
	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-All.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE – RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>1</b> di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 00	

## SITO ENIREWIND DI PORTO TORRES (SS)



### BONIFICA PALTE FOSFATICHE

(ex Nuraghe Fase 2)

### PROGETTO MODULO PALTE FOSFATICHE

### ALL.5 - RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA



0		Ing. G. Locci	ENI Rewind	ENI Rewind	30/06/2023
Indice di Rev.	Descrizione Revisione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data
Questo documento è di proprietà Eni Rewind S.p.A. che se ne riserva tutti i diritti.					

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>2</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA

### INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO</b>	<b>4</b>
2.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO A GRANDE SCALA	4
2.2	INQUADRAMENTO LITOLOGICO	7
2.3	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	10
2.3.1	Geomorfologia in Area Minciareda	11
2.3.2	Geomorfologia in Area Minciareda Sud	12
2.4	INDAGINI GEOLOGICO-GEOTECNICHE 2018	13
2.4.1	Indagine MASW	17
2.5	CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA DEI TERRENI DELL'AREA DI INTERVENTO	18
2.6	IDROGEOLOGIA DEL SITO DI STABILIMENTO	19
2.6.1	Assetto idrogeologico locale	21
2.6.1.1	Definizione del livello piezometrico di riferimento per la progettazione della vasca	23
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOTECNICO</b>	<b>27</b>
3.1	CARATTERISTICHE GENERALI DEL PROGETTO	27
3.2	INQUADRAMENTO SISMICO	27
3.2.1	Quadro Normativo	27
3.2.2	Determinazione dei parametri sismici di progetto	29
3.2.2.1	Coefficienti sismici di progetto	31
3.3	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI MATERIALI	33
3.3.1	Terreni naturali presenti in sito (substrato)	33
3.3.2	Materiale per la realizzazione degli argini e del piano posa barriera di confinamento	33
3.3.3	Argilla	33
3.3.4	Rifiuti	34
3.3.5	Materiali granulari per la formazione degli strati drenanti	34
3.3.6	Argilla copertura	34
3.3.7	Strato superficiale di copertura	34
3.3.8	Caratteristiche geotecniche delle barriere composite	35
3.4	VERIFICHE DI STABILITÀ	36
3.4.1	Combinazioni di carico	36
3.4.1.1	Verifiche combinazione fondamentale	36
3.4.2	Metodologia di calcolo	38
3.4.3	Analisi di stabilità del MPF	39
3.4.3.1	Verifica dell'argilla in scarpata	41
3.4.3.2	Verifica del paramento esterno dell'argine di contenimento e della copertura definitiva	43
3.5	CEDIMENTI	45
3.5.1	Valutazione dei cedimenti del fondo	45
3.5.1.1	Geometrie di calcolo e valutazione dei carichi	45
3.5.1.2	Calcolo dei cedimenti in corrispondenza del piano posa barriera di confinamento	48
3.5.2	Valutazione dei cedimenti del materiale non recuperabile conferito nel MPF	49

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>3</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## 1 PREMESSA



Il presente elaborato costituisce la relazione geologica e geotecnica a corredo della progettazione del Modulo Palte Fosfatich (nel seguito MPF) per lo smaltimento, previo adeguato trattamento, dei materiali derivanti dalla bonifica dell'area ex deposito delle Palte Fosfatich, costituiti da Palte Fosfatich e dall'area ex TPF, da ubicarsi all'interno del Sito di interesse nazionale di Porto Torres (SS), in corrispondenza della cosiddetta "Area Minciareda Sud".

L'obiettivo del documento è quello di definire le caratteristiche geotecniche dei terreni su cui insistono le opere di progetto e ricavare un modello geotecnico sito specifico, sulla cui base sono stati compiuti i dimensionamenti e le verifiche geotecniche.

I parametri geotecnici utilizzati nei calcoli sono stati dedotti dalle indagini geotecniche eseguite nell'ambito delle varie fasi di caratterizzazione del sito e delle aree limitrofe, nonché dall'esperienza della scrivente su contesti simili.

Sulla base del modello geotecnico adottato sono state eseguite le seguenti verifiche:

- Verifica della massima inclinazione ammissibile per un fronte di coltivazione a carattere temporaneo;
- Definizione della geometria e delle caratteristiche dei materiali che andranno a costituire i rilevati arginali del bacino di conferimento;
- Definizione della geometria e delle caratteristiche dei materiali che andranno a costituire la copertura definitiva del Modulo Palte Fosfatich;
- Valutazione dei cedimenti in corrispondenza del piano di imposta del sistema di impermeabilizzazione delle opere di progetto (MPF).

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. 4 di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

### 2.1 Inquadramento geologico a grande scala

Il territorio sul quale si svolge l'attività industriale ENI è caratterizzato dalla presenza estesa delle cosiddette "coperture meso-cenozoiche" costituite da depositi sedimentari e vulcanici che ricoprono il sottostante basamento varisco. Strutturalmente l'area è collocata in corrispondenza della cosiddetta "fossa sarda" o "rift sardo", costituita in realtà da una serie di bacini sedimentari terziari che interessano una fascia meridiana, più o meno continua, tra il Golfo di Cagliari e quello di Sassari.

La Sardegna settentrionale nel periodo oligo-miocenico è stata interessata da due cicli tettono-sedimentari che hanno portato alla formazione di alcuni bacini di differente natura ed età. Si distinguono Bacini transtensivi aquitaniani con orientamento Nord 60° e Bacini estensionali burdigaliani ad andamento Nord 160°. Questi ultimi hanno direzione Nord-Nordovest e interessano la parte occidentale della Sardegna settentrionale, dal Golfo dell'Asinara, a Nord, fino all'altopiano di Campeda, a Sud. I Bacini estensionali burdigaliani si configurano come semi-graben con faglie principali su bordi opposti, connessi da zone di taglio di trasferimento prevalentemente trascorrenti ad orientamento Est-Ovest (cfr. Figura 2.1).

Uno di questi bacini è il bacino di Porto Torres che si approfondisce verso Est in corrispondenza della faglia di punta Tramontana e che prosegue a mare verso Nord (Carmignani et al., 2001). A questo bacino sedimentario appartengono i depositi che affiorano in gran parte del territorio comunale ("Relazione descrittiva del modello geologico", PUC 2014 Porto Torres).

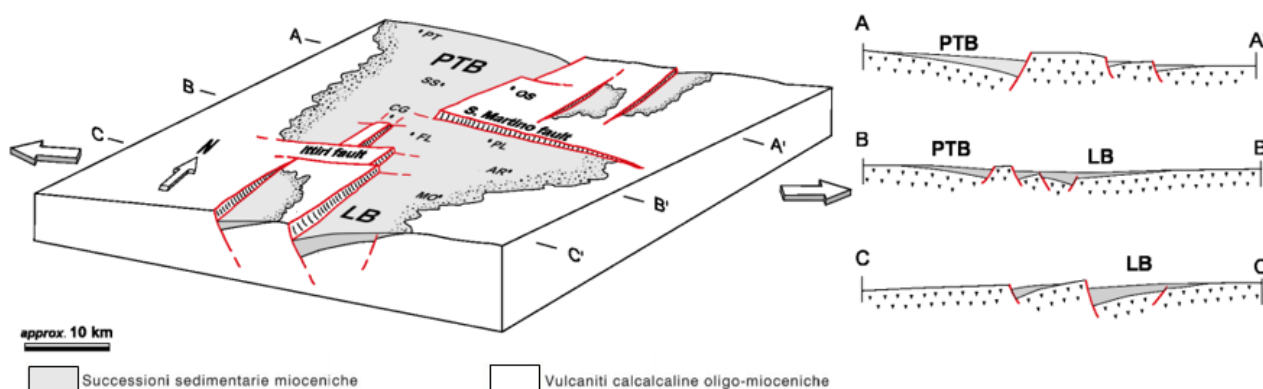




Figura 2.1: Rappresentazione schematica dei bacini burdigagliani della Sardegna settentrionale, LB=Logudoro Basin, PTB=Porto Torres basin, PT=Porto Torres (Funedda et al., 2000).

Il territorio di Porto Torres, si viene a collocare sul margine occidentale di questa struttura; sul lato occidentale affiorano le formazioni più antiche sulle quali si è strutturato il bacino terziario, rappresentate dalle formazioni calcareo dolomitiche mesozoiche, sul lato orientale trovano invece ampio sviluppo le sequenze sedimentarie mioceniche che

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>5</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

colmano la struttura. Interposte tra il basamento mesozoico e le formazioni sedimentarie mioceniche, affiora una stretta cintura di vulcaniti, anch'esse di età terziaria, messe in posto durante le prime fasi della tettonica terziaria.



Le formazioni mesozoiche rappresentano il substrato sul quale si è strutturato il bacino terziario. Le sequenze mesozoiche comprendono formazioni che vanno dal Trias medio (Muschelkalk), affioranti alla base delle colline intorno a Monte Elva, al Giurassico superiore (Malm), affiorante nei rilievi sventrati dall'attività di cava a Monte Alvaro e Monte Rosè. Tali sequenze sono rappresentate in prevalenza da carbonati marini, calcari e dolomie, in genere ben cementate, disposte in strati di media potenza. Tutta la sequenza mesozoica è interessata da un blando piegamento, ad assi Est - Nordest che determina un sistema di sinclinali e anticlinali aperte, a loro volta intersecate da faglie distensive dirette Nord 60° o Nord-Sud. Sono prevalenti giaciture sub-orizzontali o poco inclinate. Tali litologie sono notevolmente permeabili e ospitano una falda profonda di notevole portata (*"Relazione descrittiva del modello geologico"*, PUC 2014 di Porto Torres), affiorano ad occidente dell'area in esame (cfr. Figura 2.2).

Direttamente sovrapposte al basamento mesozoico vi sono dei depositi vulcanici, derivanti da una fase vulcanica di tipo calco alcalino che ha accompagnato l'apertura della fossa sarda. Tale fase si è sviluppata in più eventi che hanno generato una struttura costituita da espandimenti ignimbrici, alternati a tufi e colate, talvolta con chimismo intermedio. Nell'area affiorano ignimbriti saldate a composizione riodacitica, presenti lungo una stretta fascia a ridosso della zona industriale. Tali vulcaniti sono state datate all'Oligocene superiore; sono composte da litologie generalmente ben saldate disposte in banchi di spessore metrico, con intercalati episodi cineritico pomicei talvolta interessati da una alterazione anche intensa.

Alla fase vulcanica ha fatto seguito, nel Burdigaliano – Langhiano medio superiore, una lunga subsidenza che ha portato alla deposizione di una potente sequenza sedimentaria miocenica. Questa trova ampio sviluppo in tutto il settore centrale e orientale del territorio comunale (cfr. Figura 2.2). Sono distinguibili diversi litotipi che rappresentano diversi ambienti deposizionali che si sono susseguiti sia in ordine temporale, marcando un progressivo approfondimento del bacino miocenico, sia in senso trasversale in relazione alla reciproca collocazione all'interno del bacino stesso.

Alla base della sequenza, ed in prossimità del margine del bacino, si ritrovano dei sedimenti clastici continentali caratterizzati da conglomerati, depositi di spiaggia o depositi lacustri, passanti lateralmente e verso l'alto a biocalcareni e calciruditi, caratteristici di ambienti di più alta energia, seguiti ancora da sedimenti marnoso arenacei finemente stratificati che testimoniano l'istaurarsi di un ambiente di mare più profondo. L'età di queste formazioni può essere inquadrata tra il Burdigaliano e il Serravalliano. I termini più recenti della sequenza miocenica affiorano tra la zona industriale e Fiume Santo e sono rappresentati da argille e conglomerati di ambiente alluvionale. Tutta la sequenza mostra una giacitura sub-orizzontale con debole inclinazione verso il settore sudorientale.

Le formazioni più recenti sono rappresentate dai depositi quaternari, che comprendono dei depositi di spiaggia antichi, conservati in piccoli lembi lungo un terrazzo marino collocato qualche metro sopra l'attuale livello del mare ed attribuibili al Tirreniano, seguiti da depositi continentali probabilmente Wurmiani, costituiti da argille sabbiose, sabbie

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>6</b> di 49	
<b>LOGO APPALTATORE</b> 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

argillose, sabbie e limi, con un colore tipicamente rossastro.

Nelle valli principali che ospitano i corsi d'acqua più importanti (Rio Mannu e Rio di Ottava, Fiume Santo) si individuano infine dei depositi alluvionali attuali e recenti composti in prevalenza da sabbie, limi e limi argillosi ("Relazione Studio di compatibilità geologico-geotecnica", PUC 2014 di Porto Torres).

Dalla carta geo-litologica riportata nella successiva figura, si evince la distinzione, dal punto di vista geografico, dei due domini oligo-miocenici presenti nel territorio comunale:

- la serie sedimentaria di ambiente marino e continentale, costituita prevalentemente da conglomerati sabbiosi, calcareniti, arenarie calcaree e calcari biocostruiti, che occupa la porzione centro-orientale dello stabilimento;
- le formazioni vulcaniche, costituite da vulcaniti ad affinità calco-alcalina e dai loro prodotti di alterazione, che occupa la porzione centro-occidentale dello stabilimento.

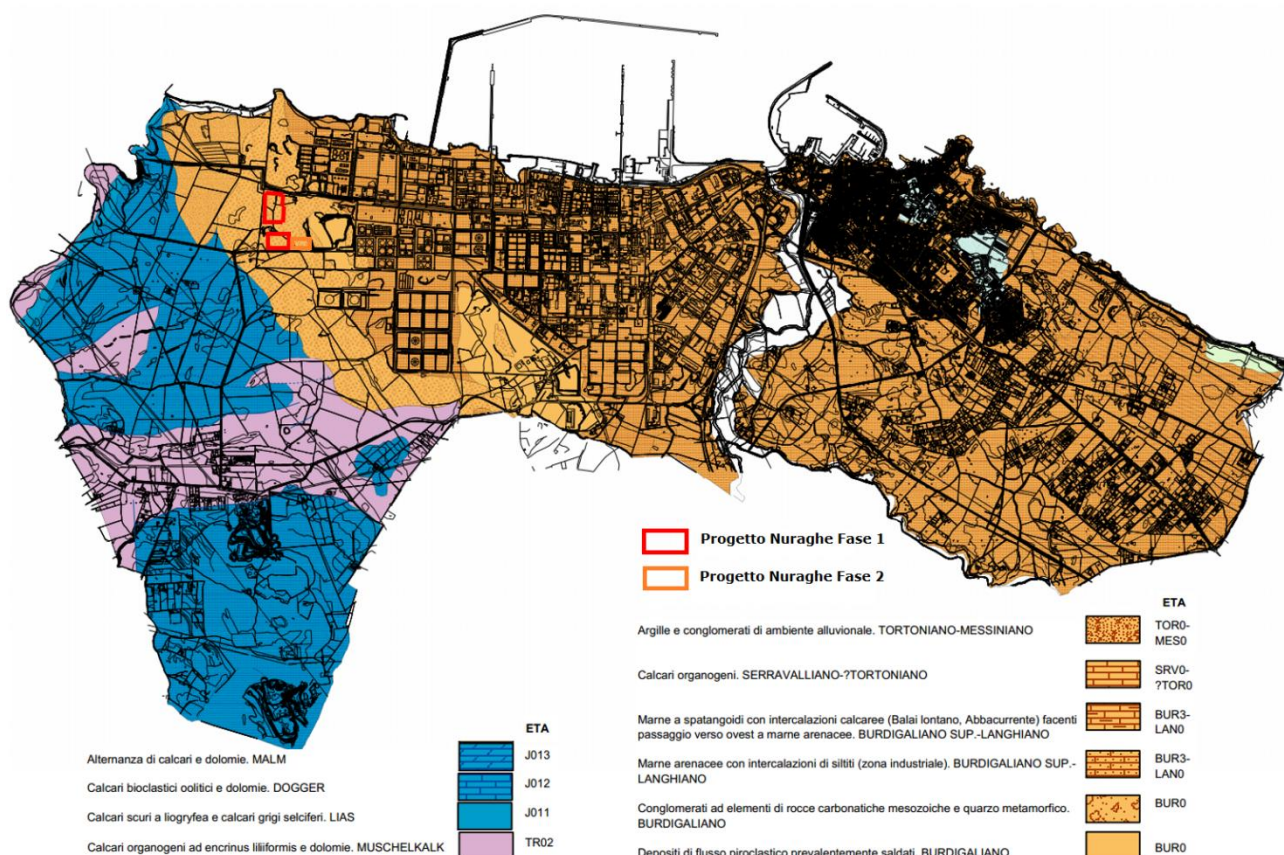




Figura 2.2: Estratto della carta geo-litologica in scala 1:10000 (PUC 2014 di Porto Torres).



