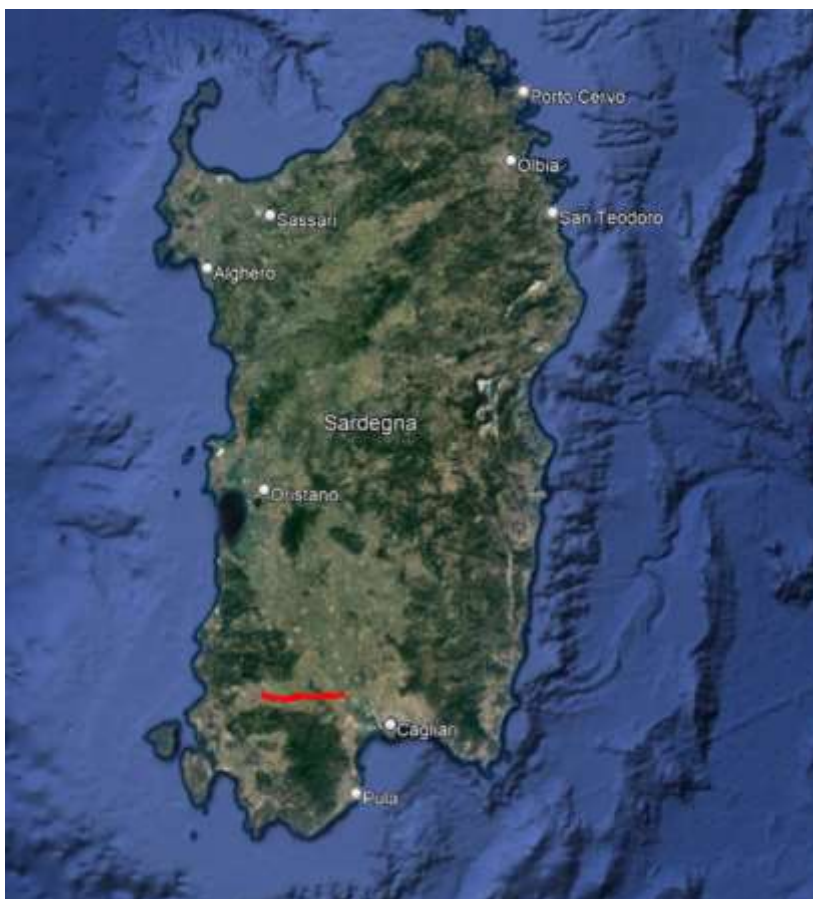


Figura 5-1 – Schematizzazione grafica delle condizioni morfologiche per la scelta della categoria topografica

5.3 Macro sismicità delle aree di intervento

La raccolta di dati storici relativi la macrosismicità delle aree oggetto di intervento consente una prima approssimazione delle caratteristiche tettono-sismiche di sito e consente di ottenere data, intensità macrosismica e magnitudo momento degli eventi indicativi relativi all'area in esame. Questi stessi eventi registrati, combinati con una schematizzazione delle sorgenti sismogenetiche e con leggi di attenuazione del moto sismico, sono la base per il calcolo probabilistico delle PGA0 relative il bedrock sismico. Per il territorio non sono stati registrati eventi sismici storici.

I territori interessati dal progetto di raddoppio della linea Decimonammu-Villamasargia, non risultano cartografati all'interno di zone sismogenetiche (Meletti e Valensise 2004) come rappresentato nella seguente figura.



*Figura 5-2 – Zone sismogenetiche in Sardegna (Meletti e Valensise 2004).
Per la Regione Sardegna non risulta perimetrata alcuna zona sismogenetica*

Per una successiva schematizzazione della macro-sismicità: il territorio nazionale è suddiviso in 4 differenti zone sismiche, ognuna contrassegnata da un diverso parametro a_g (PGA0), espresso come una frazione dell'accelerazione di gravità. I territori comunali sono classificati come Zona sismica 4.

Zona	Valore di a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

Sulla base dei dati precedentemente presentati: il metodo proposto in “Indirizzi e criteri di microzonazione sismica” (I.C.M.S. 2009) per la stima del valore di Magnitudo di progetto attesa al sito viene di seguito riportato:

- Si considera sempre la zonazione sismogenetica (ZS9), Secondo la quale la sismicità può essere distribuita in 36 zone, a ciascuna delle quali è associata una Magnitudo Momento massima M_{wmax} .
- Per i siti che ricadono all'interno di una delle 36 zone sismogenetiche predette si assume come M il valore di M_{wmax} .
- Ai fini della verifica a liquefazione e per i siti che non ricadono in alcuna zona si determinano le minime distanze (R) dalle zone (j) circostanti e si controlla per ciascuna di esse se la magnitudo M_i della zona è inferiore alla Magnitudo fornita dalla relazione $M_s=1+3\log(R)$. Se ciò accade, la verifica a liquefazione non è necessaria. Se invece è necessaria: si assume il valore di Magnitudo M_i più alto fra quelli per i quali la verifica risulta necessaria.

In alternativa è possibile il processo di disaggregazione della PGA. Questo processo permette di valutare, grazie alla mappatura delle zone sismogenetiche, il contributo di vari scenari Magnitudo-distanza epicentrale ($M-R$) alla determinazione della PGA0 di sito. In un certo senso si può considerare come il processo inverso a quello probabilistico per la costruzione della mappa di pericolosità sismica del territorio italiano.

Nel caso specifico, per i comuni interessati dal progetto, non esistono grafici e tabelle del processo di disaggregazione delle PGA elaborate da INGV in quanto l'area in cui ricadono i territori comunali risultano essere a bassissima sismicità.

Sulla base dell'analisi della totalità delle indagini geofisiche eseguite e sulla base del modello geologico elaborato nel corso del presente studio (cfr. par. 9), è possibile assumere le seguenti categorie sismiche di sottosuolo lungo il tracciato:

Pk 0,0 – Pk 3,000: Cat. C

Pk 3,000 – Pk 5,250: Cat. B

Pk 5,250 – Pk 5,450: Cat. A

6 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Ai fini del presente studio, l'assetto litostratigrafico e le caratteristiche geotecniche e sismiche dei litotipi costituenti il sottosuolo è stata effettuata sulla base dei dati acquisiti nel corso della campagna di indagini in sito eseguita e consistita nella realizzazione di:

- sondaggi meccanici a carotaggio continuo spinti a profondità di -30/45,00 m da p.c., con esecuzione di prove S.P.T. (Standard Penetration Test), prove di permeabilità in foro di sondaggio e prelievo di campioni di terreno da sottoporre a test di laboratorio geotecnico;

- indagini sismiche di superficie per mezzo di tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves);
- indagini sismiche HVSr;
- prospezioni sismiche a rifrazione con interpretazione tomografica dei risultati.

6.1 Sondaggi a carotaggio continuo

L'indagine ha previsto la realizzazione di n. 5 sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo, spinti sino a profondità di -30,00/-45,00 m dal piano campagna.

