



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA CIVILE

ANALISI, DIMENSIONAMENTO E MONITORAGGIO DI UNA PARATIA TIRANTATA: IL CASO STUDIO DEL NUOVO OSPEDALE DI FELETTINO (LA SPEZIA)

Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile

Relatore

Prof. Alessio Mentani

Presentata da

Lorenzo Tomassini

Luglio 2026

Anno Accademico 2025/2026

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	2
1.1 Il progetto del nuovo ospedale “Felettino”	2
1.2 La progettazione della paratia tirantata del fronte Nord.....	5
2. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SITO	9
2.1 Stato attuale dell’opera.....	9
2.2 Caratterizzazione geologica	12
2.2.1 Geomorfologia.....	36
2.2.2 Idromorfologia.....	39
2.3 Caratterizzazione idraulica	39
2.4 Caratterizzazione geotecnica.....	48
2.4.1 Progetto esecutivo iniziale	48
2.4.2 Problematiche riscontrate durante l’esecuzione dei lavori.....	54
2.4.3 Progetto esecutivo di variante	56
3. ANALISI NUMERICA DEGLI STATI LIMITE	66
3.1 Modello numerico rivisitato dell’opera	66
3.2 Risultati delle verifiche numeriche	76
3.2.1 Stato Limite di Esercizio: combinazione Rara	77
3.2.2 Stato Limite Ultimo: A1-M1-R1	78
3.2.3 Stato Limite Ultimo: A2-M2-R1	79
3.2.4 Stato Limite Salvaguardia della Vita: SISMICA STR	80
3.2.5 Stato Limite Salvaguardia della Vita: SISMICA GEO	81
3.2.6 Verifiche Tiranti: A1-M1-R3	82
3.2.7 Verifiche stabilità globale terreno-opera: A2-M2-R2	83
3.3 Considerazioni finali sulle verifiche agli stati limite	84
4. MONITORAGGIO DELLA PARATIA	86
4.1 Strumentazione e metodologia di misura	86
4.2 Sistema di monitoraggio.....	89
4.2.1 Misure Piezometriche.....	89
4.2.2 Misure Inclino metriche.....	90
4.2.3 Misure Celle di carico	93
4.2.4 Misure Mire Topografiche	97
4.3 Analisi dei risultati.....	105
5. CONCLUSIONI	119
6. BIBLIOGRAFIA	121

1. INTRODUZIONE

1.1 Il progetto del nuovo ospedale “Felettino”

La berlinese oggetto del seguente lavoro di tesi si inserisce in un contesto progettuale molto più ampio, riguardante la costruzione del nuovo ospedale “Felettino” della Spezia.

Il progetto nella sua interezza consta nella realizzazione di diverse opere strutturali che possono essere raggruppate in quattro aree principali [1] [2] [3].

- **CORPO CENTRALE OSPEDALE**

Il progetto prevede una struttura realizzata interamente in cemento armato sviluppata su nove interpiani fuori terra e un piano interrato. Si estende in pianta per una superficie complessiva di circa 9000 m^2 ed è caratterizzata da una forma a raggiera con quattro maniche principali, ciascuna ruotata di 40° rispetto alle altre, e da tre corpi che fungono da collegamento tra le maniche. In altezza la quota dell'ultimo solaio è sopraelevata di 44.35 m rispetto al piano di fondazione. Nei pressi del corpo centrale si trovano due bassi fabbricati ad un solo piano fuori terra, adibiti a luogo di culto e ludoteca. Qui di seguito sono riportate le proprietà geometriche dei vari elementi strutturali costituenti il corpo centrale dell'ospedale:

- Platea fondazione spessore 100 cm
- Muri perimetrali contenimento al piano interrato spessore 40 cm
- Setti e vani in cemento armato con funzione resistente statica e sismica spessore compreso tra 30 cm e 50 cm
- Pilastri in cemento armato a sezione variabile, di dimensioni maggiori al piano interrato (80x80 cm e 80x100) e minori al settimo (40x40 cm), con una distribuzione spaziale a maglia regolare. Non hanno funzione sismo resistente
- Solette piene in cemento armato spessore 35 cm, con assottigliamento a 30 cm nelle zone perimetrali dei piani corrispondenti alle logge
- Struttura metallica con funzione di copertura per l'elipista, realizzata tramite un sistema di telai verticali controventati che sostiene un grigliato piano al quale è fissata la superficie di atterraggio

- **ZONA LOCALI TECNICI**

Il polo tecnologico è situato da progetto in un'area intermedia tra il corpo centrale dell'ospedale e la berlinese di pali tirantata. Si trova infatti a monte del primo e immediatamente a valle dell'opera di sostegno, ad una quota superiore rispetto al piano di fondazione dell'ospedale. Interamente realizzato in cemento armato, è costituito da una zona principale ad un solo piano ed un'altra all'estremità ovest che si sviluppa su tre interpiani, adibita a sede del servizio 118. La struttura ha una forma assimilabile ad un settore di corona circolare con una lunghezza complessiva di circa 165 m e larghezza della manica pari a 16 m. La porzione di edificio costituita dai tre piani fuori terra ha un'area in pianta di circa 13x16 m. Qui di seguito sono riportate le proprietà geometriche dei vari elementi strutturali costituenti la struttura adibita a polo tecnologico:

- Platea fondazione spessore 50 cm
- Setti e vani in cemento armato con funzione resistente statica e sismica spessore 40 cm
- Pilastri in cemento armato di sezione 40x40 cm privi di funzione sismo resistente
- Soletta piena in cemento armato spessore 35 cm

- **OPERE ESTERNE**

In questo gruppo vengono raccolte tutte quelle opere esterne che assicurano il contenimento del terreno, permettono la realizzazione e fruizione delle vie di accesso e transito all'ospedale e ai locali e consentono un'adeguata regimentazione delle acque superficiali e di pioggia. Queste opere sono descritte qui di seguito:

- Muri di contenimento a mensola di grande altezza situati a monte dell'ospedale. Realizzano il contenimento del terreno in due aree, una a lato della berlinese esistente, l'altra a valle del polo tecnologico, costituendo di fatto il limite posteriore del piazzale logistico. Sono realizzati con suola di fondazione di spessore 100 cm e paramento verticale di spessore variabile da 90 a 40 cm.
- Muri di contenimento a mensola di altezza inferiore situati in varie aree del lotto con funzione di contenimento a lato di strade e parcheggi.
- Berlinesi di pali trivellati per il contenimento del terreno nelle zone dove non è permessa la realizzazione dello scavo necessario alla realizzazione dei muri a mensola.
- Berlinese di micropali in prossimità del giardino esistente per realizzare il dislivello con la strada di accesso logistico preservando gli alberi presenti in sito.
- Nuova soletta di attraversamento del canale L5, da realizzare in sostituzione di quella esistente a una quota troppo elevata, che verrà demolita.
- Nuovo manufatto con sezione a U per il contenimento del canale L5 da realizzarsi tra il ponte e i setti esistenti.
- Cunicoli interrati di collegamento tra l'ospedale e la radiologia esistente, e tra l'ospedale e il parcheggio
- Soletta sopraelevata in adiacenza al polo tecnologico per l'inversione di marcia dei veicoli

• AREA PARCHEGGIO

L'edificio adibito a parcheggio consta di una struttura realizzata interamente in cemento armato seminterrata sviluppata su tre livelli. I primi due sono destinati completamente ad area parcheggio, mentre l'ultimo livello, caratterizzato da un'estensione di poco inferiore alla metà dell'intero parcheggio, è adibito parzialmente a parcheggio e per la restante area coperto con tetto e verde. Qui di seguito sono riportate le proprietà geometriche dei vari elementi strutturali costituenti l'edificio adibito a parcheggio:

- Platea fondazione spessore 50 cm
- Muri perimetrali con funzione di controventamento e contenimento spessore 40 cm
- Setti e vani in cemento armato con funzione resistente statica e sismica spessore 30 cm
- Pilastri in cemento armato di sezione 30x70 cm e 30x80 cm, disposti secondo una maglia regolare, privi di funzione sismo resistente
- Soletta piena in cemento armato spessore 35 cm
- Struttura metallica a copertura di posti auto e sostegno pannelli fotovoltaici, realizzata con una serie di telai paralleli a passo 7.5 m

L'insieme delle opere strutturali e la loro ubicazione nell'area di progetto sono rappresentate nella planimetria di Figura 1.1

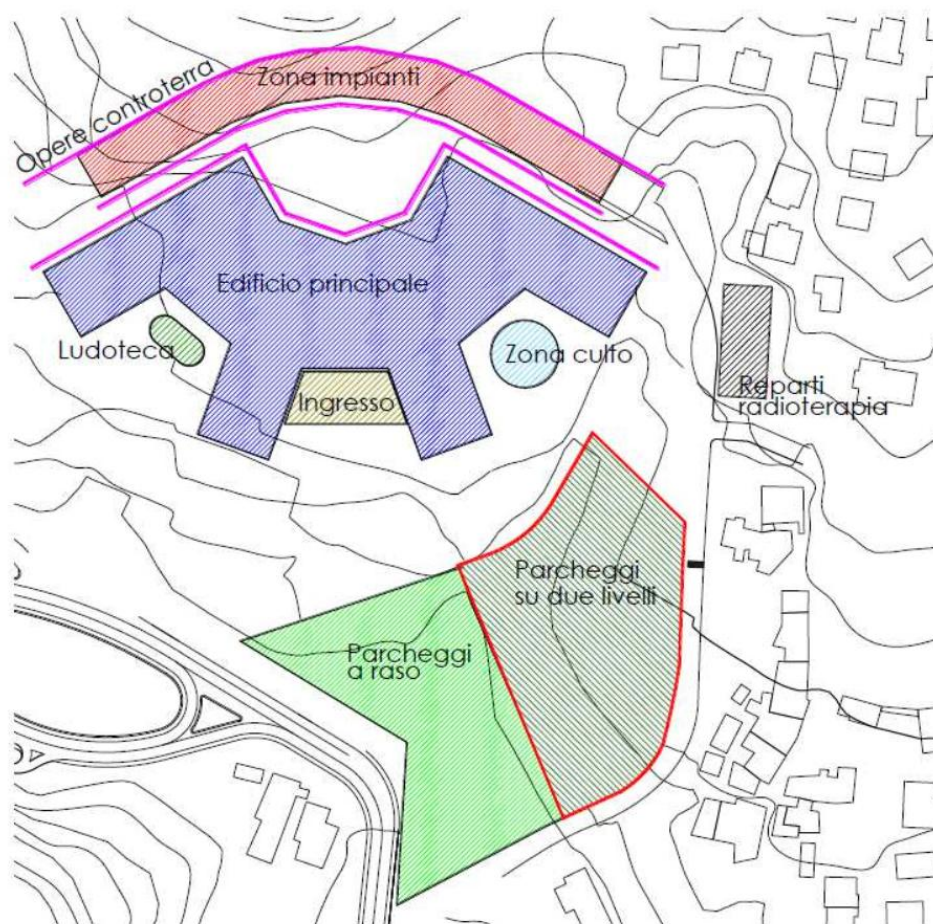


Figura 1.1 Planimetria opere strutturali area ospedaliera

1.2 La progettazione della paratia tirantata del fronte Nord

Il seguente lavoro di tesi è incentrato sull'analisi del caso studio di una berlinese tirantata di pali di grande diametro già esistente e realizzata nell'ambito dei lavori di costruzione del nuovo ospedale "Felettino" situato a La Spezia. La paratia si trova a monte dell'area destinata alla realizzazione della nuova struttura ospedaliera e svolge la funzione di sostegno del fronte di scavo. Un inquadramento generale della zona oggetto di studio e della posizione relativa della paratia rispetto all'area ospedaliera è riportato in Figura 1.2.