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>7</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## 2.2 Inquadramento litologico

Nel corso delle campagne di indagine condotte nell'area dello stabilimento ENI è stata raccolta una notevole quantità di dati stratigrafici che, unitamente ai dati di letteratura, hanno permesso di definire le seguenti unità litostratigrafiche (dall'alto verso il basso e cioè dalle più recenti alle più antiche):

- Unità dei ricoprimenti recenti, caratterizzata da riporti (sabbia sciolta o poco addensata, frammista a ghiaia sub-angolare poligenica ed eterometrica con presenza di frammenti di demolizione) e da depositi limoso sabbiosi (sabbia fine debolmente limosa, di colore variabile da ocra a marrone, con frammenti litici grossolani di natura calcarenitica);
- Unità miocenica, caratterizzata da variazioni litologiche, che individuano zone a prevalente composizione arenacea ed altre con caratteri più marcatamente calcarei unite a sabbie alternate a livelli conglomeratici poligenici;
- Unità delle vulcaniti oligo-mioceniche, caratterizzata dalla presenza di ignimbriti in bancate e tufiti cineritico pomicee;
- Unità paleocenica, caratterizzata da sabbie medio fini localmente ghiaiose rossastre con intercalazioni di livelli argillosi, ed alternanze di livelli calcarei e sabbie ghiaiose;
- Unità carbonatica mesozoica, caratterizzata da calcari dolomitici lapidei con diverso grado di fratturazione.



I rilevamenti eseguiti confermano l'andamento estremamente articolato e complesso dell'assetto strutturale del substrato. Di seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dalle varie campagne di indagine effettuate in alcune aree dello stabilimento ENI, che permettono di ottenere un inquadramento litologico specifico dell'area di indagine.

### 2.2.1 Litologie in Area Minciareda Nord

Per l'Area Minciareda è stato elaborato un Modello Geologico contestualmente al Progetto Operativo di Bonifica (POB) Progetto "Nuraghe", con il fine di aggiornare il modello concettuale e quantificare i volumi di intervento. Il modello è stato predisposto sulla base delle campagne di indagine svolte presso l'Area Minciareda stessa, implementato uno specifico ed innovativo processo di modellazione statistico – tridimensionale geologico, idrogeologico e geochimico.

In particolare, nell'Area Minciareda è stata riscontrata la presenza, dall'alto verso il basso, di:

- uno strato superficiale costituito da terreno di riporto a granulometria prevalentemente sabbioso limosa inglobante ghiaia, localmente sono presenti argille;
- uno strato di spessore variabile tra 0,2 e 15,5 m di terreni a granulometria prevalentemente sabbioso limosa frammisti a residui di lavorazione, ubicato a profondità generalmente inferiori a 0,3 m da piano campagna. I residui di lavorazione evidenziano la presenza di sostanze di origine antropica (morchie) e

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>8</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

materiali quali frammenti di legno, plastica e vetro;



- substrato naturale sottostante ai residui di lavorazione, caratterizzato da sabbie limose (localmente argillose) inglobanti ghiaie o rocce di origine vulcanica.

Pertanto, è stata effettuata la ricostruzione tridimensionale del sottosuolo dell'area Minciaredda, discretizzando le diverse porzioni di sottosuolo e matrici ambientali come segue:

- Riempimento: terreni più o meno sabbiosi con presenza di frammenti calcarei e di laterizi, riconducibili all'unità dei ricoprimenti recenti;
- Rifiuti: residui di lavorazione individuati in base alle caratteristiche merceologiche identificate durante le indagini ambientali grazie all'evidenza della presenza di sostanze di origine antropica (morchie) e materiali quali frammenti di legno, plastica, vetro, resine, fanghi e peci; sono inclusi in questa categoria tutti i materiali riferibili a residui derivanti da lavorazioni industriali o terreni frammisti a residui derivanti da lavorazioni industriali distinti dai terreni naturali anche contaminati e contenenti sostanze inquinanti dalla presenza di residui di origine antropica/industriale;
- Terreni in posto, distinti in base alla litologia in:
  - Formazione di Oppia superiore: depositi costituiti prevalentemente da limi argillosi ed argille limose (Unità miocenica);
  - Formazione di Oppia intermedia: depositi costituiti in prevalenza da limi sabbiosi e sabbie limose, talvolta caratterizzati dalla presenza di ghiaia media (Unità miocenica);
  - Formazione di Oppia inferiore 1: deposito costituito principalmente da sabbia addensata, ghiaia e conglomerato (Unità miocenica);
  - Formazione di Oppia inferiore 2: deposito costituito principalmente da arenaria (Unità miocenica);
  - Rocce vulcaniche - Unità di Candelazzos: depositi di materiale piroclastico pomiceo cineritico in facies ignimbrica (Unità delle vulcaniti oligo-mioceniche).

In Figura 2.3 si riporta una sezione schematica orientata Nord-Sud del modello geologico tridimensionale dell'area Minciaredda (tratto dal documento *Progetto Operativo di Bonifica (POB) Progetto "Nuraghe"*), nella quale viene rappresentata la sequenza stratigrafica dei diversi livelli litologici e matrici antropiche individuate.



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-All.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>9</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

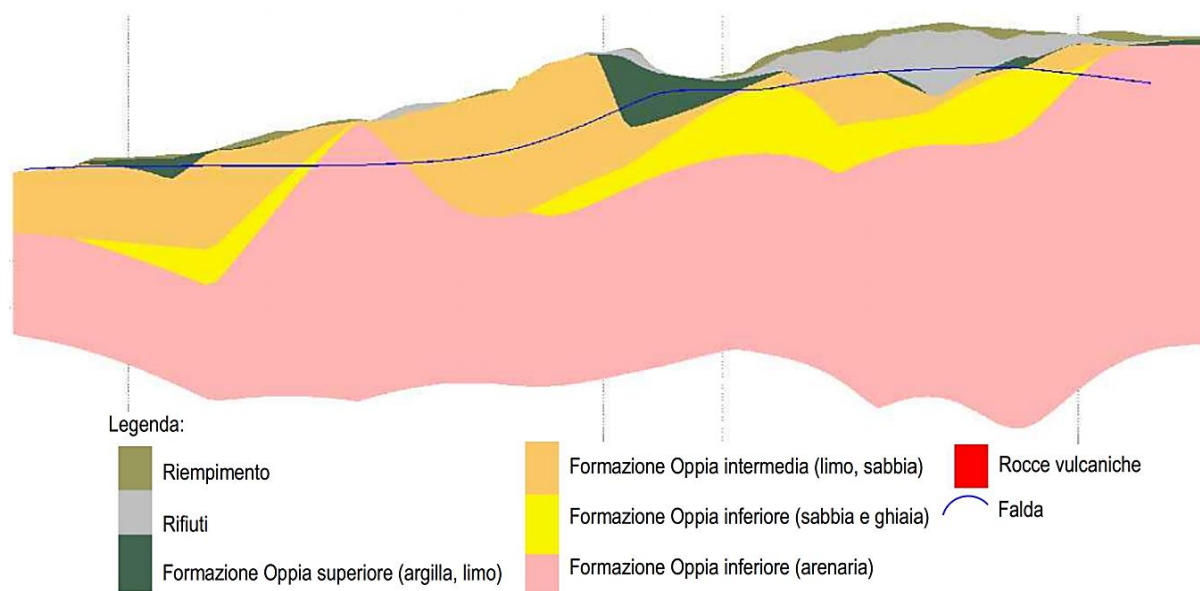




Figura 2.3: Sezione schematica N-S del modello geologico tridimensionale dell'area Minciareda - Sezione F (tratto dal documento "4.All.2 Elaborazioni Modello" allegato al POB Progetto Nuraghe- Fase 1.

Il modello geologico è stato integrato con uno studio di dettaglio delle stratigrafie relative ai sondaggi geognostici eseguiti nelle campagne di indagine svolte presso l'area Minciareda. Lo studio, volto a definire aree con caratteristiche idrogeologiche omogenee, è stato presentato nel documento "Addendum al Progetto Operativo di Bonifica della falda ai sensi del D. Lgs. 152/06 – Area Minciareda" (Arcadis, 2015); lo studio evidenzia la presenza di un sottosuolo caratterizzato da una notevole eterogeneità e complessità, riconducibile da un lato alle interdigitazioni di sedimenti terrigeni di diversa granulometria e dall'altro alla presunta presenza di diverse fasi tettoniche. Le faglie riscontrate nell'area in oggetto sono infatti riconducibili a fasi distensive di età oligo miocenica e fasi compressive di età messiniana, che hanno frammentato e dislocato sia il basamento vulcanico oligo miocenico che quello carbonatico mesozoico.

### 2.2.2 Litologie in Area Minciareda Sud

La successione stratigrafica dell'area Minciareda Sud, in corrispondenza della zona nella quale sarà realizzato il MPF, è riconducibile al gruppo delle unità mioceniche. Si riscontrano, in particolare, litologie appartenenti alla Formazione di Oppia intermedia ed alla Formazione di Oppia inferiore, con una successione stratigrafica costituita da un'alternanza di sabbie limose e limi sabbiosi, con presenza di limitati livelli arenacei a cemento calcareo, poggianti su depositi costituiti principalmente da sabbia addensata, ghiaia e conglomerato (cfr. Figura 2.4).

Si evidenzia infine che, ad Est dell'area di progetto ed in corrispondenza della Discarica Cava Gessi, affiorano litologie appartenenti alla sottostante unità delle vulcaniti oligo-mioceniche, localmente rappresentate da ignimbriti e

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>10</b> di 49	
<b>LOGO APPALTATORE</b> 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

tufiti, giustapposte da una probabile faglia distensiva.

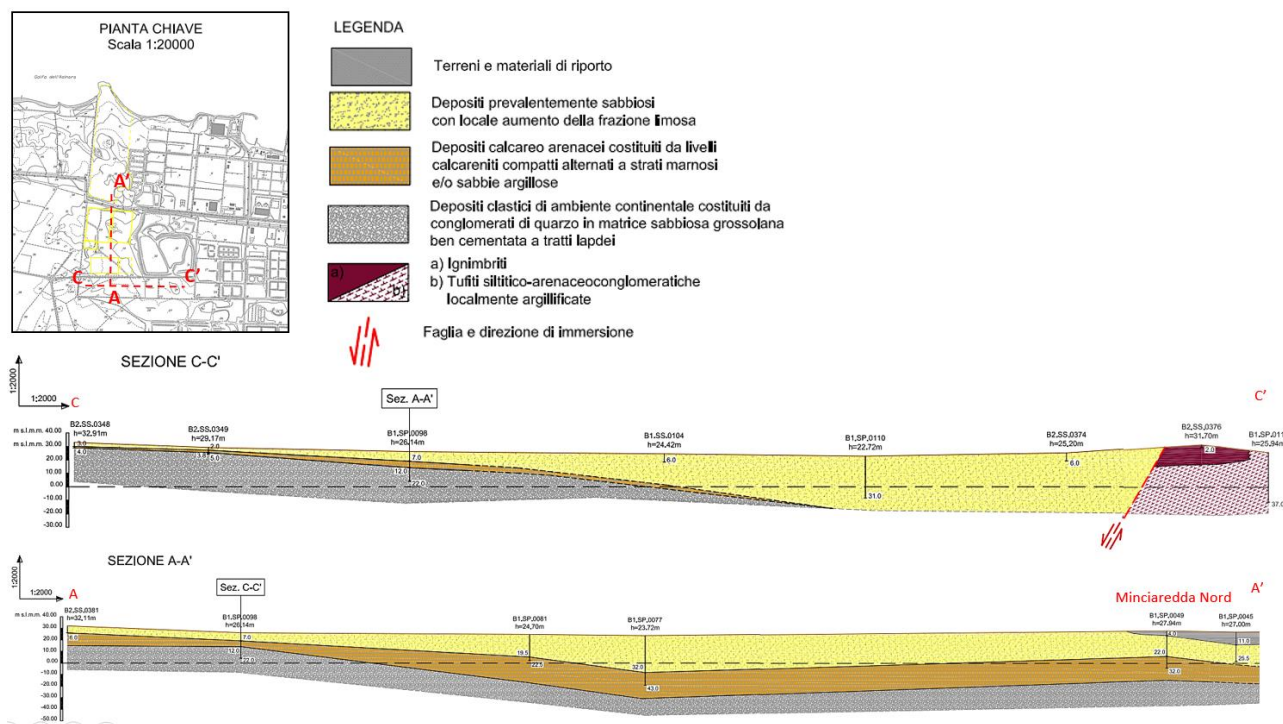




Figura 2.4: Sezioni stratigrafiche area Minciareda Sud (Elaborazione Arcadis da “Piano di Caratterizzazione Settore B”, Snam Progetti, 2006)

## 2.3 Inquadramento geomorfologico

L'intorno dell'area dello stabilimento è caratterizzato generalmente da una morfologia dolce, contraddistinta dalla presenza di una piana costiera che si estende verso l'entroterra. La piana è bordata a Sud e Sud-ovest da una serie di rilievi collinari di media altezza, dalla tipica forma dolce e arrotondata, impostati nelle formazioni mesozoiche, separati tra loro da vaste aree sub pianeggianti. La cima più alta è il M.te Alvaro (342 m s.l.m.), seguono M.te Elva (118 m s.l.m.), M.te Elveddu (72 m s.l.m.) ed i rilievi di N.ghe Margone (58 m s.l.m.). L'andamento delle colline è anche caratterizzato dalla presenza di incisioni vallive.

Le zone morfologicamente depresse hanno un andamento condizionato dalla presenza di sistemi tettonici distensivi che hanno originato dei bassi strutturali. Le acclività dei versanti sono in media comprese tra il 10 ed il 40%; acclività più elevate si registrano nelle porzioni di versante che delimitano la valle del Fiume Santo e sul versante occidentale di M.te Alvaro.

Nell'intorno del sito si evidenzia la presenza, morfologicamente rilevante, di scarpate rocciose in corrispondenza

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>11</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	



della sponda destra della valle del Fiume Santo e alcune rotture di pendio più modeste tra i rilievi di Margone e M.te Elva. Si evidenziano inoltre scarpate artificiali create nelle due cave attive presso M.te Alvaro e M.te Rosè, oltre a due aree di cava storiche poste a sud di M.te Rosè e sotto il viadotto di Fiume Santo lungo la SP 25. Lo stabilimento è posto su una vasta area pianeggiante impostata sulle formazioni sedimentarie mioceniche, ad est dei rilievi carbonatici mesozoici. L'area, in gran parte corrispondente al sito industriale SIN, è caratterizzata da una morfologia pianeggiante con quote mediamente comprese tra 5 e 25 m s.l.m.. Questo settore è stato in gran parte trasformato attraverso le opere di infrastrutturazione dell'area industriale, originariamente infatti era presente lo stagno di Genano. Il tratto costiero è in gran parte protetto dalle opere portuali con ampie zone completamente trasformate dall'intervento antropico. La porzione compresa tra la foce del Fiume Santo e il molo industriale è invece caratterizzata da una costa bassa, rocciosa, in cui si alternano piccole insenature con fondo sabbioso ("Relazione Studio di compatibilità geologico-geotecnica", PUC 2014 di Porto Torres). Dall'analisi della carta geomorfologica allegata al PUC 2014 del Comune di Porto Torres, nell'intorno dell'area in esame non si evidenziano forme e processi particolari se non opere e rimodellamenti di origine antropica.

### 2.3.1 Geomorfologia in Area Minciareda

L'Area Minciareda è stata oggetto di un rilievo topografico di dettaglio eseguito nell'anno 2008 tramite l'ausilio della tecnica di laser scanning (strumentazione ALTM – Airborne Laser Terrain Mapping).