Nella seguente Tabella si riporta il quadro riassuntivo dei sondaggi meccanici realizzati in sito con indicazione delle profondità investigate, del livello idrico misurato a fine sondaggio ed in data 20 febbraio e delle eventuali attrezzature installate in foro di sondaggio.

SONDAGGIO	PROFONDITÀ [m da p.c.]	ATTREZZATURA INSTALLATA	DATA ESECUZIONE	LIVELLO IDRICO A TERMINE INDAGINI [m da p.c.]	LIVELLO IDRICO IN DATA 10.02.23 [m da p.c.]
S01-L02	-30,00	Tubo PVC 3"	09/01/2023	15,00	n.a.
S02-L02	-30,00	Piez. in PVC 3"	10/01/2023	21,00	10,20
S03-L02	-30,00	Tubo PVC 3"	12/01/2023	21,00	n.a.
S04-L02	-45,00	Piez. in PVC 3"	14/01/2023	-	10,50
S05-L02	-30,00	Tubo PVC 3"	17/01/2023	4,20	n.a.

Si sottolinea che i campioni prelevati nel corso dell'esecuzione dell'indagine originariamente nota come S06-L02 e rinominata S01-L3 e le prove di permeabilità eseguite, eseguita nelle immediate adiacenze del lotto 2 ed originariamente ivi ricompresa, sono stati tenuti in considerazione per la caratterizzazione geologica - geotecnica dell'estremità occidentale del profilo, date le simili caratteristiche geologiche del substrato.

N.B: i valori di livello di falda letti in data 20 febbraio sono da considerarsi in questa fase cautelativamente più affidabili, in quanto successivi ad un periodo di piogge significative e non influenzati da acqua di perforazione.

6.2 Indagini sismiche MASW

Per ottenere informazioni indirette sulle proprietà fisiche e reologiche dei terreni indagati e quindi al fine di valutare il parametro V_{S30} caratteristico dell'area, l'indagine ha previsto l'esecuzione di indagini sismiche per mezzo della tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

Il metodo MASW è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (nel nostro caso geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

Il metodo di indagine MASW si distingue in "attivo" e "passivo" (Re.Mi.) (Zywicki, 1999; Park e Miller, 2006; Roma, 2006) ed ai fini del presente studio è stato utilizzato il "metodo Masw attivo".

I profili sono stati eseguiti su lunghezze pari a c.ca 48 metri con acquisizione effettuate con stendimenti di 24 geofoni interdistanziati di 2 metri.

L'elaborazione dei dati acquisiti consente la trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "Phase Velocity-Frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica. In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio V_s in funzione della profondità. Dall'inversione della curva di dispersione si ottengono i modelli medi di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativi delle aree investigate.

PROVA	INTERVALLO PROFONDITÀ [m da p.c.]	V_{seq} (m/s)	CATEGORIE NTC-18
MASW 1L2	0,0 – 30,0	464	B
MASW 2L2	0,0 – 30,0	456	B
MASW 3L2	0,0 – 30,0	474	B
MASW 4L2*	0,0 – 30,0	582	B

*Si sottolinea che l'indagine originariamente nota come MASW 4L2 e rinominata MASW 1L3, eseguita nelle immediate adiacenze del lotto 2 ed originariamente ivi ricompresa, è stata tenuta in considerazione per la caratterizzazione geologica dell'estremità occidentale del profilo, ancorché esterna al profilo stesso, date le simili caratteristiche geologiche del substrato.

6.3 Indagine sismica HVSR

Per ottenere informazioni indirette sulle proprietà fisiche e reologiche del terreno indagato e quindi al fine di valutare il parametro V_{seq} caratteristico dell'area, ovvero la media delle velocità delle onde sismiche superficiali è stata realizzata n. 5 indagine sismica HVSR per mezzo di tomografo digitale.

Il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) proposto da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente modificato da Nakamura (1989), si basa sull'analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del rumore sismico registrato in un sito. Il rumore sismico è presente ovunque ed è generato sia da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) che dall'attività antropica. Il rumore sismico è indicato spesso come microtremore poiché è caratterizzato da oscillazioni molto deboli (dell'ordine dei $\mu\text{m/s}$). I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma soprattutto da onde superficiali, la cui velocità è comunque prossima a quella delle onde S (Mulargia et al., 2007).

Esiste un consenso generale sull'efficacia del metodo HVSR nel fornire stime sulla frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo, almeno nel caso di un modello semplice unidimensionale con strato soffice al di sopra di uno strato rigido (Lachet and Bard, 1994). In questo caso semplice, tale frequenza f_0 è legata allo spessore h e alla velocità delle onde di taglio V_s dello strato soffice attraverso la seguente relazione:

$$f_0 = \frac{V_s}{4 \cdot H} H_z$$

Naturalmente, la complessità stratigrafica del sottosuolo produce curve H/V sperimentali con svariati picchi, per le quali non è possibile applicare un modello semplice. Tuttavia, attraverso il confronto delle curve sperimentali con curve H/V sintetiche, è possibile derivare profili di velocità delle onde di taglio S nel sottosuolo, in presenza di adeguati vincoli, ottenuti da prove geognostiche dirette o da altre indagini geofisiche (Fäh et al., 2001).

La tecnica di misura del rumore sismico richiede tempi di registrazione pari a 15-20 minuti e necessita di sensori tridirezionali da sismologia con messa in bolla, digitalizzatore 24 bit con elevata dinamica, elevato guadagno ed elevata frequenza di campionamento nativo, con minimizzazione del rumore elettro/meccanico.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un Tomografo digitale "TROMINO", prodotto da Micromed S.p.a., dotato di n. 3 sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini sismiche di superficie realizzate in sito con indicazione delle frequenze fondamentali del sito.

PROVA	PROFONDITA' BEDROCK (m)
HVSR 1L2	>49.60
HVSR 2L2	>45.80
HVSR 3L2	>22.60

Si sottolinea che l'indagine originariamente nota come HVSR 4L2 e rinominata HVSR 1L3, eseguita nelle immediate adiacenze del lotto 2 ed originariamente ivi ricompresa, è stata tenuta in considerazione per la caratterizzazione geologica dell'estremità occidentale del profilo, ancorchè esterna al profilo stesso, date le simili caratteristiche geologiche del substrato.

Per quanto riguarda le prime due prove a stazione singola, si possono identificare due sismostrati principali, il primo superficiale di sedimenti sciolti al di sotto del quale è presente il secondo sismostrato, con un chiaro contrasto di impedenza, identificabile con il bedrock sismico ad una profondità di circa 50 m da piano campagna. La terza prova invece, presenta una sottile coltre di terreno sciolto fino ad una profondità di circa 5 metri, a cui segue una porzione di roccia probabilmente alterata che crea un medio contrasto di impedenza (evidente dal salto di velocità) fino alla profondità di circa 22,60 m; a detta profondità troviamo è identificabile l'ultimo, e più netto, contrasto di impedenza correlabile al bedrock sismico integro in posto.