Figura 1.2 Inquadramento area e localizzazione berlinese

L'opera era stata inizialmente progettata da 3TI Progetto Italia Ingegneria Integrata Spa – Roma, prevedendo la realizzazione di 89 pali trivellati di diametro 1000 mm aventi lunghezza compresa tra 18.00 m e 21.00 m e disposti secondo un interasse pari a 130 cm, per uno sviluppo totale di 105 m. I pali sono collegati in testa con una trave di coronamento in calcestruzzo armato di dimensioni 1.20 m x 1.00 m, caratterizzata da una quota in sommità variabile tra +61.40 m.s.l.m. e +58.00 m.s.l.m. Il progetto prevedeva un sistema di ancoraggio al terreno mediante due ordini di tiranti sub orizzontali di diametro 120 mm. Essi erano costituiti ciascuno da 6 trefoli in acciaio armonico, disposti ad interasse orizzontale di 2,60 m e pretesiati con uno sforzo di 400 kN. I due ordini prevedono un totale di 76 tiranti, 37 per il primo ordine e 39 per il secondo. I tiranti del primo ordine si trovano ad una quota di +59.70 m.s.l.m. e sono caratterizzati da una lunghezza complessiva di 23.00 m, 11 dei quali costituenti il bulbo di ancoraggio, mentre i restanti 12 di tratto libero. L'inclinazione rispetto all'orizzontale è pari a 20°. Il secondo ordine di tiranti è disposto ad una quota di +54.40 m.s.l.m. (3.50 m sotto il primo ordine) ed è caratterizzato da elementi strutturali aventi lunghezza libera pari a 9.00 m e bulbo di ancoraggio di lunghezza 11.00 m, per un totale di 20.00 m. Anche quest'ultimi, sono inclinati rispetto all'orizzontale di 20°.

L'opera nella sua progettazione preliminare era inoltre dotata di un sistema di drenaggio costituito da due ordini di dreni sub orizzontali lunghi 10.00 m e disposti secondo un interasse orizzontale di 2.60 m. Questo era previsto a tergo della paratia, al fine di un'efficiente captazione e allontanamento delle acque superficiali a monte della struttura e conseguentemente una riduzione delle spinte gravanti. A completamento era stato previsto un rivestimento con geo composito drenante e uno strato di spritz beton di spessore di 10 cm armato con rete elettrosaldata $\varnothing 8, 15 \times 15$.

I lavori di realizzazione dell'opera sono iniziati a marzo 2017 secondo il progetto esecutivo firmato 3TI; tuttavia, a novembre 2017 la DL ha sollevato delle perplessità evidenziando la necessità di una variante progettuale. A quell'epoca la struttura era stata interamente realizzata dal punto di vista dei pali, inoltre il primo ordine di tiranti era in via di ultimazione. Per questo motivo, data l'impossibilità di modificare altri elementi strutturali, si era pensato di aggiungere un ulteriore ordine di tiranti ad un livello inferiore rispetto ai primi due, insieme ad un'altra fila di drenaggi sub orizzontali al di sotto dei precedenti.

La variante di progetto è stata predisposta ad opera dello studio ICONIA – Ingegneria Civile S.r.l. – Padova e firmata dal prof. Ing. Renato Vitaliani. Prevedeva l'aggiunta di un terzo ordine di 39 tiranti inferiori posti ad una quota di +51.90 m.s.l.m., inclinati di 20° rispetto all'orizzontale e disposti secondo un interasse di 2.60 m. I nuovi tiranti sono costituiti sempre da 6 trefoli in acciaio armonico e caratterizzati da una lunghezza libera di 7.00 m e una lunghezza del bulbo di ancoraggio pari a 11.00 m. Da progetto sono stati realizzati per trovarsi a 1.50 m sopra la quota di fondo scavo massimo prevista a +50.40 m.s.l.m., tuttavia ad oggi, con la struttura interamente realizzata (ad eccezione di due tiranti dell'ordine inferiore che non hanno superato la prova di collaudo), la quota del fondo scavo risulta circa 40 cm inferiore al terzo ordine di tiranti. La variante prevedeva inoltre l'aggiunta di un terzo ordine di dreni sub orizzontali ad una quota inferiore ai precedenti ed aventi le stesse caratteristiche. Nel dettaglio i materiali utilizzati nella realizzazione dell'opera risultano i seguenti:

- Pali trivellati $\varnothing 1000 \text{ mm}$ costituiti da calcestruzzo classe C25/30 e acciaio B450C
- Travi di contrasto costituite da calcestruzzo classe C32/40 e acciaio B450C
- Tiranti tipo definitivo ritensionabili $\varnothing 120 \text{ mm}$ armati con 6 trefoli in acciaio armonico
- Tubi drenanti corrugati e flessibili in PE rivestito con filtro geotessile in tnt dal peso di 120 g/mq

Di seguito sono riportati nelle Figure 1.3 e 1.4 rispettivamente la planimetria e il prospetto dell'opera con la variante del terzo ordine di tiranti.

In questo documento di tesi vengono riportate le analisi dell'opera partendo dal progetto preliminare con due ordini di tiranti e verificando i presupposti che hanno portato alla decisione di procedere a redigere una variante progettuale aggiungendo un ulteriore ordine.

Si pone poi l'attenzione su possibili soluzioni e modifiche progettuali proposte mediante la creazione di un modello geotecnico aggiornato e rivisitato sulla base del progetto esecutivo di riferimento.

Infine, si segue nel dettaglio l'evoluzione temporale degli spostamenti e il comportamento reale della berlinese con un focus sulle metodologie di monitoraggio topografiche installate nell'area di interesse.