La morfologia dell'area è risultata articolata, le quote rilevate nell'area in oggetto variano tra 1,9 e 34,1 m s.l.m.. Nel settore più a Sud sono presenti due alti morfologici di circa 30 m s.l.m. e nel settore centrale esiste un altro rilievo di eguale altezza, allungato verso Nord, che degrada verso il promontorio che si affaccia sul mare (cfr. Figura 2.5). Sulla base dei rilievi topografici eseguiti è stato inoltre possibile evidenziare la presenza di un cambio di pendenza che genera una barriera diretta Est-Ovest di ostacolo al deflusso delle acque superficiali verso mare tra le zone Sud e Nord. Pertanto, la zona Sud ha un drenaggio molto scarso e si presenta con alcune zone depresse, stagionalmente interessate dalla presenza di acque meteoriche.

In area Minciareda Nord, lungo costa, affiorano sacche di sedimenti marini organogeni del Miocene medio-fine (Messiniano), a monte dei quali si evidenziano depositi e forme continentali (*pediment* di accumulo) del Pliocene e strutture di essiccamento dei suoli del Messiniano.

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>12</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

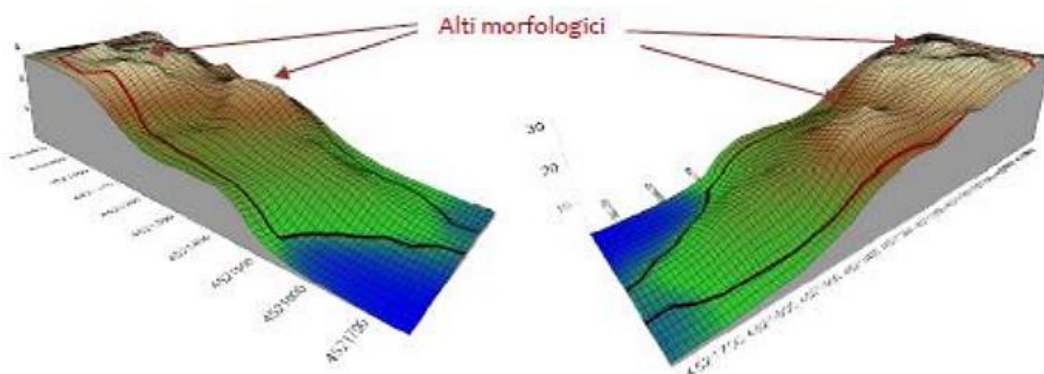


Figura 2.5: Alti morfologici Area Minciaredda, vista Est e vista Ovest

### 2.3.2 Geomorfologia in Area Minciaredda Sud

L'area Minciaredda Sud presenta quote variabili tra 17 e 29 m s.l.m., con una morfologia piuttosto articolata caratterizzata da un basso topografico in corrispondenza della zona centrale, nell'area che sarà adibita a stoccaggio temporaneo dei terreni conformi (cfr. Figura 2.6). Il p.c. attuale dell'area su cui sarà realizzato il modulo MPF presenta quote variabili 23,90 e 27,20 m s.l.m con pendenza topografica verso Est.

In area Minciaredda Sud si evidenziano in parte forme continentali di ambiente fluviale sub-tropicale (*pediments* di accumulo e di erosione) attribuibili al tardo Miocene ed in parte depositi limoso-argillosi sub-orizzontali dovuti alla presenza dell'ormai scomparso stagno di Genano.

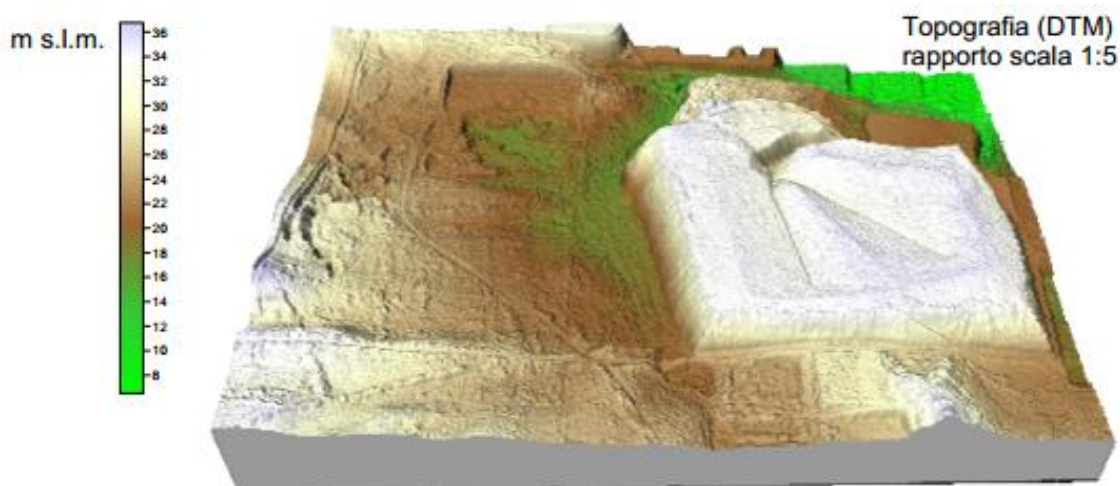




Figura 2.6: Topografia di dettaglio dell'area Minciaredda Sud.

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>13</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## 2.4 Indagini geologico-geotecniche 2018

Per la valutazione dei terreni presenti in sito e la definizione dei relativi parametri geotecnici, nell'area destinata ad ospitare il sito di raccolta rifiuti sono state eseguite le seguenti indagini:

- n. 5 sondaggi geognostici (Sg);
- n. 9 pozzetti-trincee geognostici (Po - P);
- Prove SPT.
- Indagine MASW

Di seguito è illustrata l'ubicazione dei sondaggi e dei pozzetti-trincee.

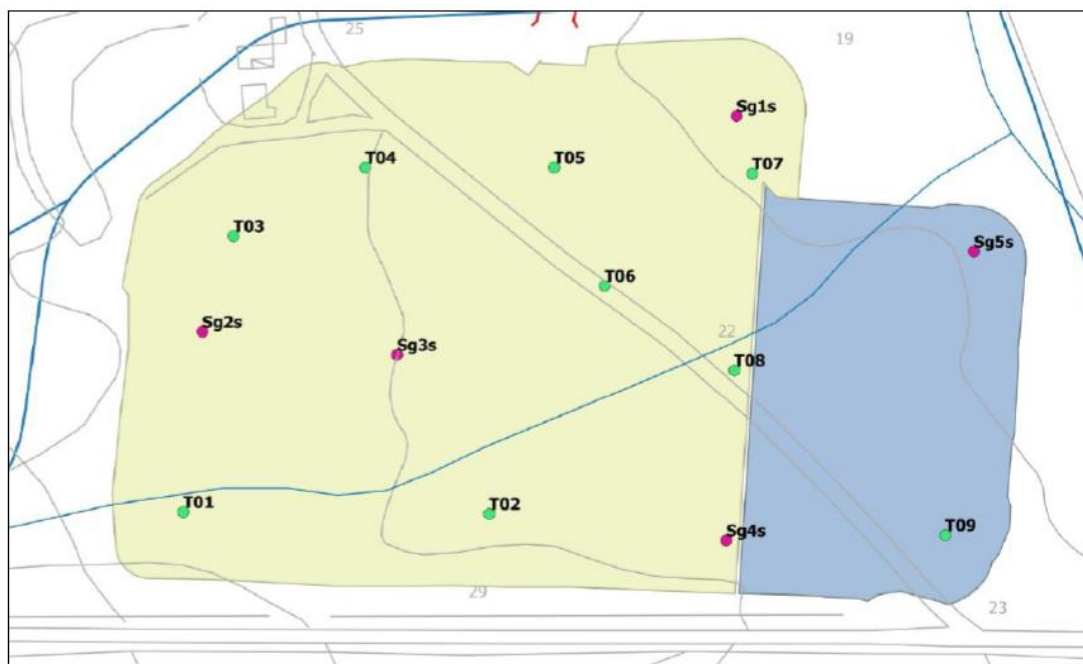


Figura 2.7: Ubicazione indagini geognostiche (Sg = sondaggi; Po – P = pozzetti-trincee).

Nelle tabelle seguenti si riportano le indicazioni relative alle quote a piano campagna e le profondità raggiunte nelle indagini geognostiche e geotecniche.

Tabella 2.1: Quote e profondità dei sondaggi geognostici		
Sondaggi	Quota (m. s.l.m)	Profondità (m)
Sg1s	20,40	15,00
Sg2s	27,70	10,00
Sg3s	25,00	15,00
Sg4s	24,00	15,00
Sg5s	22,20	15,00







	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>14</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Tabella 2.2: Quote e profondità dei pozzetti geognostici		
Pozzetto/trincea	Quota (m. s.l.m)	Profondità (m)
T01	29,00	2,75
T02	26,20	2,10
T03	27,00	1,60
T04	25,00	2,80
T05	22,30	2,80
T06	22,50	1,90
T07	19,80	1,70
T08	21,20	1,50
T09	22,10	1,70

La tabella seguente riporta l'elenco di tutti i campioni prelevati durante la campagna di indagine.

Tabella 2.3: Tabella di riepilogo campioni				
sondaggio	sigla campione	profondità	indisturbato	rimaneggiato
SG01 S	C1	2.50 -3.00 m		X
SG01 S	C2	3.00-4.00 m		X
SG02 S	C1 1	1.00-1 .40 m	X	
SG02 S	C1	4.00-5.00 m		X
SG03 S	C1	4.00-5.00 m		X
SG03 S	CI1	1.00-1 .40 m	X	
SG04 S	C1	1.00-1 .50 m		X
SG04 S	C2	4.00-5.00 m		X
SG05 S	CI1	2.50 -2.80 m	X	



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>15</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

La tabella seguente riporta i risultati delle prove SPT eseguite.

Tabella 2.4: Riepilogo prove SPT							
Sond.	SPT	Prof. (m)	Litotipo	N1	N2	N3	Nspt
Sg1s	1	1,30	Sabbia limosa molto addensata	50 R=6 cm			
	2	3,00	Sabbia limosa addensata con screziature grigio	8	20	80 R=9 cm	
	3	4,30	Sabbia fine limosa addensata color mattone	50 R=9 cm			
	4	7,30	Sabbia limosa color mattone con locali livelli molto addensati e cementati	50 R=10cm			
	5	11,0	Sabbia fine limosa color mattone	50 R=2 cm			
	6	15,0	Sabbia grossolana limosa color mattone con locali livelli addensati e debolmente cementati e locale presenza di ghiaia medio-fine	50 R=2 cm	11 R=9cm		
S4g2s	1	1,50	Sabbia limosa rosata con ghiaia, ciottoli e trovanti con locali livelli debolmente cementati locali livelli di limo sabbioso	27	34	66 R=6 cm	
	2	3,00	Sabbia limosa rosata con ghiaia, ciottoli e trovanti con locali livelli debolmente cementati e locali livelli di limo sabbioso	25	36	66 R=7 cm	
	3	4,50	Sabbia limosa rosata con ghiaia, ciottoli e trovanti con locali livelli debolmente cementati e locali livelli di limo sabbioso	50 R= 7 cm			
	4	7,50	Sabbia limosa con ghiaia fine e locali trovanti	50 R= 3 cm			
	5	10,00	Sabbia limosa con ghiaia fine e locali trovanti	50 R= 1 cm			
Sg3s	1	1,50	sabbia limosa marrone chiaro- rosata con locali screziature grigio chiaro conghia eterometrica e ciottoli	21	100 R=8 cm		
	2	3,00	sabbia limosa marrone chiaro- rosata con locali screziature grigio chiaro con ghia eterometrica e ciottoli	50 R= 7 cm			
	3	4,30	Sabbia fine limosa color mattone con locali screziature grigio	50 R=9 cm			
	4	7,50	Sabbia fine limosa color mattone con ghiaia eterometrica e ciottoli con sottili livelli di limo sabbioso e locali livelli addensati e debolmente cementati	50 R=10cm			
	5	11,00	Sabbia grossolana limosa con ghiaia fine e ciottoli	36	100 R=3 cm		
	6	15,00	Sabbia grossolana limosa con ghiaia fine e ciottoli	50 R=11 cm			
Sg4s	1	1,50	Sabbia limosa rosata-marrone chiaro addensata	27	100 R=8 cm		
	2	3,00	sabbia limosa con screziature ocracee-ruggine con locali livelli di limo sabbioso grigio con ghiaia e ciottoli	29	32	27	59





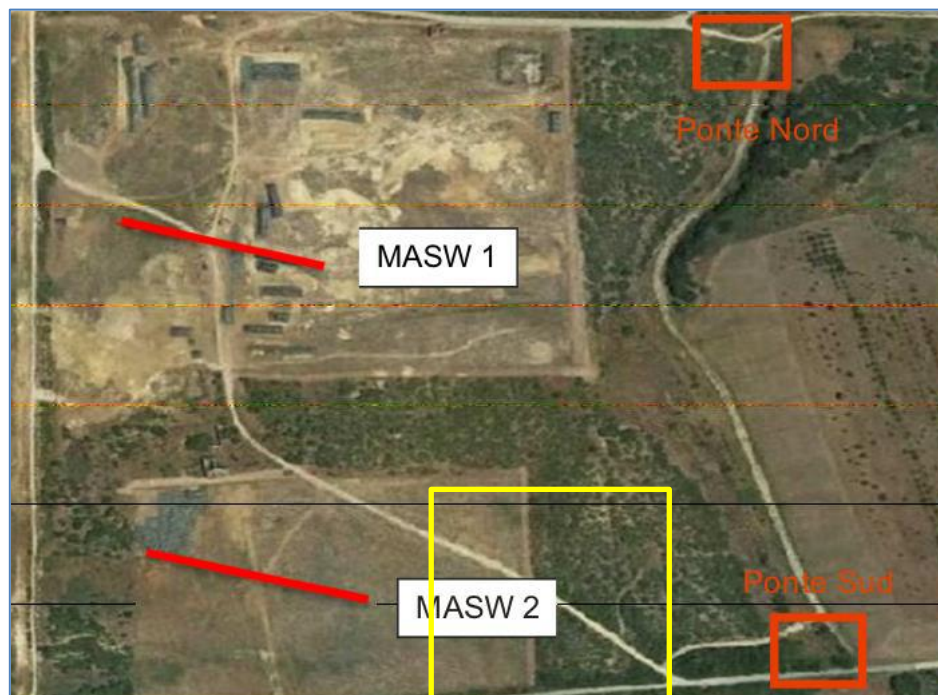
	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>16</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Tabella 2.4: Riepilogo prove SPT							
Sond.	SPT	Prof. (m)	Litotipo	N1	N2	N3	Nspt
	3	4,30	sabbia limosa con screziature ocracee-ruggine con locali livelli di limo sabbioso grigio con ghiaia e ciottoli	9	8	10	18
	4	7,50	Sabbia limosa marrone chiaro rosata con locali trovanti	12	11	14	25
	5	11,30	Alternanza di breccia (ghiaia eterometrica, subangolare in matrice sabbiosa cementata) e sabbia limosa nocciola	50 R=3cm			
	6	15,00	Sabbia limosa rosata addensata con locali livelli debolmente cementati	47	100 R=5 cm		
Sg5s	1	1,50	Sabbia limosa addensata con screziature grigio	14	14	26	40
	2	2,80	Sabbia limosa addensata con screziature grigio	50 R=8 cm			
	3	4,50	Sabbia fine limosa addensata color mattone	10	27	40	67
	4	7,50	Sabbia limosa color mattone con locali livelli molto addensati e cementati	3	7	16	23
	5	11,0	Sabbia fine limosa color mattone	5	8	13	21
	6	15,0	Sabbia grossolana limosa color mattone con locali livelli addensati e debolmente cementati e locale presenza di ghiaia medio-fine	22	11 R=9 cm		

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>17</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

#### 2.4.1 Indagine MASW



Durante la campagna d'indagine effettuata sono state realizzate anche delle indagini sismiche di tipo MASW, la cui ubicazione è illustrata nella figura seguente.



*Figura 2.8: Ubicazione delle prospezioni MASW.*

La MASW 2 è stata eseguita sul sedime del SDR adiacente al MPF (area in giallo in figura), ed ha evidenziato una velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s30}$  è risultata pari a 640 m/s.

Il terreno di fondazione è pertanto classificabile in categoria B, che indica “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”.