6.4 Prospezioni sismiche a rifrazione onde P

La tecnica di base, comune a tutte le metodologie di sismica attiva, consiste nel generare artificialmente delle onde sismiche e nel misurare il tempo impiegato da tali onde per percorrere lo spazio compreso tra il punto sorgente, e una serie di ricevitori, geofoni, allineati lungo la zona da indagare. Le onde d'interesse per il metodo a rifrazione sono le onde di volume, rifratte criticamente alle interfacce mostranti differenti proprietà fisiche.

Dal punto di vista operativo, l'indagine sul terreno viene realizzata con un gruppo di geofoni distribuiti lungo un profilo a distanza ravvicinata (generalmente qualche metro) e collegati a un sismografo attraverso un cavo multipolare. Quando il terreno su cui si trovano i geofoni viene sollecitato, questi trasmettono un segnale analogico in forma di impulso elettrico al sismografo, il quale gestisce contemporaneamente più geofoni su canali di ascolto differenti, converte gli impulsi elettrici per tutti i geofoni in formato digitale, li amplifica, li filtra e li immagazzina in un disco rigido o in una memoria allo stato solido.

La sorgente impiegata può essere di tipo impattante (mazza battente, massa in caduta), impulsivo (cannoncino sismico) o vibrazionale (autocarri Vibroseis, vibrator Mini-Sosie).

I dati raccolti durante un'indagine sismica a rifrazione sono i sismogrammi registrati sui canali disponibili nel sismografo utilizzato, ciascuno riferito a un particolare geofono della linea sismica. Su questi sismogrammi è necessario scegliere il tempo in cui le onde prodotte nei vari punti di energizzazione raggiungono i sensori. Tali tempi, indicati come primi arrivi o tempi di tragitto, si riferiscono ad onde che si propagano direttamente dalla sorgente ai ricevitori per i geofoni vicini alla sorgente stessa e invece, a partire da una certa distanza (distanza di cross-over), sono relativi alle onde rifratte criticamente alle discontinuità di impedenza acustica (dove per impedenza acustica si intende il prodotto tra velocità sismica all'interno di un mezzo e la sua densità). I primi arrivi presi per tutti i ricevitori vengono diagrammati in funzione della distanza dalla sorgente per tutte le sorgenti, ottenendo così un unico grafico che riporta tutte le curve dei tempi di tragitto o dromocrone. Tale grafico è molto utile per l'identificazione dei principali rifrattori individuati dall'indagine, dato che per ciascuna sorgente i cambi di pendenza nella curva dei tempi di tragitto indicano uno specifico rifrattore; inoltre gli arrivi dallo stesso rifrattore, per sorgenti differenti, mostrano un buon grado di parallelismo [Reynolds, 1997].

Il metodo di elaborazione più attendibile è rappresentato dalla tomografia sismica. Tale modello è una rappresentazione idealizzata di una sezione del sottosuolo e presenta una serie di parametri che sono le grandezze fisiche da stimare a partire dai dati raccolti in fase di misura. La risposta del modello è rappresentata dalle velocità delle celle in cui viene suddivisa la porzione di sottosuolo da indagare.

Sono stati dunque elaborati tre profili sismici "R1, R2 ed R3", di lunghezza rispettivamente pari a 480 metri, con direzione W (geofono n. 1) - E (geofono n. 48). I 48 geofoni verticali e orizzontali utilizzati per eseguire le misurazioni sono stati posizionati seguendo una distanza intergeofonica, pari a 10 metri.

Per maggiori dettagli riguardo le prospezioni sismiche di superficie svolte, si rimanda agli elaborati scaturiti dall'indagine e raccolti nell'elaborato RR0P02R69IGGE0005001A.

6.5 Risultati Prove SPT in foro

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove SPT eseguite, come descritto al par. 6.1.2, nel corso del sondaggio.

PROVA	PROFONDITÀ DA P.C. [m]	PROVA SPT (n. colpi/15 cm)	NSPT	LITOLOGIA PREVALENTE
S01L2	1,50 - 1,95	19/26/23	49	Sabbia limosa argillosa di colore marrone scura
	3,00 - 3,45	15/15/17	32	Sabbia ghiaiosa bruno chiari con inclusi poligenici
	4,50 - 4,95	15/17/15	32	
	6,00 - 6,45	18/18/17	35	
	7,50 - 7,95	18/23/20	43	Sabbia argillose limose di colore bruno rossastro con inclusi poligenici
	9,00 - 9,45	17/25/23	48	
	10,50 - 10,95	37/32/38	70	
	12,00 - 12,45	38/43/49	92	
	15,00 - 15,45	32/40/38	78	
	20,00 - 20,45	33/31/35	66	
25,00 - 25,45	15/17/20	37		
S02L2	1,50 - 1,95	7/7/9	16	Sabbia ghiaiosa con inclusi poligenici eterometrici
	3,00 - 3,45	15/18/18	36	
	4,50 - 4,95	33/36/35	71	
	6,00 - 6,45	19/22/26	48	
	7,50 - 7,95	32/35/R	R	
	9,00 - 9,45	R	R	Ghiaia sabbiosa sciolta
	10,50 - 10,95	R	R	
	12,00 - 12,45	R	R	Sabbie argillose limose di colore marrone bruno rossastro con inclusi poligenici
	15,00 - 15,45	R	R	
	20,00 - 20,45	29/32/27	59	
25,00 - 25,45	15/17/20	37		
S03L2	1,50 - 1,95	R	R	Ghiaia con sabbie limose ed inclusi grossolani
	3,00 - 3,45	R	R	Sabbie ghiaiose sciolte brune
	4,50 - 4,95	R	R	
	6,00 - 6,45	R	R	
	7,50 - 7,95	R	R	Sabbie limose argillose di colore marrone bruno rossastro e inclusi poligenici
	9,00 - 9,45	R	R	
	10,50 - 10,95	R	R	
	12,00 - 12,45	R	R	
	15,00 - 15,45	40/18/24	42	Alternanza decimetrica di sabbie limose argillose marroni brune rossastre e ghiaie e sabbie limose bruno grigiastre rossastre
	20,00 - 20,45	R	R	
25,00 - 25,45	R	R		
S04L2	1,50 - 1,95	16/18/18	36	Limi debolmente argillosi rossastri omogenei da molto consistenti a duri con cementazione debole
	3,00 - 3,45	36/45/R	R	
	4,50 - 4,95	39/46/R	R	

6.6 Risultati prove di permeabilità

Le prove di permeabilità a carico variabile sono state destinate alla misura della conducibilità idrica dei depositi attraversati; sono state eseguite prove a carico idraulico variabile all'interno dei fori di sondaggio a varie profondità, misurando gli assorbimenti di acqua nel terreno.

Nell'elaborato RR0P02R69SGGE0005001A sono riportati i rapporti redatti a corredo di ciascuna prova con indicazione delle letture degli abbassamenti in relazione ai tempi progressivi in forma diagrammatica e tabellare.