Figura 1.3 Planimetria berlinese

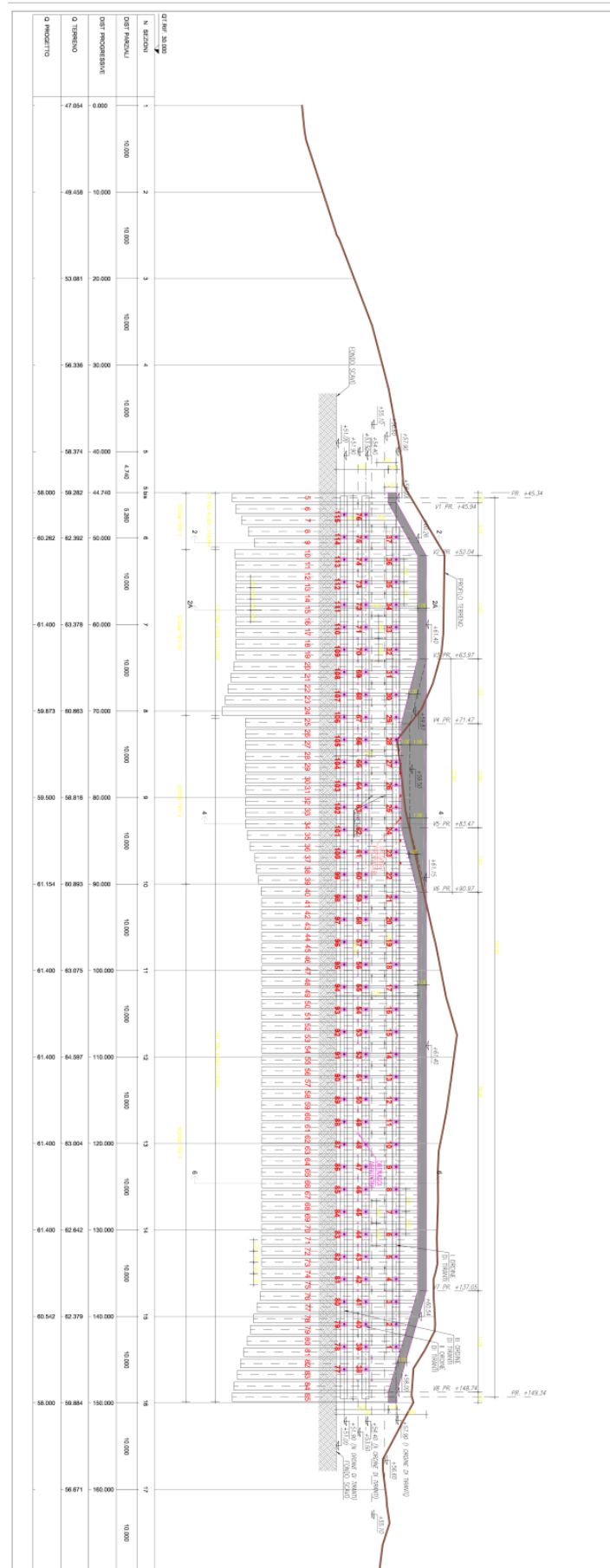


Figura 1.4 Profilo longitudinale berlinese

2. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SITO

2.1 Stato attuale dell'opera

In questo capitolo viene fornita una breve descrizione della paratia e dell'area ospedaliera in relazione ai tre sopralluoghi effettuati dallo scrivente in collaborazione con lo studio di progettazione "RPA" di Perugia nelle date 16/10/2025, 09/12/2015 e 15/06/2026.

In tali giornate la berlinese risulta ormai completamente ultimata come da progetto di variante redatto a cura del prof. Ing. Renato Vitaliani dello studio "Iconia Ingegneria Civile" di Padova. Differisce esclusivamente per quanto riguarda la quota di fondo scavo a valle, che da progetto era fissata alla quota di +50,40 m.s.l.m. Il livello del terreno si trova infatti a circa 40 cm al di sotto del terzo ordine di tiranti, a quota +51,50 m.s.l.m. Inoltre, il progetto inerente al ripristino dei tiranti del terzo ordine 80 e 84 (che non avevano superato il controllo di accettazione) ad opera sempre del prof. Vitaliani, non è stato ancora eseguito causa intervenuta risoluzione contrattuale [4].

Di seguito viene allegata una piccola documentazione fotografica indicativa dell'evoluzione del cantiere durante i tre sopralluoghi citati in precedenza. L'area è stata ispezionata nella sua interezza, controllando sia la zona di competenza della berlinese che quella relativa propriamente alla costruzione della nuova struttura ospedaliera. Nelle Figure 2.1 e 2.2 è rappresentata la paratia con una vista rispettivamente frontale e laterale (più precisamente da sud-est), mentre il dettaglio in Figura 2.3 permette di osservare le componenti strutturali principali.

Nelle tre immagini si nota come la berlinese si trovi a monte dell'area ospedaliera e ad una quota maggiore rispetto ad essa, risultando a tal proposito ben visibili le scarpate dello scavo. Si osservano inoltre i pali in cemento armato, la trave di coronamento e le travi di ripartizione predisposte in corrispondenza dei vari ordini di tiranti. Le relative testate sono protette da capsule che garantiscono la durabilità del sistema di ancoraggio e la protezione dalla corrosione. La visione ravvicinata in dettaglio della berlinese mostra anche gli elementi drenanti, installati per raccogliere e smaltire le acque di infiltrazione provenienti dal versante. Sono infatti presenti i tubi e il rivestimento in geo composito drenanti. Si notano i segni lasciati dal deflusso dell'acqua e la presenza di vegetazione spontanea cresciuta nel tempo.



Figura 2.1 Vista frontale berlinese



Figura 2.2 Vista laterale berlinese da sud-est



Figura 2.3 Dettaglio berlinese dreni e tiranti

L'evoluzione dello stato dei lavori del nuovo ospedale si nota osservando le Figure 2.4, 2.5 e 2.6, rappresentative dell'area di cantiere nei giorni dei sopralluoghi effettuati.