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>18</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

## 2.5 Caratterizzazione stratigrafica e geotecnica dei terreni dell'area di intervento

A seguito dei risultati delle indagini geognostiche eseguite nelle aree di interesse e nelle aree limitrofe, è stato possibile fornire un quadro litostratigrafico e geotecnico preliminare sufficientemente definito dei terreni presenti nell'area interessata dall'intervento, con particolare riferimento allo strato rappresentativo del sedime delle opere di progetto.

I diversi sondaggi eseguiti hanno evidenziato che dal punto di vista stratigrafico i terreni su cui insisterà il MPF sono del tipo multistrato, caratterizzati da un'alternanza di sedimenti terrigeni a varia granulometria, dove la componente sabbiosa è prevalente. Sia in senso orizzontale che verticale si osserva una forte variabilità della composizione degli strati.

L'intero volume significativo è quindi caratterizzato dalla presenza di sabbie oligo-mioceniche con intercalazioni da limoso argillose fino ad argillose. La potenza di questa alternanza è di alcune decine di metri.

Le indagini eseguite in prossimità al sedime del MPF hanno evidenziato, in estrema sintesi, la seguente stratigrafia:



- 30/40 cm terreno vegetale
- 30/40 cm di limo sabbioso
- fino a fondo foro sabbia limosa con locali livelli addensati e cementati nelle parti più profonde (dai 5 m da pc in poi).

Se si esclude lo strato più superficiale, che sarà comunque oggetto di scotico/compattazione, il modello stratigrafico e geotecnico del volume significativo influenzato dal MPF può essere semplificato come monostrato.

Le caratteristiche geotecniche di tale strato sono state desunte da analisi in sito e di laboratorio, oltre che da dati di letteratura.

I valori geotecnici, validi per lo strato interessato dal sedime delle opere di progetto, possono essere assunti cautelativamente pari a quanto riportato nella tabella seguente.

Tabella 2.5: Parametri geotecnici per il terreno in posto sul sedime delle opere di progetto			
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)	Modulo elastico (MPa)
16/18	32	-	60

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>19</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	



## 2.6 Idrogeologia del sito di Stabilimento

In Sito è stata rilevata acqua sotterranea a soggiacenze variabili a seconda della zona, vi sono aree in cui la quota piezometrica è prossima a quella del p.c. (differenze nell'ordine di 0 – 2,5 m) e altre in cui la differenza fra le quote piezometriche ed il p.c. si attesta a circa 17 m. Si osserva che le zone con soggiacenza più profonda corrispondono alle zone Est ed Ovest del Sito, mentre nel settore centrale si hanno soggiacenze minori. L'assetto piezometrico statico caratteristico del sito precedentemente all'attivazione della barriera idraulica fronte mare e lato ovest è riportato nel documento "Progetto Operativo di Bonifica della Falda – Stabilimento di Porto Torres" (Saipem, 2010) evidenzia una netta distinzione tra i livelli piezometrici rilevati nei settori a Sud ed a Nord degli affioramenti vulcanitici.

L'assetto piezometrico dinamico è ricostruito e monitorato nel tempo da aprile 2005 (data di attivazione della barriera pozzi fronte mare), nella figura seguente si riporta la carta piezometrica del 2011 ricostruita da Golder Associates nell'ambito del documento "Integrazioni al Progetto Operativo di Bonifica della falda", mentre nella figura successiva si riporta la carta isofreatica ricostruita per la campagna di monitoraggio di novembre 2015. L'andamento delle superfici piezometriche indica un gradiente idraulico generalmente orientato verso Nord – Nord-Est. Il gradiente piezometrico della porzione centrale del Sito risulta più elevato rispetto a quello della zona Sud e di quella Nord. La superficie piezometrica è più elevata in corrispondenza e a monte delle vulcaniti, mentre a valle delle stesse decresce rapidamente ("Integrazioni al Progetto Operativo di Bonifica della falda", 2011, Golder Associates). Si individua quindi una distribuzione nello spazio dei vari acquiferi. Un acquifero calcarenitico che interessa i settori centrale ed orientale dello stabilimento, nel quale le quote piezometriche risultano variabili da massimi dell'ordine dei 2÷3 m s.l.m. fino a valori prossimi al livello del mare. Un acquifero nella zona Sudovest dello stabilimento sostanzialmente isolato sotto il profilo idrogeologico rispetto all'acquifero calcarenitico della zona centro-orientale del sito, in relazione alla presenza delle vulcaniti ("Progetto Operativo di Bonifica della Falda – Stabilimento di Porto Torres", 2010, Saipem). L'assetto piezometrico dinamico mostra una azione di influenza esercitata dalla barriera idraulica sulla falda acquifera ("Monitoraggio della barriera idraulica – report annuale 2015", Maggio 2016, Arcadis Italia).

Il monitoraggio della conducibilità elettrica delle acque di falda eseguito periodicamente su tutto il fronte mare, a monte ed a valle della barriera evidenzia fenomeni significativi di salinizzazione, anche estesi verso l'interno, del sistema acquifero, riconducibili alla presenza del cuneo di intrusione salina ed alle alimentazioni dal sistema di canalizzazione delle acque salate di raffreddamento industriale.



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>20</b> di 49
<b>LOGO APPALTATORE</b> 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

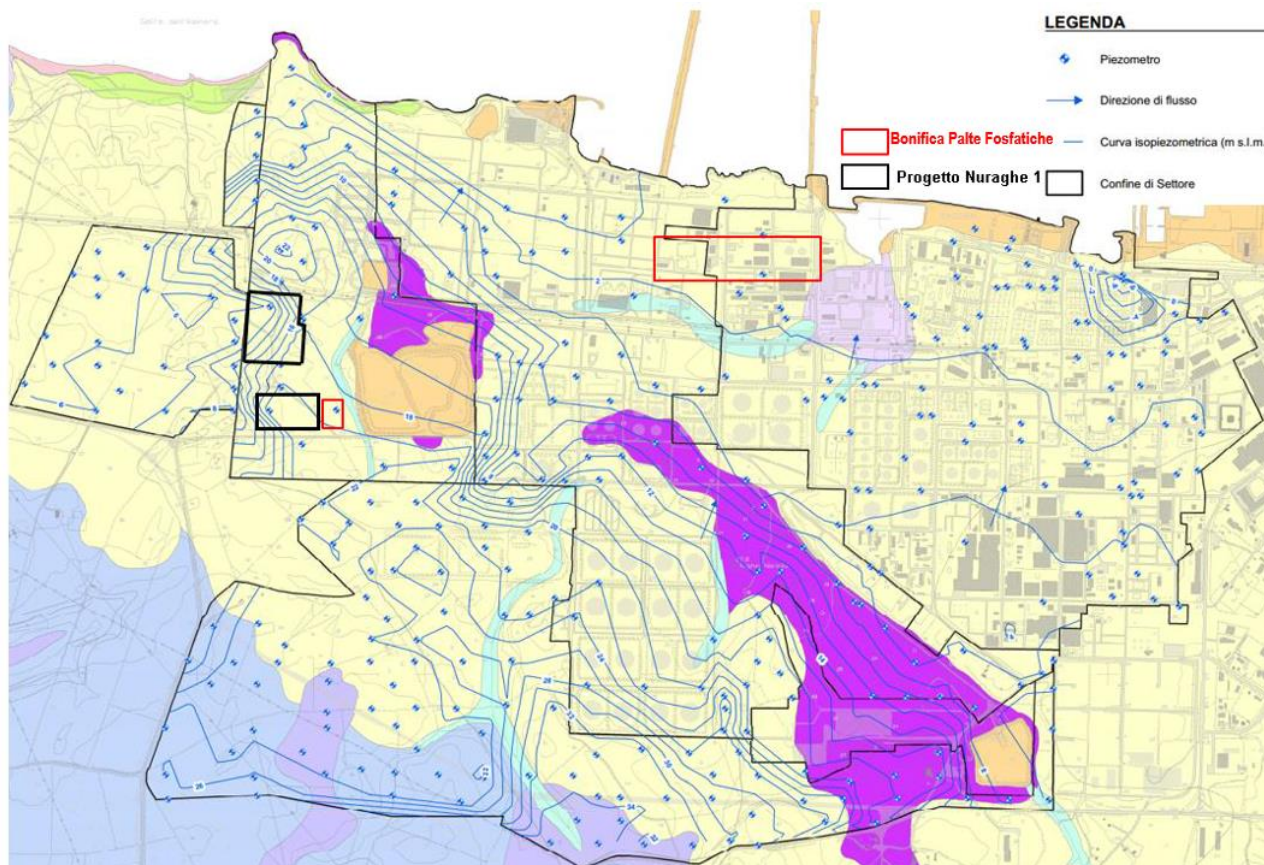




Figura 2.9 - Estratto dell'interpolazione lineare dei livelli piezometrici su base CTR e Carta Geologica di base della Sardegna in scala 1: 25.000 ("Integrazioni al Progetto Operativo di Bonifica della Falda", 2011, Golder Associates).

Tale fenomeno di salinizzazione è particolarmente evidente nell'area centrale dello stabilimento in corrispondenza dei pozzi di emungimento della barriera idraulica laddove le conducibilità elettriche specifiche subiscono incrementi significativi in profondità nell'arco di pochi metri, fino a massimi dell'ordine dei  $45.000 \div 50.000 \mu\text{S}/\text{cm}$  ("Progetto Operativo di Bonifica della Falda – Stabilimento di Porto Torres", 2010, Saipem).

In tali zone, a seguito del monitoraggio della conducibilità elettrica in 4 campagne trimestrali del 2015, si evidenzia la presenza di acque saline a una quota media di -25,0 m s.l.m. mentre nella porzione orientale del fronte mare la transizione acque dolci/salmastre si registra a tra i -10 e i -25 m s.l.m. ("Monitoraggio della barriera idraulica – report annuale 2015", Maggio 2016, Arcadis Italia).

Nel complesso va evidenziato il ruolo di alimentazione al sistema acquifero da parte dei sistemi di canalizzazione superficiale delle acque salate di raffreddamento industriale. Tali alimentazioni danno luogo a fenomeni di salinizzazione anche in settori interni, molto arretrati rispetto alla linea di costa, ancorché, in ragione del miscelamento con le acque



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>21</b> di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

dolci provenienti da monte, permanga una chiara distinzione tra le risultanti acque salmastre e quelle salate di chiara pertinenza del cuneo salino (“Progetto Operativo di Bonifica della Falda – Stabilimento di Porto Torres”, 2010, Saipem).



Figura 2.10 - Carta delle isofreatiche della campagna di monitoraggio di novembre e dicembre 2015, in rosso l'isopiezia "0" (“Monitoraggio della barriera idraulica – report annuale 2015”, Maggio 2016, Arcadis Italia).

Confrontando i risultati dei monitoraggi del 2015 con quelli del periodo 2015/2022 non si rilevano grandi variazioni. Questo è altrettanto evidente nell'estratto cartografico che segue, che riporta la carta delle isofreatiche dello Stabilimento, con le misurazione della campagna di monitoraggio di ottobre 2022.

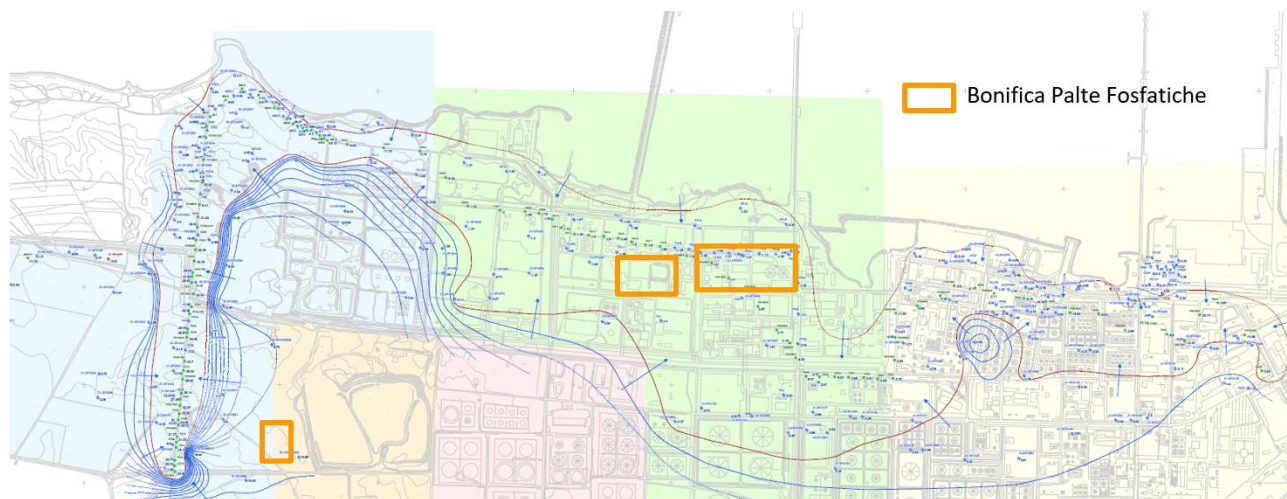




Figura 2.11 - Carta delle isofreatiche della campagna di monitoraggio di ottobre 2022, in rosso l'isopiezia "0" (“Piano di Monitoraggio delle acque di falda – Sintesi dei risultati del monitoraggio IV trimestre 2022 – Estratto tavola n°4)

### 2.6.1 Assetto idrogeologico locale

Dal punto di vista idrogeologico, l'area di studio è caratterizzata dalla presenza di un acquifero non confinato

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>22</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

superiormente e costituito da un'alternanza di sabbie limose e limi sabbiosi, con presenza di limitati livelli arenacei a cemento calcareo.

Lo spessore dell'acquifero non è determinato, in quanto i piezometri presenti in sito non arrivano ad un orizzonte impermeabile tale da essere considerato il bottom dell'acquifero superficiale. Dall'analisi delle stratigrafie geologiche e di completamento dei piezometri più profondi prossimi al sito di studio, si evince comunque che il tratto saturo sia fino ad almeno 60 m (fondo foro). Pertanto, per lo scopo del presente elaborato, considerando una soggiacenza media di 5 m dal p.c., lo spessore dell'acquifero è stato considerato cautelativamente pari a 55 m.

Le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero sono state dedotte dalle elaborazioni di prove in sito.



Si riporta di seguito una tabella riassuntiva delle prove di portata condotte nel maggio 2013 tratta dal POB Nuraghe fase 1.

Tabella 2.6: Risultati delle Prove di portata condotte in maggio 2013				
ID Piezometro	Tipologia di prova	Intervallo fessurato (m da p.c.)	K (m/sec)	T (m2/sec)
B3.SP.0400.C	Slug test	24 – 28	5,40E-06	2,19x10-5
B3.SP.0401.B	Slug test	9 – 13	1,20E-06	5x10-6
B3.SP.0401.C	Slug test	26 – 30	6,20E-06	5x10-5
B3.SP.0402.A	Portata Costante	55,5 – 60,5	9,20E-07	2,6x10-6
B3.SP.0402.C	Slug test	16 – 20	8,90E-07	3,59x10-6
B3.SP.0403.A	Slug test	56 – 60	5,70E-06	2,28x10-5
	Portata costante		1,70E-05	6,6x10-5
	Gradini		4,20E-06	1,7x10-5
B3.SP.0403.C	Gradini	18 – 22	3,00E-06	1,2x10-5
B3.SP.0404.B	Slug test	33 – 37	6,79E-07	2,72x10-6
B3.SP.0406.B	Slug test	34 – 38	2,70E-05	1,1x10-4
	Portata costante		3,80E-05	1,5x10-4

In particolare, sono state considerate rappresentative dell'acquifero sotteso l'area di studio, le prove eseguite sui piezometri più prossimi al Sito di Raccolta ed in particolare gli Slug test eseguiti sui piezometri B3.SP.0400.C, B3.SP.0401.B, B3.SP.0401.C. (evidenziati in celeste nella Tabella 2.6); tali sondaggi sono posizionati al limite tra Minciareda Nord e Minciareda Sud

La permeabilità rappresentativa dell'acquifero di studio è stata pertanto ottenuta come media delle permeabilità ottenute dagli Slug test sui tre punti sopra indicati, pari a 4,27E-06 m/s.