I risultati delle prove sono sintetizzati nella tabella riportata di seguito:

SONDAGGIO	PROFONDITÀ PROVA [m]	LITOLOGIA PREVALENTE	COEFFICIENTE DI PERMEABILITÀ (m/s)
S01L2	-4,30 da p.c.	Sabbie ghiaiose	2,92 x 10 ⁻⁷
	-10,00 da p.c.	Sabbia argillosa limosa	6,18 x 10 ⁻⁷
S02L2	-4,00 da p.c.	Sabbia ghiaiosa	5,15 x 10 ⁻⁷
	-16,00 da p.c.	Sabbie argillose limose	2,72 x 10 ⁻⁷
S03L2	-2,00 da p.c.	Sabbia ghiaiosa	6,90 x 10 ⁻⁵
	-20,00 da p.c.	Sabbie limose argillose	2,09 x 10 ⁻⁷
S04L2	-11,20 da p.c.	Arenaria debolmente siltitica	6,60 x 10 ⁻⁸
	-10,00 da p.c.	Arenaria debolmente siltitica	2,68 x 10 ⁻⁸
S05L2	-2,00 da p.c.	Lave (Daciti)	1,85 x 10 ⁻⁶
	-15,00 da p.c.	Sabbie limose (ceneri)	2,81 x 10 ⁻⁷
S06L2 (cfr. par 6.1)	-4,00 da p.c.	Sabbie limosa argillosa	2,53 x 10 ⁻⁶
	-20,00 da p.c.	Lave (Daciti)	8,39 x 10 ⁻⁸

6.7 Risultati prove dilatometriche

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove dilatometriche eseguite in foro di sondaggio.

S01L2					
Profondità: 4,00 – 4,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	3,5	1	5,736	2,750	12,9
2	6,5	3,5	6,971	5,813	33,2
3	10,5	6,5	88,350	7,176	30,9
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	10,5	1	8,835	4,730	29,7
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			

S01L2					
1					
2	6,5	1	6,971	4,997	35,7
3	10,5	1	8,835	5,629	38,0

S01L2					
Profondità: 20,00 – 20,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	4	2	4,241	2,650	20,2
2	7	4	5,810	4,269	25,0
3	11	7	7,780	5,937	27,8
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	12	1,5	7,780	2,800	25,8
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	7	1,5	5,810	3,370	28,9
3	11	1,5	7,780	4,222	34,2

S02L2					
Profondità: 7,00 – 7,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	5	1	3,886	0,800	16,6
2	8	5	5,488	3,985	25,6
3	12	8	7,426	5,527	27,0
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	12	1	7,402	1,980	26,0
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	8	1	5,488	2,120	26,7
3	12	1	7,426	3,153	33,0

S02L2					
Profondità: 11,00 – 11,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	9	1	3,006	1,775	83,4
2	15	9	3,596	3,061	143,9
3	21	15	4,445	3,665	98,6
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	21	1	4,280	2,150	120,4
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	15	1	3,596	2,354	144,5
3	21	1	4,445	2,770	153,1

S03L2					
Profondità: 4,00 – 4,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	9	1	5,100	2,970	48,2
2	15	9	5,862	4,990	88,2
3	21	15	7,051	5,853	64,2
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	21	1	6,950	3,650	77,7
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	15	1	5,862	3,830	88,4
3	21	1	7,051	4,513	101,1

S03L2					
Profondità: 20,00 – 20,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			

S03L2					
1	8	3	2,529	1,440	58,9
2	14	8	3,083	2,564	148,1
3	22	14	3,850	3,176	152,2
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	22	2	3,850	1,932	133,8
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	14	3	3,083	2,199	159,5
3	22	3	3,850	2,481	178,1

S04L2					
Profondità: 7,00 – 7,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	11	3	1,603	0,305	79,1
2	16	11	2,383	1,675	90,6
3	22	16	3,697	2,395	59,1
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	22	3	3,440	0,295	77,5
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	16	3	2,383	0,931	114,8
3	22	3	3,697	1,349	103,8

S04L2					
Profondità: 11,00 – 11,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	14	2	1,783	1,140	239,5
2	26	14	2,238	1,779	335,7
3	38	26	2,669	2,258	374,2
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			

S04L2					
N	Pmax	Pmin			
1	38	2	2,669	1,315	341,0
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	26	2	2,238	1,432	381,9
3	38	2	2,669	1,623	441,6

S05L2					
Profondità: 4,00 – 4,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	14	4	0,361	0,218	897,9
2	26	14	0,441	0,366	2051,1
3	42	26	0,538	0,443	2152,8
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	42	4	0,538	0,298	2030,9
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	26	4	0,441	0,313	2213,0
3	42	4	0,538	0,354	2648,5

S05L2					
Profondità: 20,50 – 21,00					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	9	3	1,251	0,980	284,4
2	15	9	1,474	1,262	361,8
3	24	15	1,803	1,470	346,7
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	24	3	1,803	1,050	357,7
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa

S05L2					
N	Pmax	Pmin			
1					
2	15	2	1,474	1,162	533,5
3	24	2	1,803	1,349	621,2

S06L2					
Profondità: 7,00 – 7,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	16	4	0,627	0,476	1020,6
2	28	16	0,729	0,626	1496,5
3	40	28	0,826	0,733	1661,9
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	40	4	0,828	0,522	1509,1
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	28	4	0,729	0,548	1704,6
3	40	4	0,826	0,591	1966,3

S06L2					
Profondità: 11,00 – 11,50					
Poisson: 0,27					
Moduli di deformabilità Ei			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	18	4	0,592	0,453	1289,0
2	30	18	0,681	0,594	1763,5
3	44	30	0,791	0,680	1617,8
Moduli elastici EG			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1	44	4	0,789	0,478	1649,8
Moduli elastici Ti			D finale	D iniziale	Eav MPa
N	Pmax	Pmin			
1					
2	30	4	0,681	0,504	1878,7
3	44	4	0,791	0,543	2069,9

6.8 Risultati prove di laboratorio geotecnico

Nell'elaborato RR0P02R11PRGE0006001A sono presentati i certificati di prova relativi ai test di laboratorio geotecnico descritti al par. 5.2.1 effettuati sui campioni di terreno prelevati secondo lo schema indicato al par. 5.1.2.

7 CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA (GSI)

La caratterizzazione geomeccanica dei litotipi afferenti alle due unità presenti nel sottosuolo dell'area indagata è stata effettuata il metodo GSI (Geological Strength Index, Hoek, 1995), il quale si fonda sulla semplice identificazione, mediante apposite tabelle proposte (cfr. Figura 7-1), di una categoria di appartenenza dell'ammasso roccioso in esame in funzione di una sua descrizione qualitativa, nella quale si fa riferimento alle osservazioni in sito, tendenti ad individuare le famiglie di discontinuità e le condizioni delle loro superfici di contatto.