La prima immagine è stata scattata in occasione del primo sopralluogo datato 16/10/25 e mostra una fase iniziale dei lavori. Gli scavi generali risultano eseguiti ed è stato modellato il terreno con le opportune scarpate di contenimento. Il cantiere in questa fase presenta ancora uno sviluppo prevalentemente orizzontale, con la platea di fondazione ben visibile. Da essa emergono numerose armature metalliche destinate alla realizzazione delle componenti verticali della struttura quali setti e pilastri. Sullo sfondo si segnala la presenza di una gru a torre, installata per le attività di movimentazione dei materiali.



Figura 2.4 Area cantiere nuovo ospedale sopralluogo 16/10/25

Un significativo avanzamento dei lavori si riscontra analizzando la seconda immagine relativa al sopralluogo effettuato in data 09/12/25. Sono infatti state realizzate gran parte delle strutture verticali, quali pilastri, setti e pareti in cemento armato, mentre la presenza di numerosi casseri evidenzia l'esecuzione dei getti strutturali in corso. Le pareti perimetrali del livello interrato risultano già in larga misura completate e comincia a delinearsi l'organizzazione interna degli spazi dell'edificio. Il cantiere appare più articolato e densamente occupato da materiali, armature e attrezzature necessarie alla costruzione delle opere in elevazione.



Figura 2.5 Area cantiere nuovo ospedale sopralluogo 09/12/25

La terza immagine è rappresentativa dell'ultimo sopralluogo, eseguito in data 15/01/26. Le strutture verticali appaiono quasi completamente realizzate, con pilastri e pareti che hanno raggiunto le quote progettuali previste. Sono visibili numerose armature sporgenti predisposte per il collegamento con i successivi elementi strutturali e per la realizzazione dei solai superiori. Si osserva inoltre la presenza di una seconda gru a torre, indice di un'intensificazione delle attività di cantiere e della necessità di supportare contemporaneamente più lavorazioni.



Figura 2.6 Area cantiere nuovo ospedale sopralluogo 15/01/26

2.2 Caratterizzazione geologica

La caratterizzazione geologica dell'area interessata dalla berlinese è stata ottenuta mediante l'analisi e l'interpretazione delle varie campagne di indagini geognostiche effettuate nel corso degli anni. Le prime indagini, volte alla progettazione preliminare-definitiva del complesso ospedaliero e delle opere annesse, risalgono agli anni 1989, 1997, 2001, 2011, 2012. La campagna di indagine del 2015 invece è legata alla progettazione esecutiva, mentre negli anni 2017 e 2019 sono state effettuate ulteriori indagini integrative soprattutto con funzione di monitoraggio della paratia appena realizzata.

Le varie campagne di indagini prevedevano sondaggi a carotaggio continuo e prove geotecniche in sito. Dai sondaggi poi venivano estratti campioni sui quali effettuare le varie prove di laboratorio, al fine di ricavare i dati geologico-stratigrafici dell'area di progetto per poi definire il modello geotecnico di riferimento. In Figura 2.7 viene riportata la planimetria con l'ubicazione dei vari sondaggi, affiancata dalla legenda che ne indica l'annata di svolgimento. In questo documento di tesi verranno riportati e approfonditi esclusivamente i sondaggi ricadenti nell'area della paratia o comunque limitrofi, con relative stratigrafie e rilevazioni effettuate. Pertanto, nel seguito di questo capitolo saranno attenzionati i seguenti sondaggi:

- Sondaggio **G₁** campagna indagini **2001**
- Sondaggio **S₁** campagna indagini **2011**
- Sondaggio **S₆** campagna indagini **2012**
- Sondaggi **S_{e2}, S_{e13p}, S_{e1i}, S_{e2i}** campagna indagini **2015**
- Sondaggi **S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_G, S_{Hi}, S_{Hp}, S_I** campagna indagini **2017**
- Sondaggi **S₁, S₂** campagna indagini **2019**