I risultati così ottenuti sono stati confrontati anche con i dati di bibliografia. Come si evince dall'esame dello schema di Freeze – Cherry riportato di seguito, la conducibilità idraulica per le sabbie limose, litologia che caratterizza in prevalenza il sottosuolo in corrispondenza dell'area, è pari a  $1 \times 10^{-5}$  m/sec, in linea con quanto emerso dalle prove in

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>23</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

sito.

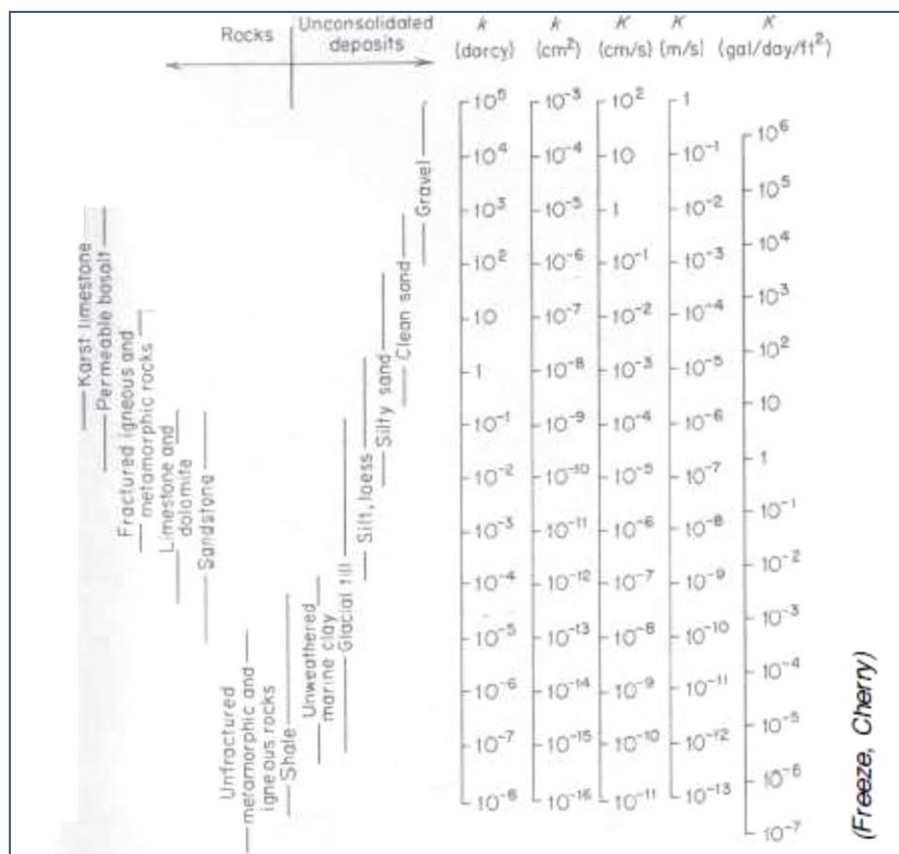




Figura 2.912: Permeabilità e conducibilità idrauliche

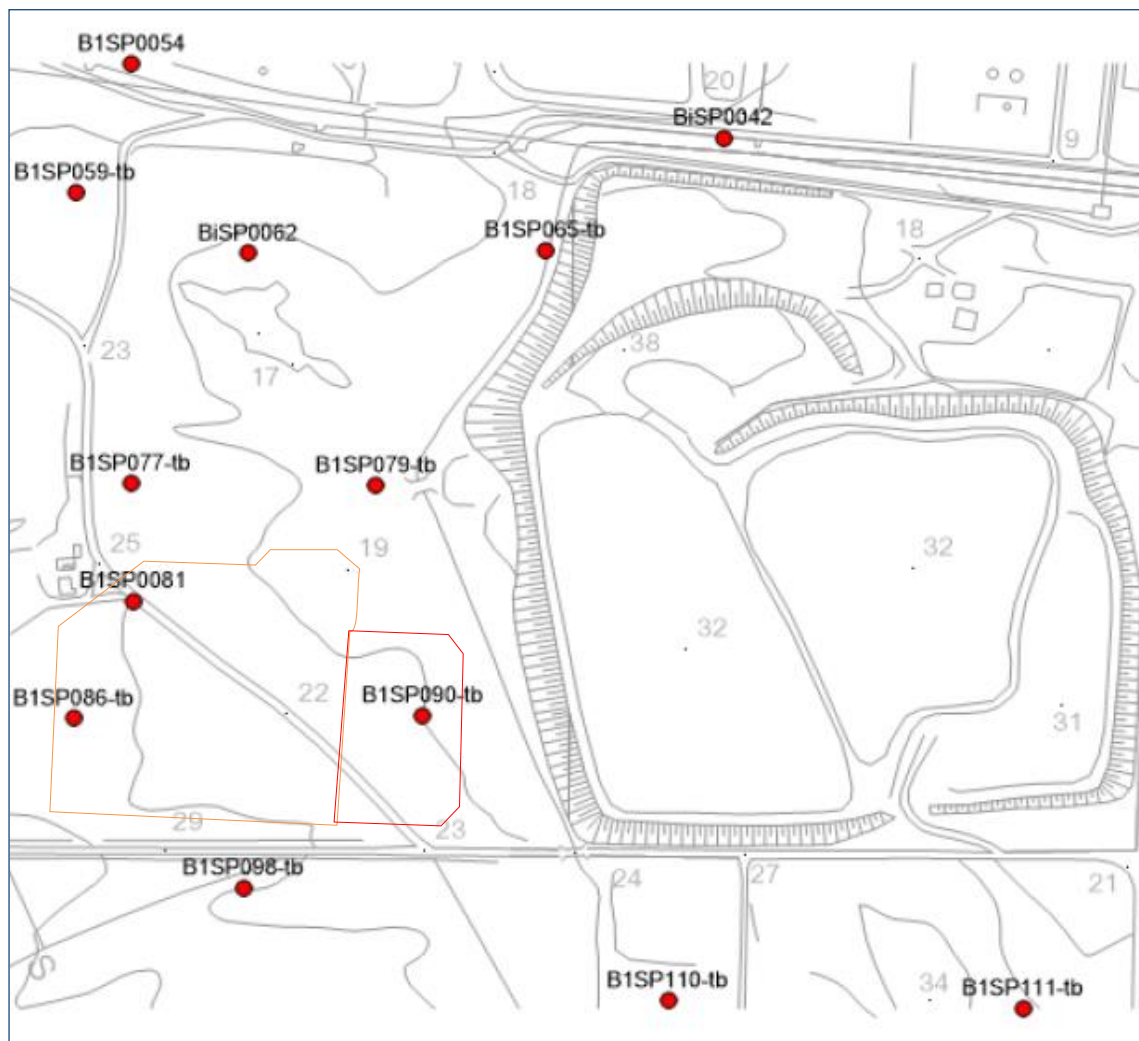
#### 2.6.1.1 Definizione del livello piezometrico di riferimento per la progettazione della vasca

In prossimità all'area di studio è attiva dal 2010 una barriera idraulica che influenza l'andamento della falda nell'area di sedime del Modulo Palte Fosfatiche.



Al fine di svincolare la realizzabilità dell'opera dal funzionamento della barriera idraulica, per la determinazione della falda di progetto e di conseguenza per il posizionamento del piano di posa della barriera di confinamento, è stato deciso di fare riferimento ai dati della piezometria statica.

Nell'area sono presenti i piezometri di monitoraggio realizzati nell'ambito delle indagini di caratterizzazione eseguite nel corso degli anni. Al fine di ricostruire la superficie piezometrica dell'area sono stati elaborati gli ultimi dati disponibili dei livelli di falda in condizioni statiche (maggio 2006).

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>24</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	



**Figura 2.13:** Ubicazione dei piezometri nell'area Minciareda Sud - Piano di Caratterizzazione  
(in rosso l'area di sedime del MPF)

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>25</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Le misure piezometriche sono sintetizzate nella tabella seguente:

Tabella 2.7: Piezometria area Minciareda Sud - da Piano di Caratterizzazione - Maggio 2006					
Codice piezometro	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota IGM m s.l.m.	Soggiacenza da bocca pozzo (05/2006) m	Piezometria (05/2006) m s.l.m.
B1SP0042	1.443.867,607	4.520.658,994	15,640	2,540	13,100
B1SP0054	1.443.368,024	4.520.722,904	28,775	11,250	17,525
B1SP0059	1.443.319,892	4.520.611,674	23,731	15,610	8,121
B1SP0062	1.443.466,247	4.520.559,101	20,237	2,510	17,727
B1SP0065	1.443.717,114	4.520.562,013	16,396	1,060	15,336
B1SP0077	1.443.366,763	4.520.360,652	23,851	5,420	18,431
B1SP0079	1.443.574,312	4.520.358,696	18,802	1,790	17,012
B1SP0081	1.443.369,143	4.520.259,197	24,795	4,220	20,575
B1SP0086	1.443.318,862	4.520.157,160	26,983	5,560	21,423
B1SP0090	1.443.613,705	4.520.160,204	20,487	0,181	20,306
B1SP0098	1.443.462,009	4.520.011,284	26,143	4,210	21,933
B1SP0110	1.443.820,202	4.519.913,851	22,855	0,960	21,895
B1SP0111	1.444.120,026	4.519.907,069	26,248	2,620	23,628



La superficie piezometrica, nell'area Minciareda sud ha un andamento generale da sud ovest verso nord est con livelli superiori pari a 23,62 m s.l.m. e inferiori di 8,12 m s.l.m.

Poiché per l'identificazione della massima escursione di falda non è disponibile una serie storica statisticamente significativa, è stato scelto di innalzare il livello della falda disponibile di un metro; tale superficie piezometrica ottenuta è stata assunta come *"falda di progetto"*.

Nel rispetto del D.Lgs. 36/03 e ss.mm.ii., il piano di posa dell'argilla di fondo del MPF è stato posizionato ad una distanza non inferiore a 2 m al di sopra della succitata *"falda di progetto"*; si vedano a tal proposito la figura e la tabella seguenti.

Con i margini di sicurezza sopra detti, il MPF verrà realizzato in rilevato rispetto al piano campagna circostante.



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>26</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

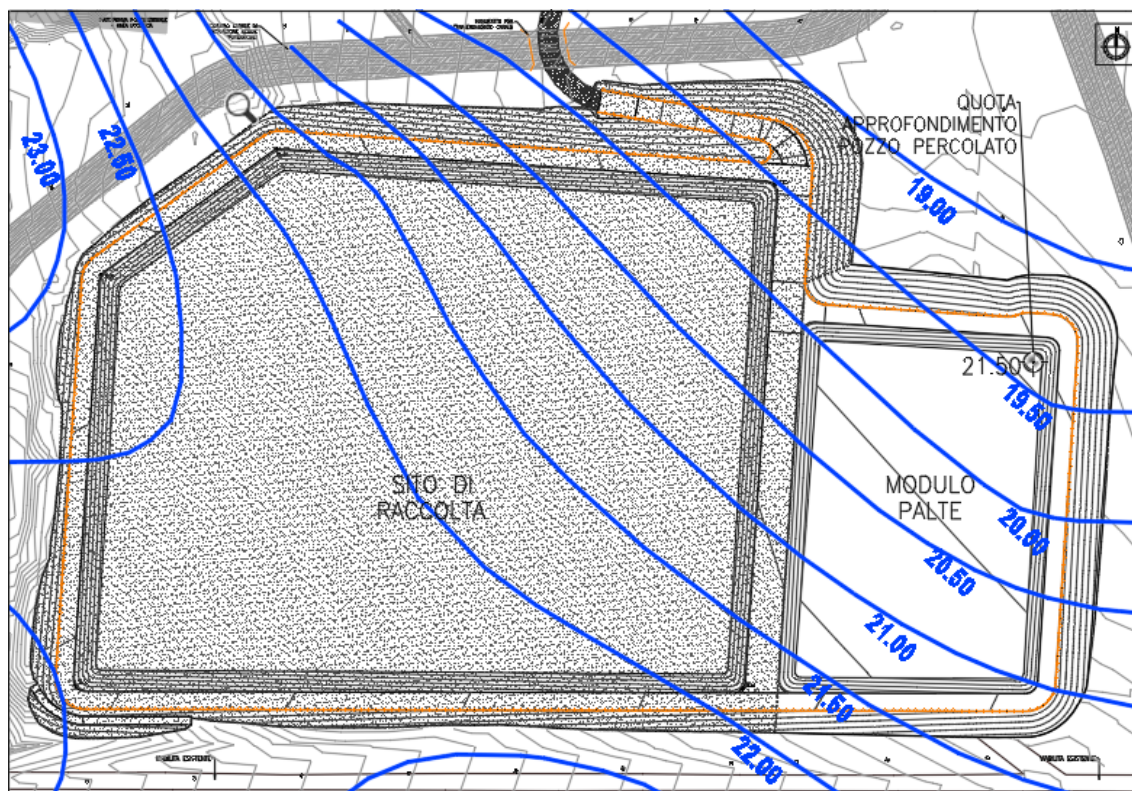




Figura 2.14: Planimetria piano posa barriera di confinamento del Modulo Palte Fosfatiche (MPF) e falda di progetto

Tabella 2.8: Franco di sicurezza Modulo MPF in relazione alla falda di progetto		
Quota minima piano di posa argilla (approfondimento pozzo percolato)	Piezometria massima "falda di progetto"	Franco di sicurezza rispetto alla "falda di progetto"
m s.l.m	m s.l.m	m
21,5	19,5	2



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>27</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

#### 3.1 Caratteristiche generali del progetto

Il MPF sarà ubicato nella porzione meridionale dell'area Minciareda, a sud della piattaforma polifunzionale e dell'area di stoccaggio terreni conformi, ad est del Sito di Raccolta.

I materiali derivanti dalla bonifica dell'area ex deposito delle Palte Fosfatiché saranno depositati all'interno di un bacino di raccolta e stoccaggio definitivo (i.e. il Modulo Palte Fosfatiché, MPF), realizzato in rilevato rispetto al piano campagna circostante; il perimetro del bacino sarà costituito da argini di contenimento di altezza variabile in funzione della posizione, da circa 4 m nella porzione SW a circa 6,5 m nella porzione NE. In corrispondenza della testa degli argini sarà realizzata una pista perimetrale dedicata alla viabilità interna dei mezzi. Le geometrie del bacino sono illustrate nelle tavole di progetto.

Il bacino avrà forma circa rettangolare e sarà costituito da un unico lotto di coltivazione.

Le scarpate interne della vasca avranno pendenza pari a 2/3 (circa 34°), idonea a garantirne la stabilità e la corretta posa dei sistemi di impermeabilizzazione. Le scarpate esterne avranno una pendenza più dolce pari a circa 25° per un miglior inserimento ambientale delle opere (recupero finale).

#### 3.2 Inquadramento Sismico



##### 3.2.1 Quadro Normativo

Sino al 2003 il territorio nazionale era classificato in tre categorie sismiche a diversa severità. I Decreti Ministeriali emanati dal Ministero dei Lavori Pubblici tra il 1981 ed il 1984 avevano classificato complessivamente 2.965 comuni italiani su di un totale di 8.102, corrispondenti al 45% della superficie del territorio nazionale, nel quale risiede il 40% della popolazione.

Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato, in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni), da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo.

A tal fine è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003.

L'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 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") prevede la classificazione sismica del territorio nazionale, e dispone che le Regioni provvedano "ai sensi dell'art. 94, comma 2, lettera a), del decreto legislativo n. 112 del 1998, e sulla base dei criteri generali di cui all'allegato 1, all'individuazione, formazione ed aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche" (art. 2).

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>28</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Il provvedimento detta i principi generali sulla base dei quali le Regioni, a cui lo Stato ha delegato l'adozione della classificazione sismica del territorio (Decreto Legislativo n. 112 del 1998 e Decreto del Presidente della Repubblica n. 380 del 2001 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia"), hanno compilato l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle quattro zone, a pericolosità decrescente, nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale:

- Zona 1 - È la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti.
- Zona 2 - Nei Comuni inseriti in questa zona possono verificarsi terremoti abbastanza forti.
- Zona 3 - I Comuni inseriti in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti.
- Zona 4 - È la zona meno pericolosa.

In particolare, l'ordinanza istituisce, rispetto alla classificazione sismica precedente, una zona sismica 4, che comprende tutti i territori precedentemente esclusi dalla classificazione sismica; in tali territori, a rischio sismico molto basso, "è lasciata facoltà alle singole Regioni di introdurre o meno l'obbligo della progettazione antisismica".