Questa classificazione si basa sul concetto che la resistenza di un ammasso roccioso fratturato dipende dalle proprietà dei ponti di roccia intatta ed anche dalla libertà di questi di scivolare e ruotare se soggetti a sollecitazioni. Questa libertà è controllata dalla forma geometrica dei frammenti di roccia intatta e dalle condizioni delle superfici di contatto tra gli stessi. Ad un estremo della classificazione si trovano ammassi rocciosi costituiti da frammenti angolari caratterizzati da superfici di discontinuità pulite e rugose ed associati ad elevate caratteristiche di resistenza, mentre all'estremo opposto si trovano rocce costituite da frammenti immersi in materiale alterato.

Sulla base del rilievo geologico condotto in campo, delle osservazioni di affioramento tra la pk 5+330 c.ca e la fine del tracciato e delle carote estratte nel corso della perforazione dei sondaggi S04 ed S05, nell'area interessata dal progetto il substrato roccioso risulta costituito da due formazioni rocciose principali, le Tonaliti di Monte Su Silixianu, facenti parte delle vulcaniti acide di Siliqua, e la Formazione sedimentaria del Cixerri (arenarie arcose e peliti)

L'unica roccia affiorante, lungo il taglio del versante presente dalla citata pk 5+330 in poi, è costituita da tonaliti fratturate ed alterate da successiva attività idrotermale, con RQD compreso tra il 25-50% e superfici di discontinuità alterate.

Facendo riferimento alla classificazione GSI in funzione delle caratteristiche strutturali e delle condizioni delle discontinuità (cfr. Figura seguente), di seguito si riporta la classificazione dei due distinti ammassi:

- 1) **Tonaliti di Monte Su Silixianu:** Le tonaliti affiorano nel taglio del versante esistente in corrispondenza del sondaggio S5, che a sua volta è stato interamente perforato all'interno del medesimo litotipo. In affioramento le Tonaliti sono interessate da numerose famiglie di fratturazione e da fenomeni idrotermali tardo vulcanici molto pervasivi. Anche in sondaggio, i primi 10-12 m sono decisamente alterati e fratturati, caratterizzati da un basso RQD.

La struttura dell'ammasso può essere definita di tipo *blocky/disturbed*, che combinata con le condizioni delle superfici di discontinuità descritte, e qui sintetizzabili dalla colonna “*poor*”, determinano un indice GSI compreso tra 25 e 35.

- 2) **Formazione del Cixerri:** LI litotipi afferenti a questa formazione non affiorano nell'area in esame, ma sono presenti nel sondaggio S4 a profondità superiori a 7,5 m. La roccia presenta poche famiglie di joints e fratture, ma la classificazione geomeccanica deve necessariamente tenere conto di due importanti fattori: il primo è la presenza di intervalli non litificati ed ingenerale una certa povertà di cemento nelle arenarie, la seconda è l'alternanza tra un litotipo più competente arenaceo ed uno meno competente siltitico

Stante quanto sopra riportato, la struttura dell'ammasso può essere definita di tipo *blocky*, che combinata con le condizioni delle superfici di discontinuità descritte, le alternanze tra litotipi e le sottili porzioni non litificate, qui sintetizzabili dalla colonna “*very poor*”, determinano un indice GSI compreso tra 20 e 30.

Resta inteso che le condizioni di alterazione della roccia non sono da considerarsi costanti, ma necessariamente soggette ad un peggioramento man mano che ci si avvicina alla superficie ed un progressivo miglioramento verso maggiori profondità, dove l'alterazione penetra con più difficoltà.







<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced is water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Figura 7-1 – Classificazione GSI per ammassi rocciosi

8 PROGETTO DI RADDOPPIO FERROVIARIO DELLA LINEA DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA: QUADRO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO DI RIFERIMENTO

La ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo indagato scaturisce dall'analisi dei risultati conseguiti a seguito della campagna di indagine geognostica eseguita.

L'intervallo stratigrafico interessato dal progetto corrisponde alla porzione superiore dei depositi alluvionali terrazzati e non nella zona del semi-graben del Campidano (Olocene) e della fossa del Cixerri.

Da un punto di vista stratigrafico, tenendo conto dell'eterogeneità delle caratteristiche litologiche dei terreni presenti nell'intera area è possibile distinguere diverse facies, che si succedono in modo non sequenziale nel sottosuolo, con rapporti stratigrafici talvolta fortemente eteropici e conseguenti repentine variazioni e cambi di facies sia in senso orizzontale che verticale.

Tale assetto stratigrafico con l'indicazione della distribuzione delle diverse unità geologiche in profondità è rappresentato, per il tracciato in progetto, nella sezione litostratigrafica proposta nell'elaborato RR0P02R69F4GE0001001A.

La reale geometria delle diverse unità è accertata solo in corrispondenza delle verticali d'indagine prese in esame e grazie ai risultati delle indagini sismiche a rifrazione con elaborazione tomografica, mentre per le altre distribuzioni, trattandosi di estrapolazioni su base sedimentologica in funzione delle indagini, sono da tener conto possibili variazioni locali.

Le facies individuate sono:

- **ALLUVIONI ED ALLUVIONI TERRAZZATE - OLOCENE**
 - Alluvioni ghiaiose sabbiose con inclusi eterogenei poligenici a spigoli vivi sub arrotondati, di colore bruno chiaro, umide, da moderatamente a molto addensate con valori di N_{spt} elevati o a rifiuto;
 - Alluvioni sabbioso argilloso limose con inclusi eterogenei poligenici di varie forme e dimensione, di colore marrone bruno rossastro, da addensate a molto addensate con valori di N_{spt} compresi tra i 30 e 50 colpi;
 - Alluvioni limoso argillose con inclusi eterogenei poligenici, umide ed omogenei, da molto consistenti a dure con debole cementazione.
- **SUCCESSIONE VULCANICO-SEDIMENTARIA – OLIGOMIOCENICA**
 - Tonaliti di Monte Su Silixianu - Tonaliti a struttura olocristallina con fenocristalli di Pl, Cpx, Opx, Am, Qtz, in ammassi intrusivi; rari filoni aplitici e fenomeni di alterazione idrotermale particolarmente intensi e pervasivi nella porzione più superficiale dell'ammasso .

- **SUCCESSIONE SEDIMENTARIA PALEOGENICA**

- Formazione del Cixerri - Arenarie quarzoso-feldspatiche (Ar) alternate ad argilliti-siltiti di colore rossastro (Sa), in bancate con frequenti tracce di bioturbazione, conglomerati eterometrici e poligenici debolmente cementati.

Per la caratterizzazione geotecnica delle facies descritte e per la definizione dell'azione sismica di progetto (NTC 2018), si rimanda agli esiti delle indagini puntuali realizzate e agli elaborati progettuali di riferimento.

8.1 Modello idrogeologico e possibili interferenze con le opere in progetto

A seguito delle misure piezometriche eseguite all'interno dei piezometri installati al termine dell'esecuzione delle indagini è emersa la presenza di circolazione idrica sotterranea a profondità pari a circa -10,00 m dal piano campagna lungo tutto il tratto in progetto. Particolare attenzione dovrà pertanto essere posta ad eventuali ristagni e/o venute d'acqua ed in corso d'opera dovrà essere valutata l'opportunità di realizzare interventi di impermeabilizzazione all'interno degli scavi o di sistemi drenanti atti all'aggottamento e allontanamento delle acque. In corrispondenza del sondaggio S04, vista la natura dei terreni in sito, è possibile la formazione di un battente d'acqua temporaneo nei depositi alluvionali di copertura, al di sopra del substrato roccioso relativamente impermeabile.

I terreni attraversati sono rappresentati nella porzione ad est da terreni sciolti, alternati tra prevalenza grossolana e fine, con diverse permeabilità (come descritto nel capitolo 8); tali depositi possiedono una permeabilità k compresa tra 10^{-7} e 10^{-5} .

Nella porzione ad ovest del tracciato, la successione stratigrafica è rappresentata da una sottile coltre alluvionale sciolta, dopodiché è presente il substrato roccioso, con permeabilità inferiore a 10^{-7} , probabilmente dovuta alla condizione di fratturazione dell'ammasso roccioso.

In corrispondenza di substrato costituito da litotipi siltitici afferenti alla Formazione di Cixerri è possibile un modesto accumulo di acqua al di sopra della roccia, nel sottosuolo, in occasione di periodi di piogge intense. Detto accumulo avrà comunque carattere temporaneo e sarà smaltito in profondità dalle fessurazioni primarie e secondarie del substrato roccioso.

9 DESCRIZIONE DEI SETTORI D'INTERVENTO

Le analisi condotte e le ricostruzioni degli assetti geologico-strutturali riportati in carta hanno permesso di definire, in maniera commisurata al grado di approfondimento del progetto in corso, il contesto geologico di riferimento e tutti gli elementi di potenziale criticità per le opere in progetto. Nelle pagine che seguono viene quindi analizzato l'intero settore di intervento, opportunamente suddiviso in tratti omogenei relativi ai sottoinsiemi geologici presenti. Per ogni singolo tratto, in particolare, vengono descritte tutte le principali caratteristiche geologiche s.l. e gli aspetti salienti ai fini progettuali.

Nel seguito, si fa quindi esplicito riferimento a quanto riportato nelle apposite cartografie tematiche ed al profilo longitudinale ricostruito lungo gli assi del tracciato ferroviario previsto. In particolare, per quanto concerne le unità geologiche presenti nei vari settori di interesse, si riportano direttamente i nomi contenuti nella cartografia geologica realizzata a corredo della presente relazione. Infine, per quanto riguarda gli spessori e l'assetto delle singole unità litostratigrafiche, si fa riferimento ai dati contenuti negli studi bibliografici a disposizione e alle risultanze delle diverse indagini geognostiche appositamente realizzate lungo il tracciato in esame nel corso della campagna di indagini condotta.

9.1 Pk 0,0 – Pk 3,000

Il tracciato attraversa una vallata molto ampia, dai fianchi modestamente acclivi, a quote comprese tra i 14 ed i 45 m sul livello del mare, e caratterizzata dalle alluvioni terrazzate.

I depositi di materiali sciolti sono organizzati in strati di potenza da metrica a decametrica, costituiti da clasti di granulometria, colore e genesi varie, normalmente arrotondati o sub arrotondati, in stato di addensamento moderato. Si tratta di ghiaie e sabbie con variabili percentuali di limo ed argilla, per lo più compresi tra 0 e 25%, più fini nella porzione orientale del tratto (pk 0 – pk 1+250), costituita da sabbie argillo-limose, e alternati a livelli più francamente ghiaioso sabbiosi nella porzione più occidentale, presenti a profondità comprese tra 0 e 12m da p.c.. Sono talvolta presenti modeste lenti di argilla e limo, di spessore non superiore al metro. Si sottolinea che prove penetrometriche effettuate in precedenza nei dintorni della pk 0 hanno dato rifiuto a profondità non superiori ai 3 m da p.c.

Questi terreni sono talvolta coperti da spessori minimi di materiale rimaneggiato dall'attività agricola o rimodellato dall'attività antropica. La frazione più superficiale, talvolta di spessore decimetrico, è un orizzonte organico vegetale.

Le prove di permeabilità restituiscono valori di k pari a 10^{-7} , eccetto che per le ghiaie e sabbie più permeabili presenti lungo il sondaggio S3 tra il piano campagna e 5m di profondità dove si ha un $k = 10^{-5}$.

Le prove SPT eseguite in alluvioni hanno restituito valori di N_{spt} sempre > 40 , spesso a rifiuto. Il rifiuto delle prove SPT è però da interpretarsi nel contesto di sedimenti non particolarmente addensati, e dunque per lo più legato alla granulometria grossolana degli stessi. Le prove MASW restituiscono valori di V_s

compresi tra 400 e 600 m/s per l'intervallo in questione, a profondità comprese tra il piano campagna e 30 m. per profondità superiori ai 30 m, in analogia con quanto riscontrato nel lotto 1, le Vs presentano valori >1000 m/s e le Vp valori >2500 m/s, presumibilmente a causa di uno stato di maggiore addensamento dei materiali.

Substrato roccioso: Il substrato nell'area è presumibilmente presente a quote >200m dal piano campagna, e pertanto non di nostro interesse

9.2 Pk 3,000 – Pk 5,250

Il tracciato è caratterizzato da un substrato roccioso costituito dalla Formazione del Cixerri (alternanze di arenarie e siltiti), ricoperta da terreni alluvionali sciolti. È delimitato ad est dalla presenza in profondità della zona di taglio distensiva orientata circa N160 e inclinata verso est, che determina lo sprofondamento del substrato roccioso e la formazione della valle tettonica del Campidano; ad ovest invece è interrotto dall'emersione in superficie del substrato roccioso, costituito da vulcaniti acide. La caratterizzazione di questo tratto è stata effettuata dall'analisi del sondaggio S4 e dalle stese sismiche ad interpretazione tomografica 1 e 2.

Depositi alluvionali: depositi di materiali limosi molto addensati e debolmente cementati, organizzati in strati di potenza metrica, rossastri, con passate di ghiaie, normalmente arrotondati o sub arrotondati. Questi terreni sono talvolta coperti da spessori minimi di materiale rimaneggiato dall'attività agricola o rimodellato dall'attività antropica.

L'unica prova di permeabilità effettuata in questi terreni restituisce un valore di k pari a 10-8.

Le prove SPT eseguite in questi terreni hanno restituito valori di N_{spt} a rifiuto, pari a 36 per la parte più superficiale (1,5m da p.c.). Le stese sismiche a rifrazione con interpretazione tomografica restituiscono valori di Vs e Vp crescenti con la profondità che raggiungono in valori di Vs= 450 m/s e Vp = 1600 m/s per profondità pari a circa 7 m, oltre le quali comincia la roccia.