A ciascuna zona, inoltre, viene attribuito un valore dell'azione sismica utile per la progettazione, espresso in termini di accelerazione massima su roccia (zona 1=0.35 g, zona 2=0.25 g, zona 3=0.15 g, zona 4=0.05 g). Il nuovo studio di pericolosità, allegato all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione ( $a_g$ ), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche.

<b>Tabella 3.1: Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido (OPCM 3519/06)</b>	
<b>Zona sismica</b>	<b>Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (<math>a_g</math>)</b>
1	$a_g > 0.25$
2	$0.15 < a_g < 0.25$
3	$0.05 < a_g < 0.15$
4	$a_g \leq 0.05$

Nel rispetto degli indirizzi e criteri stabiliti a livello nazionale, alcune Regioni hanno classificato il territorio nelle quattro zone proposte, altre Regioni hanno classificato diversamente il proprio territorio, ad esempio adottando solo tre zone (zona 1, 2 e 3) e introducendo, in alcuni casi, delle sottozone per meglio adattare le norme alle caratteristiche di sismicità.

La Regione Sardegna ha recepito la classificazione sismica proposta nell'Ordinanza 3274/03 con DGR 15/31 del 30/03/2004 che recepisce la classificazione sismica dei Comuni della Sardegna così come riportato nell'allegato A dell'Ordinanza 3274/2003, in cui tutti i Comuni dell'isola sono classificati in zona 4.

Ai sensi delle Norme Tecniche vigenti a livello nazionale, ovvero il D.M. 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>29</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Norme tecniche per le costruzioni”, la classificazione sismica e le azioni sismiche sono definite a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito, definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale (di categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR nel periodo di riferimento VR.

Il decreto definisce le caratteristiche sismiche in una maglia di punti uniformemente distribuiti sul territorio.

Per quanto riguarda la Regione Sardegna, in Tabella 2 del D.M. 14 gennaio 2008 vengono forniti i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  costanti in tutto il territorio dell'isola.

Sulla base di questi valori sono stati determinati i valori caratteristici della sismicità del sito; in particolare, le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido;
- $F_0$  valore massimo di fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.



**Tabella 3.2: Parametri caratteristici della sismicità del sito per diversi tempi di ritorno**

TR	$a(g)$	$F_0$	$T_c^*$
30	0,0186	2,61	0,273
50	0,0235	2,67	0,296
72	0,0274	2,70	0,303
101	0,0314	2,73	0,307
140	0,0351	2,78	0,313
201	0,0393	2,82	0,322
475	0,05	2,88	0,34
975	0,0603	2,98	0,372
2475	0,0747	3,09	0,401

### 3.2.2 Determinazione dei parametri sismici di progetto

Per la determinazione di parametri sismici da utilizzare nelle verifiche di stabilità riportate nel prosieguo della presente relazione, sono state fatte le seguenti assunzioni progettuali.

- Classe d'uso, ovvero la classe nella quale sono suddivise le opere, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso. Nel caso in esame è stata ipotizzata **Classe d'uso II**, poiché trattasi di “Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>30</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

o di importanza normale”.

- Vita nominale dell’opera VN, intesa come “il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata”; a partire da questo valore viene calcolato il periodo di riferimento per l’azione sismica VR, tramite la relazione  $VR=VN*CU$ , dove CU è il coefficiente d’uso della classe II (pari ad 1); nel caso in esame, trattandosi di un’opera ordinaria, è stato assegnato il valore minimo proposto dalla norma, pari a **50 anni** (che in ogni caso è superiore alla vita utile dell’impianto). Il valore del periodo di riferimento è quindi pari a  $VR=VN*CU=50*1 = 50$  anni.
- Probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, funzione dello stato limite di riferimento, legate al periodo di riferimento Vr ed al tempo di ritorno dalla relazione:



$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

In funzione dei parametri suddetti sono stati quindi calcolati i valori dei parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T^*_c$  e il tempo di ritorno per i diversi stati limite di esercizio e stati limite ultimi, riassunti nella seguente Tabella 3.3:

Tabella 3.3: Valori dei parametri sismici in funzione degli stati limite						
Stati limite		PVR	Tempo di ritorno (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$TC^*(sec)$
SLE	SLO	81%	30	0,0186	2,610	0,273
	SLD	63%	50	0,0235	2,670	0,296
SLU	SLV	10%	475	0,050	2,880	0,340
	SLC	5%	975	0,060	2,980	0,372

Dove:

- STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)
  - SLO (Stato Limite di Operatività): 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;
  - SLD (Stato Limite di Danno): 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 rigidità nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell’interruzione d’uso di parte delle apparecchiature.

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>31</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

- STATI LIMITE ULTIMI (SLU)
- SLV (Stato Limite di Salvaguardia della Vita): 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 rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte di resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- SLC (Stato Limite di Prevenzione del Collasso): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli nei 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.

### 3.2.2.1 Coefficienti sismici di progetto



I dati derivanti dalla pericolosità sismica di base ( $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$ ), insieme alla categoria di sottosuolo ed alle condizioni topografiche del sito, sono necessarie per la determinazione delle azioni sismiche.

Sulla base di tali valori possono essere calcolati gli spettri di risposta elastici in accelerazione e gli spettri di progetto (rif. § 3.2.3.2 e § 3.2.3.4 e § 3.2.3.5 delle NTC 2018).

**Tab. 3.2.II –** *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
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>



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>32</b> di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

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

Per il sito di progetto si può considerare:

- Categoria di **tipo B** di sottosuolo<sup>1</sup>;
- Categoria topografica di tipo **T2**;

da cui:



- $S_s$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1,20;
- $S_t$  = coefficiente di amplificazione topografica = 1,20;

Con riferimento ai parametri sismici rappresentativi dello stato ultimo di salvaguardia della vita (SLV), è possibile stimare i seguenti coefficienti sismici per la determinazione delle azioni di progetto (valido per verifiche di fronti di scavo e rilevati, come di seguito dettagliato):

$$k_h = 0.027$$

$$k_v = 0.014$$

<sup>1</sup> Si veda par. 2

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>33</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.3 Caratteristiche geotecniche dei materiali

Si riportano nel seguito le caratteristiche geotecniche dei terreni interessati dalle verifiche di stabilità.

Per quanto concerne i materiali da utilizzare per la realizzazione del MPF i valori delle caratteristiche geotecniche si intendono “parametri minimi prestazionali”.

I materiali potranno comunque avere caratteristiche meccaniche leggermente differenti rispetto a quelle riportate di seguito (ad esempio angolo di attrito minore e coesione intercetta maggiore), purché siano parimenti garantite e verificate tutte le analisi geotecniche.

#### 3.3.1 Terreni naturali presenti in sito (substrato)

I parametri geotecnici dei terreni naturali presenti in sito, come descritti al paragrafo 2.5, sono riportati di seguito.

Tabella 3.4: Parametri geotecnici dei terreni in sito			
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)	Modulo di Young (MPa)
16/18	32	-	60

#### 3.3.2 Materiale per la realizzazione degli argini e del piano posa barriera di confinamento



I terreni che saranno utilizzati per la realizzazione degli argini e il piano posa argilla, dovranno avere i seguenti parametri geotecnici minimi al fine di garantire la sicurezza nei confronti degli scivolamenti:

Tabella 3.5: Parametri geotecnici minimi per il materiale di riporto		
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)
17	32	2

#### 3.3.3 Argilla

Lo strato di argilla previsto in scarpata dovrà essere costituito da materiale che, oltre alle caratteristiche di impermeabilizzazione riportate nella relazione tecnica di progetto, dovrà rispondere anche alle caratteristiche geotecniche minime, riportate nella tabella seguente:

Tabella 3.6: Parametri geotecnici minimi dell'argilla in scarpata	
Descrizione	Argilla, argilla limosa, argilla limosa debolmente sabbiosa
Peso di volume	1,7-1,9t/m <sup>3</sup> (Proctor Mod.)
Coesione efficace	>10 kPa (prova CIU o TD-D)
Angolo di attrito secante	>24° (prova CIU o TD-D)
Coesione non drenata	>45 kPa (Prove UU)

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>34</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.3.4 Rifiuti

Le caratteristiche geotecniche dei rifiuti derivanti dalla bonifica dell'area palte fosfatice sono ipotizzate sulla base della tipologia di materiali che verranno conferiti, cioè materiali granulari inertizzati conferiti all'interno di big bags.

Si riporta di seguito una tabella con indicazione dei parametri geotecnici assunti nelle verifiche.

Tabella 3.7: Parametri geotecnici dei rifiuti da bonifica area palte		
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)
12	32	20

### 3.3.5 Materiali granulari per la formazione degli strati drenanti

I materiali granulari per la formazione degli strati drenanti dovranno garantire i seguenti parametri geotecnici minimi.

Tabella 3.8: Parametri geotecnici minimi dei materiali granulari per la formazione degli strati drenanti		
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)
17	34	0

### 3.3.6 Argilla copertura



Lo strato di argilla previsto sarà costituito da materiale che, oltre alle caratteristiche di impermeabilizzazione riportate nella relazione tecnica di progetto, dovrà rispondere anche alle caratteristiche geotecniche minime, riportate nella tabella seguente:

Tabella 3.9: Parametri geotecnici minimi dell'argilla copertura	
Descrizione	Argilla, argilla limosa, argilla limosa debolmente sabbiosa
Peso di volume	1,6-1,8t/m <sup>3</sup>
Coesione efficace	>10 kPa (prova CIU o TD-D)
Angolo di attrito secante	>24° (prova CIU o TD-D)

### 3.3.7 Strato superficiale di copertura

Lo strato superficiale di copertura dovrà garantire le seguenti caratteristiche geotecniche minime.

Tabella 3.10: Parametri geotecnici minimi dello strato superficiale di copertura		
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)
18	30	4

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>35</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.3.8 Caratteristiche geotecniche delle barriere composite

Come indicato nelle NTC, nel caso di barriere composite, devono esser valutate le condizioni di stabilità lungo le superfici di scorrimento che comprendono anche le interfacce tra i diversi materiali utilizzati.

Per la caratterizzazione delle interfacce dei geosintetici è possibile ricorrere ad un criterio di Mohr-Coulomb, come espresso dalla:

$$\tau = ad + \sigma_n \tan \delta$$

dove compaiono un termine relativo all'adesione superficiale ( $ad$ ) ed uno alla componente di attrito ( $\delta_n \tan \delta$ ). Nel caso in cui una delle interfacce sia costituita da terreno, il valore superiore di  $\delta$  è pari a  $\phi$ , cioè l'angolo di resistenza a taglio del terreno stesso, mentre il valore superiore dell'adesione è pari alla coesione del terreno stesso.

Per comprendere la modalità di funzionamento di strati composti da più geosintetici interagenti con il terreno, è bene disporre delle conoscenze relative ai parametri di tutte le interfacce presenti, ovvero quella superiore e quella inferiore di ogni geosintetico. In tal modo si può procedere ad una verifica per ciascuna singola interfaccia e poi verificare la compatibilità di queste con la stabilità di insieme (multilayers system).



Nello specifico il pacchetto di copertura in progetto è composto dalla seguente stratigrafia (dall'alto verso il basso):

- Strato superficiale di copertura;
- Geotessile di protezione (TNT);
- Strato drenante;
- Geotessile di protezione (TNT);
- Geomembrana in HDPE doppio ruvida;
- Strato minerale compattato;
- Geotessile di protezione (TNT);
- Strato di drenaggio del gas e di rottura capillare;

L'interfaccia più critica presente nella stratigrafia sopra riportata è quella tra geomembrana in HDPE e geotessile; per tale motivo, nelle analisi di stabilità si farà riferimento ai valori prestazionali di tale interfaccia critica. Per tali interfacce si possono agevolmente raggiungere valori di angolo di attrito superiori a 24° grazie all'utilizzo di geomembrane ad aderenza migliorata reperibili in commercio, quali quella prevista in progetto.

Nelle analisi di stabilità, riportate di seguito, l'interfaccia tra geomembrana in HDPE e geotessile, sarà modellizzata come uno strato di ridotto spessore (10 cm) avente le caratteristiche geotecniche riportate nella tabella seguente.

Tabella 3.11: Parametri geotecnici di interfaccia dei geosintetici		
Peso di volume (kN/mc)	Angolo di attrito interno (°)	Coesione (kPa)
10	24	0

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>36</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.4 Verifiche di stabilità

Si riportano di seguito le analisi di stabilità condotte rispetto alla configurazione geometrica di progetto, considerando sia la fase di esercizio a fine conferimento rifiuti che la configurazione definitiva con pacchetto di copertura completato; le verifiche sono state seguite sia in condizioni statiche in assenza di una azione sismica che in condizione di sisma con presenza di azione sismica di progetto concomitante.

#### 3.4.1 Combinazioni di carico

Individuate le caratteristiche geotecniche dei terreni, in accordo con la normativa, nelle verifiche di stabilità sono state prese in considerazione separatamente le seguenti combinazioni delle azioni (par. 2.5.3 delle NTC18):

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi:

$$\gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{K2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{K3} + \dots$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G1 + G2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{K1} + \psi_{22} \cdot Q_{K2} + \dots$$

dove il simbolo “+” assume il significato di “combinato con”.

##### 3.4.1.1 Verifiche combinazione fondamentale



Le verifiche allo stato limite SLV (stato limite di salvaguardia della vita) sono state condotte ai sensi del cap. 6.8 delle NTC 2018 “Opere di materiali sciolti e fronti di scavo” e del capitolo 7.11.4 “Fronti di scavo e rilevati”.

Le verifiche sono state condotte applicando il cosiddetto Approccio 1 definito dalle NTC18, ed in particolare è stata utilizzata la Combinazione 2 (A2+M2+R2) tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I delle Norme.

**TABELLA 3.12: COEFFICIENTI PARZIALI PER I PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI (EX TAB. 6.2.II DELLE NTC18)**

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente	Coefficiente	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'$	$\gamma_{\phi'}$	1,00	1,25
Coesione efficace	$c'$	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	$c_u$	$\gamma_{c_u}$	1,00	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1,00	1,00



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>37</b> di 49	
<b>LOGO APPALTATORE</b> 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

**TABELLA 3.13: COEFFICIENTI PARZIALI PER LE AZIONI O PER L'EFFETTO DELLE AZIONI (EX TAB. 6.2.I DELLE NTC18)**

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G1	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G2 <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Per i carichi permanenti G2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

**TABELLA 3.14: COEFFICIENTI PARZIALI PER LE VERIFICHE DI SICUREZZA DI OPERE DI MATERIALI SCIOLTI E DI FRONTI DI SCAVO (EX TAB. 6.8.I DELLE NTC18)**

Coefficiente	R2
$\gamma_R$	1.1

#### 3.4.1.2 Verifiche combinazione sismica

Nelle verifiche di sicurezza in condizioni sismiche, in accordo al § 7.11.4 delle NTC 2018, è stato applicato il metodo pseudo statico, in cui l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile.

Le componenti orizzontale e verticale della forza statica equivalente sono espresse come:



$$F_h = K_h \cdot W \quad F_v = K_v \cdot W$$

con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale, definiti nel § 7.11.3.5.2 delle NTC 2018 e adottando i seguenti valori del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito:

$\beta_s = 0,38$  nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV);

$\beta_s = 0,47$  nelle verifiche dello stato limite di esercizio (SLD).

Per quanto concerne la progettazione per azioni sismiche per le opere di materiali sciolti e fronti di scavo, in accordo con le NTC 2018 (ex par. 7.11.4. Fronti di scavo e rilevati), le verifiche sono state condotte secondo il cosiddetto Approccio 1 definito dalle NTC18, ed in particolare è stata utilizzata la Combinazione 2 (A2+M2+R2), ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1,2$ .

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>38</b> di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

I coefficienti sismici (stato limite di riferimento: SLV) per le verifiche di Fronti di scavo e rilevati (rif. NTC 2018 § 7.11.4) per sono stati valutati come riportato di seguito.

$$k_h = \beta \cdot \frac{a_{max}}{g} = \beta \cdot \frac{a_g}{g} \cdot S_s \cdot S_t = 0.027$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h = 0.014$$

Essendo:

$\beta$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito (0,380);

$a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido;

$g$  = accelerazione di gravità.