Substrato roccioso: Il substrato nell'area è costituito da rocce appartenenti alla Formazione di Cixerri, ed in particolare da alternanze di arenarie quarzoso feldspatiche con rare passate conglomeratiche, grigie o rossastre, alternate a siltiti rosso vinaccia con inclusi siltitici grigi. Talvolta sono presenti brevi intervalli sub-metrici debolmente litificati o francamente sciolti. Il substrato compare a 7 m dal p.c. ed è caratterizzato da valori di N_{spt} a rifiuto e permeabilità con k pari a 10-8. Si rimarca un'inclinazione pari a circa 30° degli strati, di cui però non è stato possibile ricostruire direzione ed immersione.

Le stese sismiche a rifrazione con interpretazione tomografica restituiscono valori di Vs e Vp crescenti con la profondità: Vs compreso tra 600 1250 m/s e Vp compreso tra 1600 e 2500 m/s.

9.3 Pk 5,250 – Pk 5,450

Il tracciato è invece caratterizzato da un substrato costituito da rocce appartenenti alla successione vulcanica di Siliqua (Formazione delle Tonaliti di Monte Su Silixianu), affioranti o subaffioranti. Non vi è terreno sciolto, se non per esigui spessori superficiali inferiori al metro e mezzo, e comunque non in prossimità del sondaggio S5. La caratterizzazione di questo tratto è stata effettuata dall'analisi del sondaggio S5 e dalla MASW 3, oltre che dall'osservazione dello sbancamento in roccia esistente nell'area.

Substrato roccioso: Il substrato nell'area è costituito da rocce appartenenti alla Formazione delle Tonaliti di Monte Su Silixianu, ed in particolare da rocce magmatiche cristalline intrusive acide. La roccia è caratterizzata da buone caratteristiche geotecniche nelle porzioni sane; purtroppo si presenta interessata da parecchie famiglie di fratture lungo le quali si sono verificati fenomeni idrotermali tardivi: questa peculiare situazione ha determinato, ad esempio, un faticosissimo avanzamento della sonda nell'esecuzione dei primi 9 metri circa del sondaggio S5, dato che la roccia aveva un comportamento meccanico comparabile a quello di grossi ciottoli spigolosi. Si sottolinea che il taglio del versante attualmente esistente a monte dell'attuale ferrovia, eseguito tutto nella medesima litologia riscontrata nel sondaggio S5, non è contenuto da reti o muri ma è stato effettuato a gradoni di circa due metri, presumibilmente per evitare una superficie di sbancamento troppo alta, date le caratteristiche non eccezionali dell'ammasso. Le superfici di frattura che interessano la roccia presentano un'orientazione che non interferisce con la stabilità della superficie di sbancamento attuale.

La roccia è caratterizzata da permeabilità con k compreso tra 10^{-6} e 10^{-7} . La MASW effettuata nell'area restituisce valori di V_s crescenti da circa 400 m/s nei pressi della superficie a circa 750 m/s a -50m da p.c., in buon accordo con una diminuzione progressiva della pervasività delle fratture e un miglioramento delle caratteristiche geotecniche dell'ammasso.

10 VERIFICHE DI SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

Nel paragrafo 7.11.3. Risposta Sismica Locale e stabilità di sito delle nuove NTC-2018 è assertito che *“il sito presso il quale è ubicato il manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii e/o manufatti, occorre procedere a interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili a liquefazione...”*. Ai sensi delle NTC 2018 la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti caratteristiche:

- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata
- $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa.

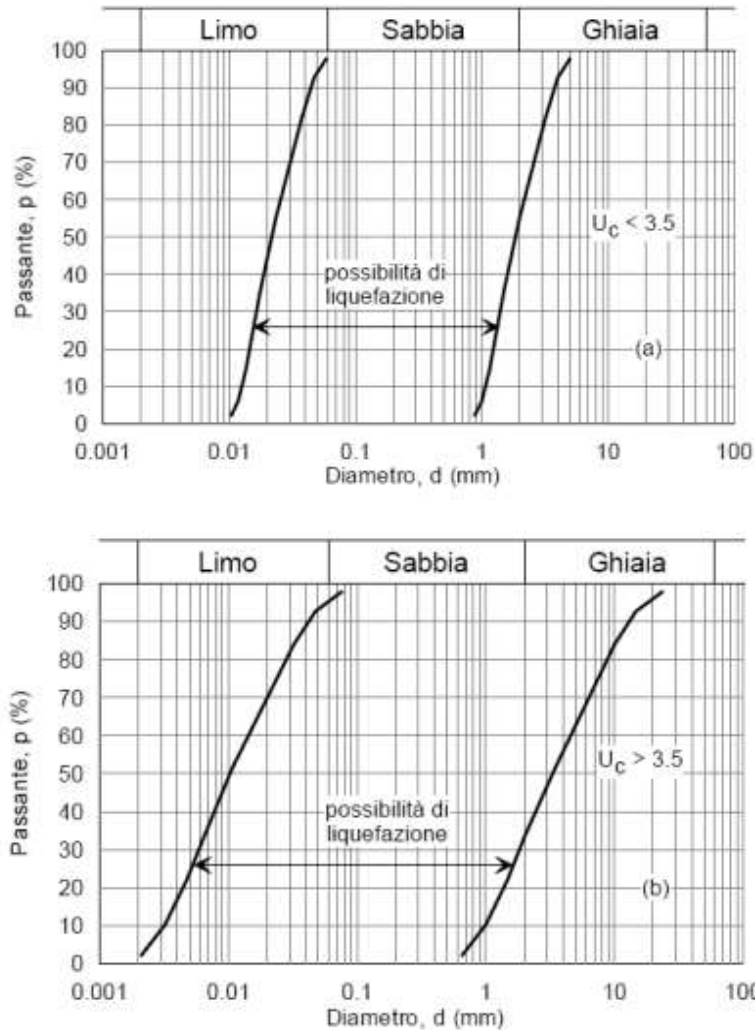


Figura 10-1 -fusi granulometrici di terreni suscettibili a liquefazione.

Considerata la sismicità di base del sito, è possibile omettere la verifica al fenomeno di liquefazione, in quanto, in base alla zona sismogenetica e alla disaggregazione della PGA_0 di sito, l'area risulta caratterizzata da una accelerazione attesa di inferiore a $a_g=0.1 g$.

11 BIBLIOGRAFIA

Assorgia A., Balogh K., Lecca L. et alii (1995) "Volcanological characters and structural context of Oligo-Miocene volcanic successions from Central Sardinia (Italy)" "Estratto dal volume Atti del Convegno dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL "Rapporti Alpi – Appennino e Guide alle escursioni" Peveragno (CN) 31 maggio – 1 giugno 1994

Assorgia A., Barca S., Spano C. "Lineamenti stratigrafici, tettonici e magmatici del terziario della Sardegna" In: La "Fossa Sarda nell'ambito dell'evoluzione Geodinamica cenozoica del Mediterraneo occidentale", Villanovaforru (CA) - (1997)

Assorgia, A., Barca S., Casula A., G. Spano C. "Le successioni sedimentarie e vulcaniche del Miocene nei dintorni di Giave e Cossoine (Logudoro, Sardegna NW)". Bollettino della Società Sarda di Scienze Naturali XXVI - (1988)

Assorgia A., Barca S., Spano C. "A syntethesis on the Cenozoic stratigraphic, tectonic and volcanic evolution in Sardinia (Italy)" Boll. Soc. Geol. It., 116,ROMA - 1997

Barca S., Melis E., Annino E., Cincotti F., Ulzega A., Orrù P., Pintus C. "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 557 Cagliari" APAT – Servizio Geologico d'Italia *Progetto CARG*

Barca S., Melis E., Calzia P., Patta E.D., Rizzo R., Serri P. "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 547 Villacidro" ISPRA – Servizio Geologico d'Italia *Progetto CARG*

Barca S., Serri R., Rizzo R., Forci A., Calzi P., Perusati P.C. "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 565 Capoterra" ISPRA – Servizio Geologico d'Italia *Progetto CARG*

Beccaluva L., Civetta L., Macciotta G., Ricci C. A. "Geochronology in Sardinia: results and problems". Rend. Soc. It. Min. Petr. 40,- (1985)

Beccaluva L., Deriu M., Macciotta G., Savelli C., Venturelli G. "Geochronology and magmatic characters of the Pliocene-Pleistocene volcanism in Sardinia (Italy)". Bull. Volcanol. N. 40 (3), 1977.

Biasini A., D'Alessandro L., De Marco R. "Carta della stabilità geomorfologica in Italia" a scala 1:1.500.000 allegata alla "Relazione sullo stato dell'ambiente in Italia" – Ministero dell'Ambiente (1992).

Bralia, A., Ghezzi, C., Guasparri, G. & Sabatini, G. "Alcuni aspetti genetici del batolite ercinico sardo" Rend. Soc. Miner. Petr., 37 - (1981)

Carboni S., Lecca L. "Osservazioni sul Pleistocene medio-sup. della penisola del Sinis (Sardegna occidentale)" Boll. Soc. Geol. It., 104 - (1985)

Carmignani L. et al. "Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000". Servizio Geologico d'Italia, Firenze (1996)

Carmignani L., Barca S., Di Pisa A., Gattiglio M., Oggiano G.; Pertusati P.C. "Schema dell'evoluzione del basamento sardo" In: Struttura della Catena ercinica in Sardegna. Centroofset.- Siena (1991)

Carmignani L., Cocozza T., Ghezzi C., Pertusati P. C., Ricci C. A. "Lineamenti del basamento paleozoico Sardo" in: Carmignani L., Cocozza T., Ghezzi C., Pertusati P.C. & Ricci C. A. (Editors), Guida alla geologia del Paleozoico Sardo. Soc. Geol. It. 11-24.(1982)

Carmignani L., Oggiano G., Barca S., Conti P., Salvadori I., Eltrudis A., Funedda A., Pasci S. "Geologia della Sardegna. Note illustrative della Carta Geologica in scala 1:200.000". Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia LX, 283 – Roma - 2001

Casula G., Cherchi A., Montadert L., Murru M., Sarria A.E. "The Cenozoic graben system of Sardinia (Italy): geodynamic evolution from new seismic and field data". Marine and Petroleum Geology 18 - 2001

Cocozza T., Jacobacci A., Nardi R., Salvadori I. "Schema stratigrafico-strutturale del Massiccio Sardo-Corso e minerogenesi della Sardegna". Memorie della Società Geologica Italiana 13. (1974)

Dipartimento di Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico – (2014) "Mappa di Classificazione Sismica del Territorio Nazionale al 2014" in: Recepimento dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica (Ordinanza n. 3271)" pubblicata sulla G.U. Parte I - n. 72 del 8 maggio 2003

Di Simplicio P., Ferrara G., Ghezzi C., Guasparri G., Pellizzer R., Ricci C. A., Rita F., Sabatini G. "Il metamorfismo ed il magmatismo paleozoico della Sardegna." Rend. Soc. It. Mineral. Petrol., 30, - (1974)

Di Stefano A., Pederzoli S. "Una introduzione allo studio del pianeta" Seconda edizione - Italo Bovolenta editore, Zanichelli – 2019

Fadda A. F., Pala A. "Le acque della Sardegna" Cagliari - (1992)

Fais S., Klingele E.E., Lecca L. "Oligo-Miocene Half Graben Structure In Western Sardinian shelf (Western Mediterranean): reflection seismic and aeromagnetic data comparison". Marine Geology, 133 - (1996)

Fanucci F., Morelli D. "Caratteri e cronologia della deriva del blocco sardo-corso" - Atti del XIII Congresso Nazionale dell'AIOL (Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia) 2000

Funedda A., Pertusati P.C., Carmignani L., Uras V., Pisanu G., Murtas M. "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 Foglio 540 Mandas" ISPRA – Servizio Geologico d'Italia *Progetto CARG*

Mazzei R., Oggiano G. "Messa in evidenza di due cicli sedimentari nel Miocene dell'area di Florinas (Sardegna settentrionale)". Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, Memorie, Serie A 97(A)- (1990)

Montaldo P. "Carta geologica del Campidano centrale alla scala 1:50.000, con note illustrative". Pubbl. Ist. Geol. Appl. Univ. Cagliari - (1959)

Pala A., Pecorini G., Porcu A., Serra S. "Schema geologico-strutturale della Sardegna" Estratto dal volume: "Ricerche geotermiche in Sardegna con particolare riferimento al graben del Campidano"- CNR P.F. Energetica RF 10-PISA 1982

Pala A., Pecorini G., Porcu A. "Struttura idrogeologica della soglia di Siliqua, fra la fossa del Campidano e la fossa del Cixerri (Sardegna meridionale)". Boll. Soc. Geol. It., 95, 1976.

Pala A., Vacca S. "Geologia e idrogeologia di un settore del Campidano centrale (Sardegna centro-meridionale)". Pubbl, n. 304 Ist. Geol. Paleont. e Geogr. Fis. Univ. Cagliari, Cagliari, 1980.

Pecorini G., Pomesano Cherchi A. "Ricerche geologiche e biostratigrafiche sul Campidano meridionale (Sardegna)". Mem. Soc. Geol. It., 8, Pisa - (1969)

Peruzza L. Pessina V. "Zone sismiche e pericolosità in Italia: dalle norme regionali alla comunicazione del rischio" in Geologia Tecnica & Ambientale n. 1/2016

Sgavetti M. "Analisi preliminare degli elementi morfostrutturali lineari della Sardegna".- (1982)

Tilia Zuccari A. "Relazione stratigrafica sul pozzo Oristano 2 (Riola Sardo) Sardegna occidentale" Boll. Soc. Geol. It., 88, Roma, (1969).

Ulzega A., "Carta geomorfologica della Sardegna Marina e Continentale", C.N.R., P.F. Oceanografia e Fondi Marini, Novara, Istituto Geografico De Agostini, 1988.