### 3.4.2 Metodologia di calcolo

Le verifiche di stabilità sono state condotte con il cosiddetto metodo "dell'equilibrio limite", che consiste nell'individuare possibili superfici di scivolamento che coinvolgono uno o più materiali e nel verificare, per ciascuna di esse, l'equilibrio allo scivolamento del cuneo di materiali sovrastanti, considerato come se fosse rigido.

Le analisi sono state svolte con un codice di calcolo di uso commerciale ed affidabile per le applicazioni correnti; il metodo risolutivo utilizzato è quello di GLE/Morgenstern-Price.



Lo studio è stato impostato in accordo con il DM 14 gennaio 2018.

Le verifiche sono state effettuate considerandone gli effetti a lungo termine, parametrizzando le caratteristiche geotecniche dei terreni in termini di sforzi efficaci.

Le verifiche in condizioni statiche (combinazione fondamentale) sono state condotte applicando, ai diversi parametri geotecnici caratteristici, i relativi fattori parziali di sicurezza, nella combinazione di calcolo A2+M2+R2, introducendo già nel calcolo la riduzione per il coefficiente parziale  $\gamma_r$  pari a 1.1 (aliquota R2).

Le verifiche in condizioni sismiche (combinazione sismica) sono state condotte con un approccio pseudo statico, considerando l'azione sismica di progetto, rappresentata dai coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v$ . In conformità a tale metodo, le componenti orizzontali e verticali delle forze di inerzia sono applicate, mediante il programma di calcolo, nel baricentro della massa potenzialmente instabile e nei baricentri delle singole strisce in cui essa può essere suddivisa. Le verifiche in condizioni sismiche sono state condotte nella combinazione di calcolo A2+M2+R2, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale  $\gamma_r$  pari a 1.2 (aliquota R2).

In base a tali condizioni al contorno, con specifico riferimento a quanto previsto per le opere in materiali sciolti e fronti di scavo ed introducendo già nel calcolo la riduzione per il coefficiente parziale  $\gamma_r$  (aliquota R2), la verifica risulta

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>			Pag. <b>39</b> di 49
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

soddisfatta nel rispetto dell'equazione:

$$R_d \geq E_d$$

essendo  $R_d$  il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico ed  $E_d$  il valore di progetto dell'azione o dell'effetto delle azioni destabilizzanti.

Le verifiche risultano quindi soddisfatte nel rispetto del fattore di sicurezza  $FS \geq 1$ .

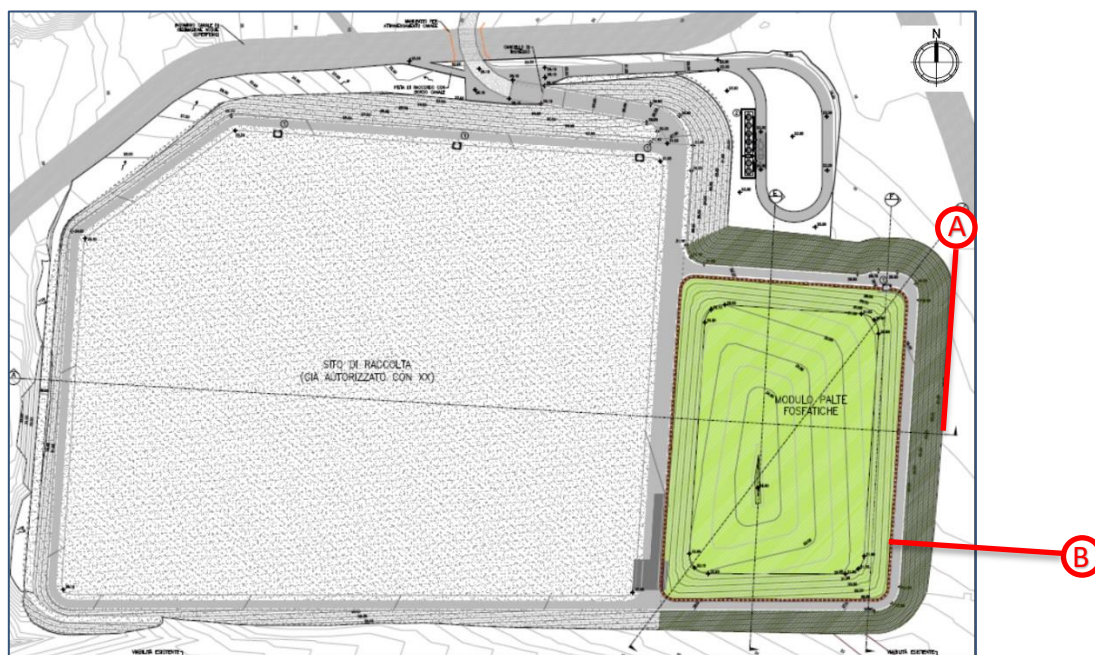
Nel prosieguo si riportano i risultati delle analisi condotte in condizioni statiche ed in condizioni sismiche.

### 3.4.3 Analisi di stabilità del MPF



Si riportano di seguito le verifiche di stabilità:

- dell'argilla posata sulla scarpata interna;
- del paramento esterno degli argini;
- della copertura definitiva.

Si riporta di seguito una figura con l'indicazione della posizione delle sezioni analizzate.



*Figura 3.1: Ubicazione delle sezioni di verifica*

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>40</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

In particolare:

- nella sezione A è stata verificata la stabilità globale dell'argilla in scarpata, in quanto risulta essere la sezione interna caratterizzata dalla massima altezza;
- nelle sezioni B è stata verificata la stabilità globale dell'argine di contenimento comprensivo della soprastante copertura definitiva e la stabilità alla traslazione lungo l'interfaccia dei geosintetici della copertura definitiva.

Si riporta di seguito una figura con l'indicazione della sezione tipologica di verifica e l'indicazione dei materiali.

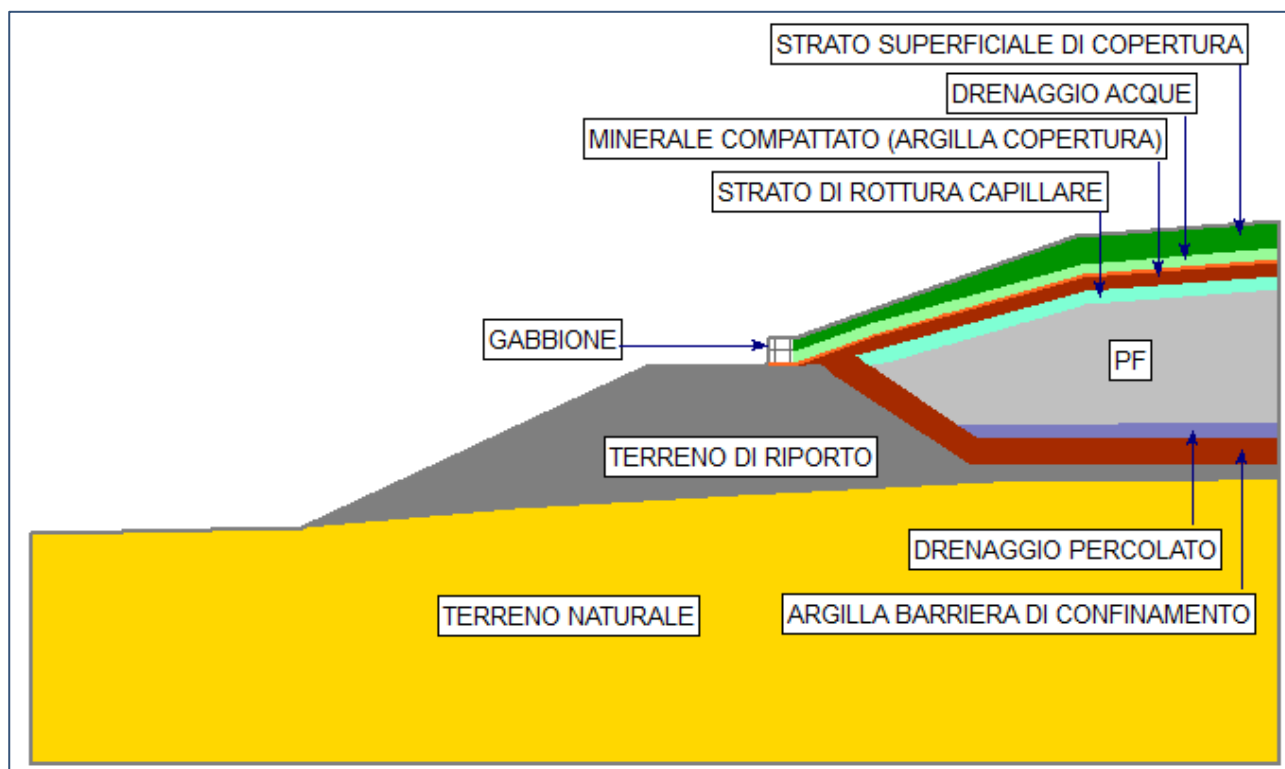




Figura 3.2: Sezione tipologica di verifica considerata per le analisi di stabilità con indicazione dei materiali

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>41</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

#### 3.4.3.1 Verifica dell'argilla in scarpata

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva dei fattori di sicurezza ottenuti nelle verifiche di stabilità condotte.

Tabella 3.15: Valori di $\gamma R$ ottenuti nelle verifiche di stabilità globale dell'argilla in scarpata (sezione A)			
Tipo superficie	Metodo	COMBINAZIONE FONDAMENTALE $\gamma R \geq 1,1$	COMBINAZIONE SISMICA $\gamma R \geq 1,2$
Stabilità globale (Surface Type Circular)	Morgenstern-Price	2,517	2,870

Come si osserva dalla tabella sopra riportata i coefficienti di sicurezza sono sempre maggiori del valore minimo imposto dalla normativa; le sezioni di calcolo considerate sono pertanto verificate con esito positivo.

Di seguito si riportano i risultati grafici delle analisi svolte.

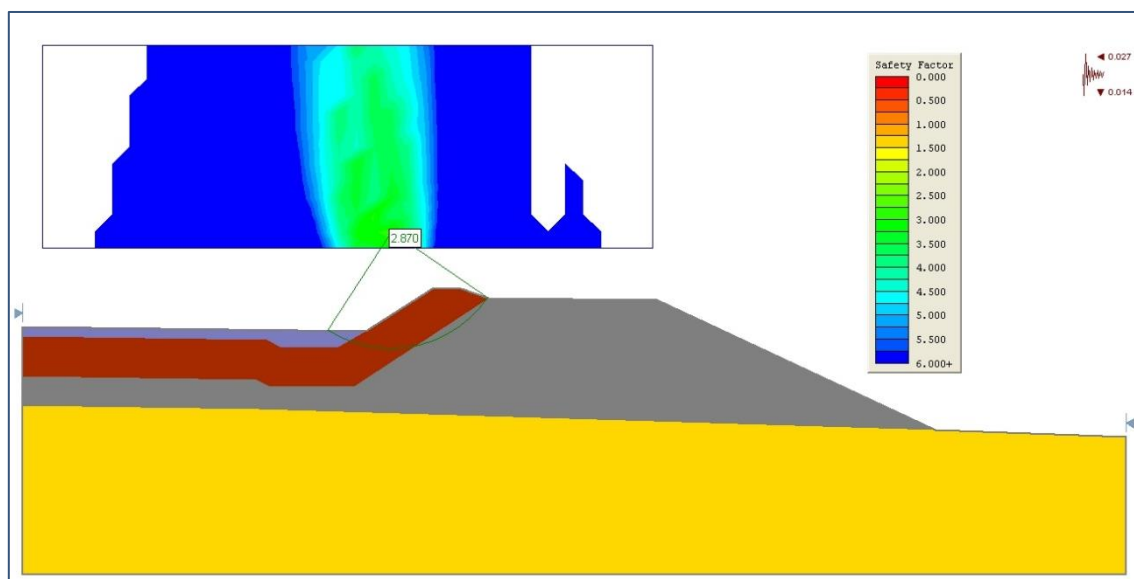


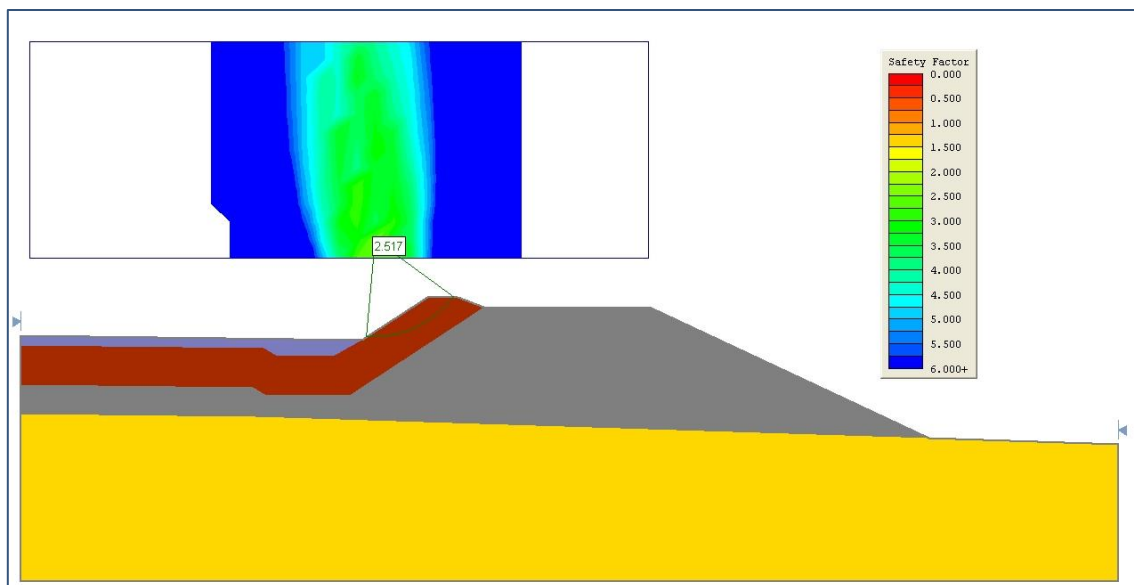




Figura 3.3: Sezione A – Stabilità globale dell'argilla in scarpata – condizione sismica - superficie critica



	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>42</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	



*Figura 3.4: Sezione A – Stabilità globale dell'argilla in scarpata – condizione statica- superficie critica*

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>43</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.4.3.2 Verifica del paramento esterno dell'argine di contenimento e della copertura definitiva

Si riportano di seguito le tabelle riassuntive dei fattori di sicurezza ottenuti nelle verifiche di stabilità condotte.

Tabella 3.16: Valori di $\gamma_R$ ottenuti nelle verifiche di stabilità (sezione B)			
Tipo superficie	Metodo	COMBINAZIONE FONDAMENTALE $\gamma_R \geq 1,1$	COMBINAZIONE SISMICA $\gamma_R \geq 1,2$
Stabilità globale (Surface Type Circular)	Morgenstern-Price	1,397	1,631
Traslazione lungo i sistemi di isolamento (Non-Circular Block Search)	Morgenstern-Price	1,394	1,584

Come si osserva dalla tabella sopra riportata i coefficienti di sicurezza sono sempre maggiori del valore minimo imposto dalla normativa; le sezioni di calcolo considerate sono pertanto verificate con esito positivo.

Di seguito si riportano i risultati grafici delle analisi svolte.

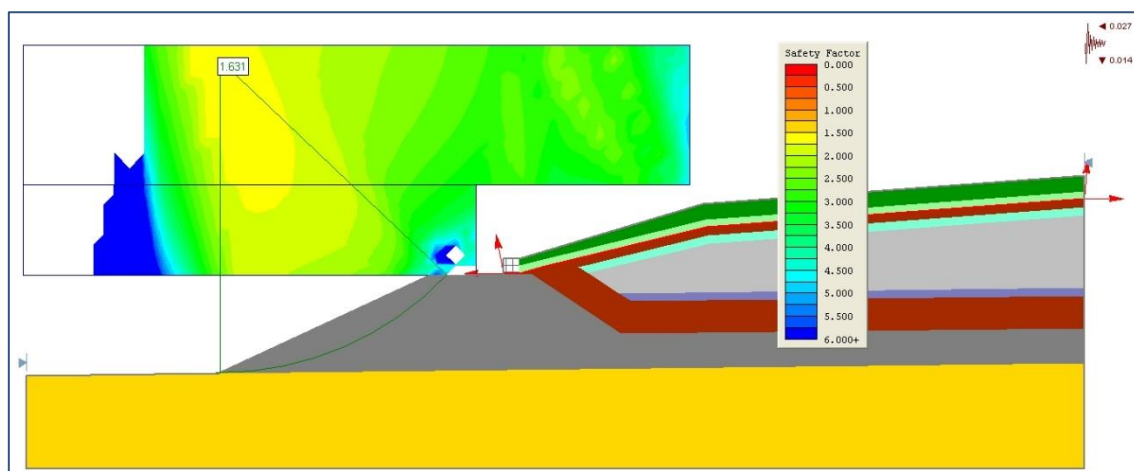




Figura 3.5: Sezione B - Configurazione finale (con pacchetto di copertura) - stabilità globale in condizioni sismiche - superficie critica

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>44</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

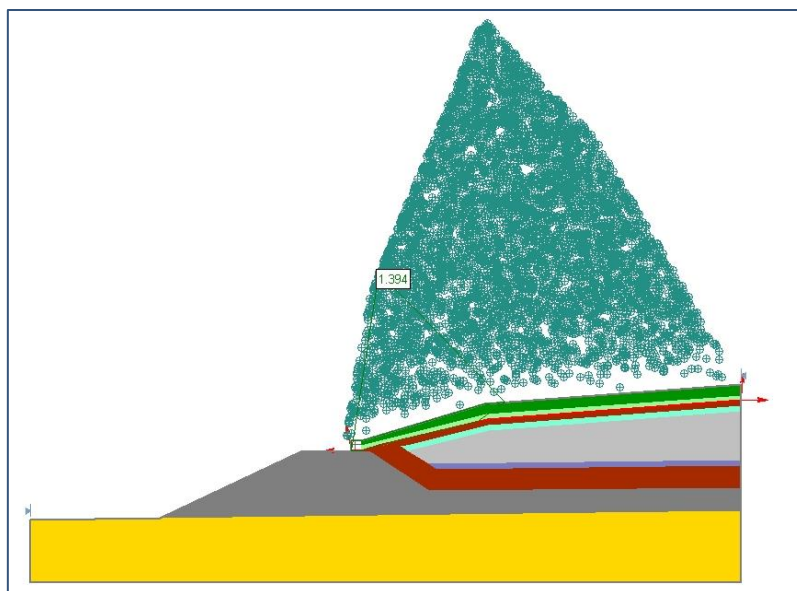




Figura 3.6: Sezione B - Configurazione finale (con pacchetto di copertura) - Traslazione lungo i sistemi di isolamento (Non-Circular Block Search) condizioni statiche - superficie critica

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>45</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.5 Cedimenti

Nel presente paragrafo si riporta la sintesi del calcolo dei cedimenti condotti per la verifica di compatibilità del sistema di impermeabilizzazione e drenaggio del fondo delle opere di progetto costituite dal Modulo Palte Fosfatice.

Il piano di fondazione delle opere sarà costituito da materiale naturale in posto (a seguito di scolturamenti/livellamenti) o da materiali di riporto, opportunamente compattati.

I materiali potranno essere di provenienza interna o esterna e saranno costituiti da materiali granulari.

Il materiale di riporto verrà steso a strati in modo controllato all'umidità ottima del Proctor, procedendo alla compattazione per strati sovrapposti, ciascuno di spessore finito di circa 25 cm.



#### 3.5.1 Valutazione dei cedimenti del fondo

La problematica connessa ai cedimenti del fondo della vasca si risolve nella stima dei cedimenti massimi attesi e dei cedimenti differenziali che dovranno essere tali da non danneggiare il sistema di impermeabilizzazione. Si rammenta che l'impermeabilizzazione minerale del fondo costituisce un elemento altamente "flessibile" in grado di assorbire deformazioni anche elevate senza arrivare a rottura.

##### 3.5.1.1 Geometrie di calcolo e valutazione dei carichi

Per la valutazione dei cedimenti del terreno di fondazione indotti dai carichi agenti, la geometria della discarica è stata scomposta in una figura geometrica elementare (rettangoli) avente le dimensioni della vasca. Per i calcoli si è quindi fatto riferimento ad un'area di carico costituita da una piastra rettangolare flessibile di dimensioni 80 m per 120 m.

I carichi agenti sul piano di fondazione sono stati valutati lungo le sezioni A e B riportate nella figura seguente; la sezione B passa per il punto con spessore minimo dei rifiuti, mentre la sezione A passa in corrispondenza del colmo dei rifiuti, punto in cui è massimo lo spessore degli stessi. Tale scelta progettuale è condizionata dal fatto che particolare importanza assume la determinazione dei cedimenti differenziali, che si verificano in occasione di distribuzioni non omogenee dei carichi.

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR-1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>46</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

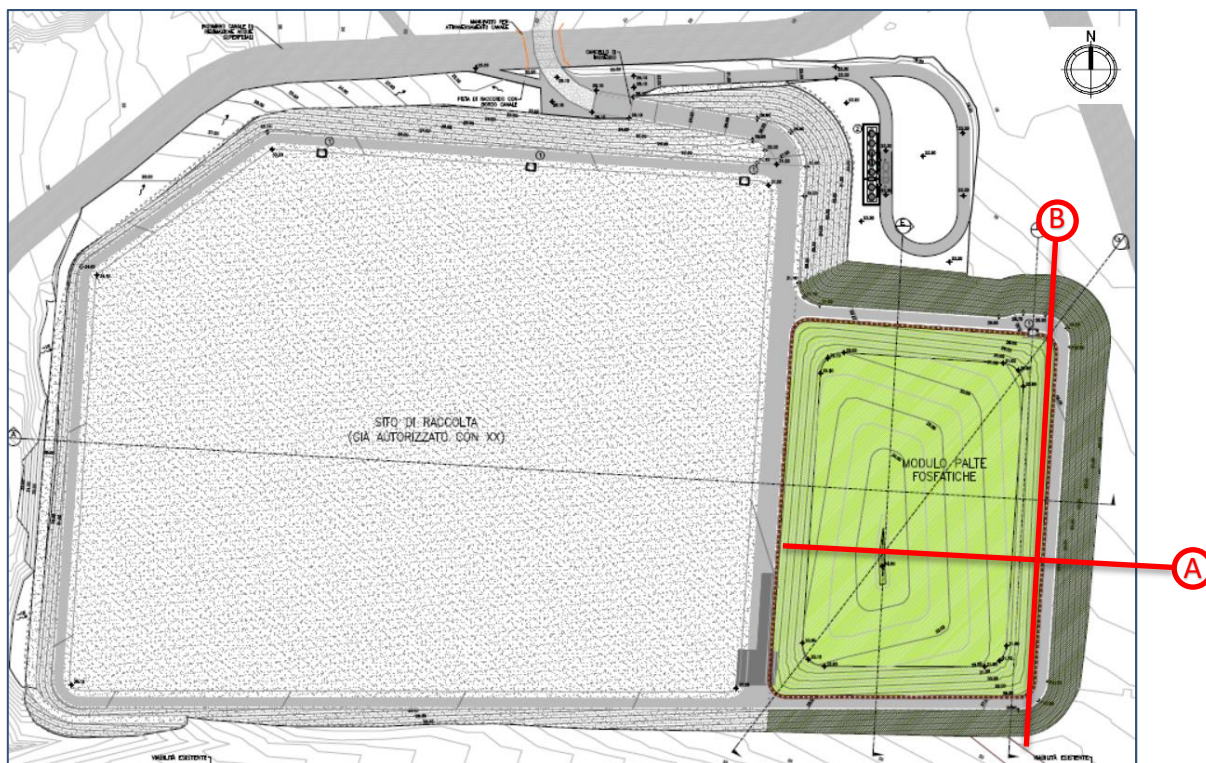


Figura 3.7: Tracce delle sezioni utilizzate per la valutazione dei carichi

La figura seguente riporta una sezione esemplificativa con indicazione degli spessori dei rifiuti a cui è stato associato un carico agente sul piano di fondazione, proporzionale allo spessore considerato.

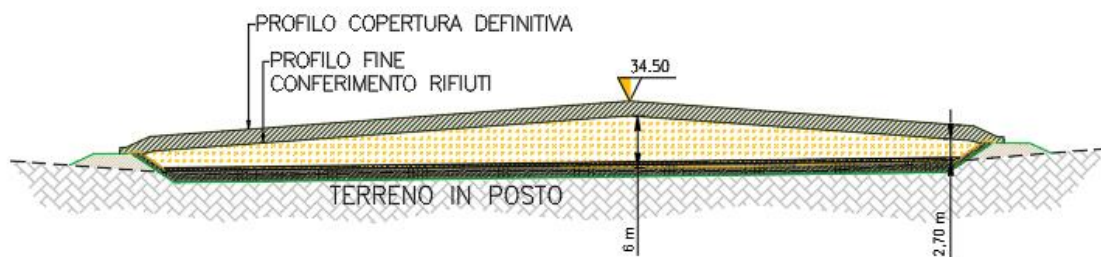




Figura 3.8: Sezione esplicativa con indicazione degli spessori considerati (massimo e minimo)

Le tabelle seguenti riportano la valutazione dei carichi agenti in corrispondenza di:

- colmo rifiuti al centro della vasca (carico massimo);
- pozzi percolato (carico minimo);

Sulla base della valutazione dei carichi sono stati calcolati i cedimenti massimi e differenziali sul piano posa della barriera di confinamento, riportati nel seguito.





	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	<b>TITOLO</b> BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>47</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

**Tabella 3.17: Schema dei carichi indotti sul piano posa barriera di confinamento (carico massimo)**

Materiale		Spessore [m]	Peso di volume [kN/mc]	Carico [kPa]	% di carico
Rifiuti		6	12	72	45%
Copertura	Strato superficiale di copertura	1	18	18	11,25%
	Dreno acque	0,5	17	9	5,31%
	Argilla	0,5	18	9	5,62%
	Drenaggio Biogas e rottura capillare	0,5	17	9	5,31%
Fondo	Ghiaia di drenaggio	0,5	16	8	5%
	Argilla	2	18	36	22,5%
Totale		11		160	100%

**Tabella 3.18: Schema dei carichi indotti sul piano posa barriera di confinamento (carico minimo)**

Materiale		Spessore [m]	Peso di volume [kN/mc]	Carico [kPa]	% di carico
Rifiuti		2,7	12	32,4	26,4%
Copertura	Strato superficiale di copertura	1	18	18	14,9%
	Dreno acque	0,5	17	8,5	7,02%
	Argilla	0,5	18	9	7,44%
	Drenaggio Biogas e rottura capillare	0,5	17	8,5	7,02%
Fondo	Ghiaia di drenaggio	0,5	16	8	6,61%
	Argilla	2	18	36	29,7%
Totale		7,7		120,4	100%

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>48</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

### 3.5.1.2 Calcolo dei cedimenti in corrispondenza del piano posa barriera di confinamento

Data la natura dei terreni presenti nel sito di progetto nella valutazione dei cedimenti sono stati considerati unicamente i cedimenti primari a breve scadenza, ritenendo trascurabili i cedimenti secondari di consolidazione e nulli quelli dovuti a deformazione viscosa.

L'analisi dei cedimenti, indotti dai carichi agenti sul terreno di fondazione della vasca, è stata effettuata secondo la teoria dell'elasticità, considerando il semispazio al di sotto del piano di imposta dell'impianto come un mezzo continuo, isotropo, omogeneo ed a comportamento elastico-lineare; in particolare è stata utilizzata la formulazione di Egorov (1958), applicata ad uno per spessore finito:

$$S_d = S_k = \frac{2aq \cdot l \cdot (1 - \mu^2)}{E}$$

Dove:

- q = il carico netto trasmesso al piano di fondazione
- S = il cedimento atteso (d = progetto, k = valore caratteristico)
- 2a = la larghezza della fondazione
- l = coefficiente di influenza legato alla larghezza della fondazione, dello spessore dello strato compressibile e della profondità del piano di posa)
- $\mu$  = il modulo di Poisson (0,375)
- E = il modulo di elasticità del terreno (60.000 kPa).

Lo spessore dello strato compressibile (i.e. la profondità di influenza del carico per la valutazione dei cedimenti), è stato calcolato come la profondità alla quale la variazione di carico, dovuta alla presenza della discarica, influenza per meno del 20% la situazione tensionale geostatica; tale profondità massima è pari a circa 40 m.

Per la determinazione dell'incremento di pressione prodotto dal carico applicato è stata utilizzata la formulazione di Newmark (1935).



$$\Delta q = q_0 \cdot I_\sigma$$

Dove:

- $q_0$  è il carico indotto;
- $I_\sigma$  è un termine dipendente dalle dimensioni e dalla profondità della fondazione.

La determinazione dei cedimenti è stata effettuata agli stati limite d'esercizio (SLE), utilizzando la combinazione dei carichi "frequente":

$$G_1 + G_2 + P + \Psi_{11} \cdot Q_{k1} + \Psi_{22} \cdot Q_{k2} + \Psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

	SITO/LOCALITA' Porto Torres (SS)	N° DOC. 100076-ENG-F-F5-6002-AII.5	PVI: 100076	N° COMMESSA RE-1076-BSTR- 1_I
	TITOLO BONIFICA PALTE FOSFATICHE (EX NURAGHE FASE 2) <b>MODULO PALTE FOSFATICHE</b> <b>RELAZIONE GEOLOGICA, GEOTECNICA E SISMICA</b>		Pag. <b>49</b> di 49	
LOGO APPALTATORE 	N°DOC Appaltatore	FUNZIONE EMITTENTE INGEA/TEBO	INDICE DI REV. 0	

Applicando la formulazione di Egorov (1958) alle differenti configurazioni di carico (si vedano le due tabelle precedenti) si ottengono i cedimenti riportati di seguito:

- Centro della vasca 10 cm;
- Pozzi percolato 7 cm.

Sulla base di questi cedimenti assoluti possono essere calcolati i cedimenti differenziali tra centro vasca e zona pozzi percolato, pari a 3 cm. Un tale valore di cedimento differenziale, considerate le pendenze presenti sul fondo della vasca (circa 1,5 % in direzione dei pozzi percolato), non determinano la formazione di contropendenze che compromettano il convogliamento del percolato nei pozzi di estrazione.

Il valore del cedimento, sia assoluto che differenziale, risulta compatibile con le capacità deformative della struttura anche alla luce del fatto che la morfologia dell'impianto verrà realizzato gradualmente e senza gradini di carico, garantendone la piena funzionalità all'esercizio.

Si precisa, inoltre, che nella valutazione del calcolo dei cedimenti, in accordo con un modello semplificato, è stato cautelativamente considerato un semispazio elastico omogeneo caratterizzato da un unico e costante valore del modulo di elasticità trascurando il miglioramento delle caratteristiche geotecniche del terreno con la profondità e di conseguenza sovrastimando i cedimenti attesi.

### 3.5.2 Valutazione dei cedimenti del materiale non recuperabile conferito nel MPF

Il progetto prevede la copertura dei rifiuti conferiti nel MPF mediante una geometria a calotta e mira a garantire, anche nelle fasi di sistemazione finale, la stabilità della forma, l'integrità e la continuità dei materiali stoccati; ciò al fine di evitare la formazione di contropendenze non compatibili con la funzionalità dei sistemi di rivestimento e di allontanamento delle acque meteoriche insistenti sulla copertura del MPF stesso.

Per ciò che concerne i rifiuti che saranno conferiti, l'esperienza maturata in impianti del tutto simili a quello in oggetto, mostra che la maggior parte dei cedimenti avviene durante la fase di coltivazione del MPF si stima che la quota parte dei cedimenti dovuta al carico esercitato dalla copertura finale sia di entità molto ridotta.

Data inoltre la pressoché assenza di frazione biodegradabile nei rifiuti, anche i cedimenti secondari di consolidazione e di deformazione viscosa possono ritenersi trascurabili.

Si ritiene pertanto che i cedimenti del corpo rifiuto una volta posato il sistema di copertura siano da ritenersi di modesta entità e comunque tali da non generare contropendenze significative capaci di compromettere l'allontanamento delle acque meteoriche.