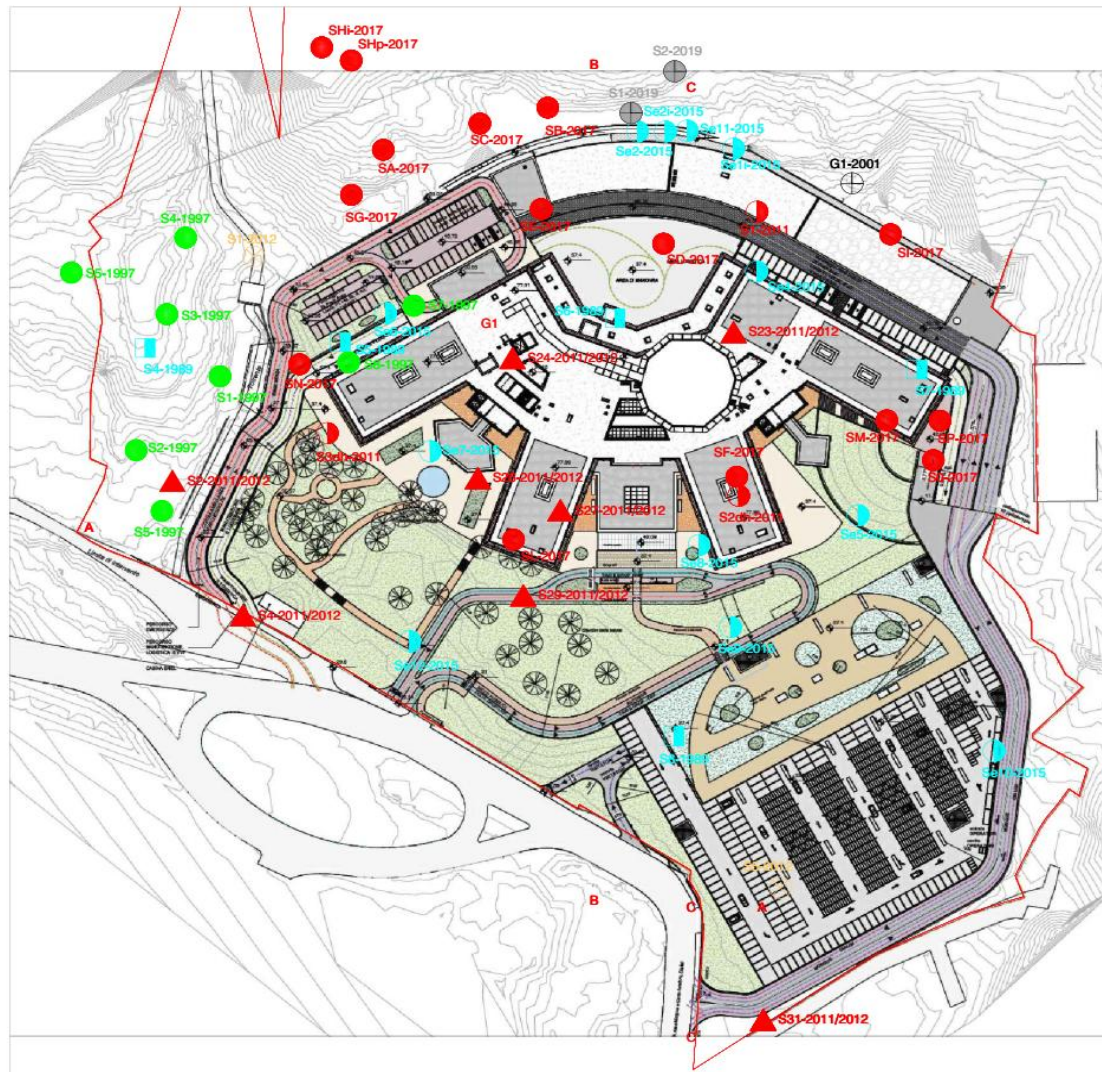
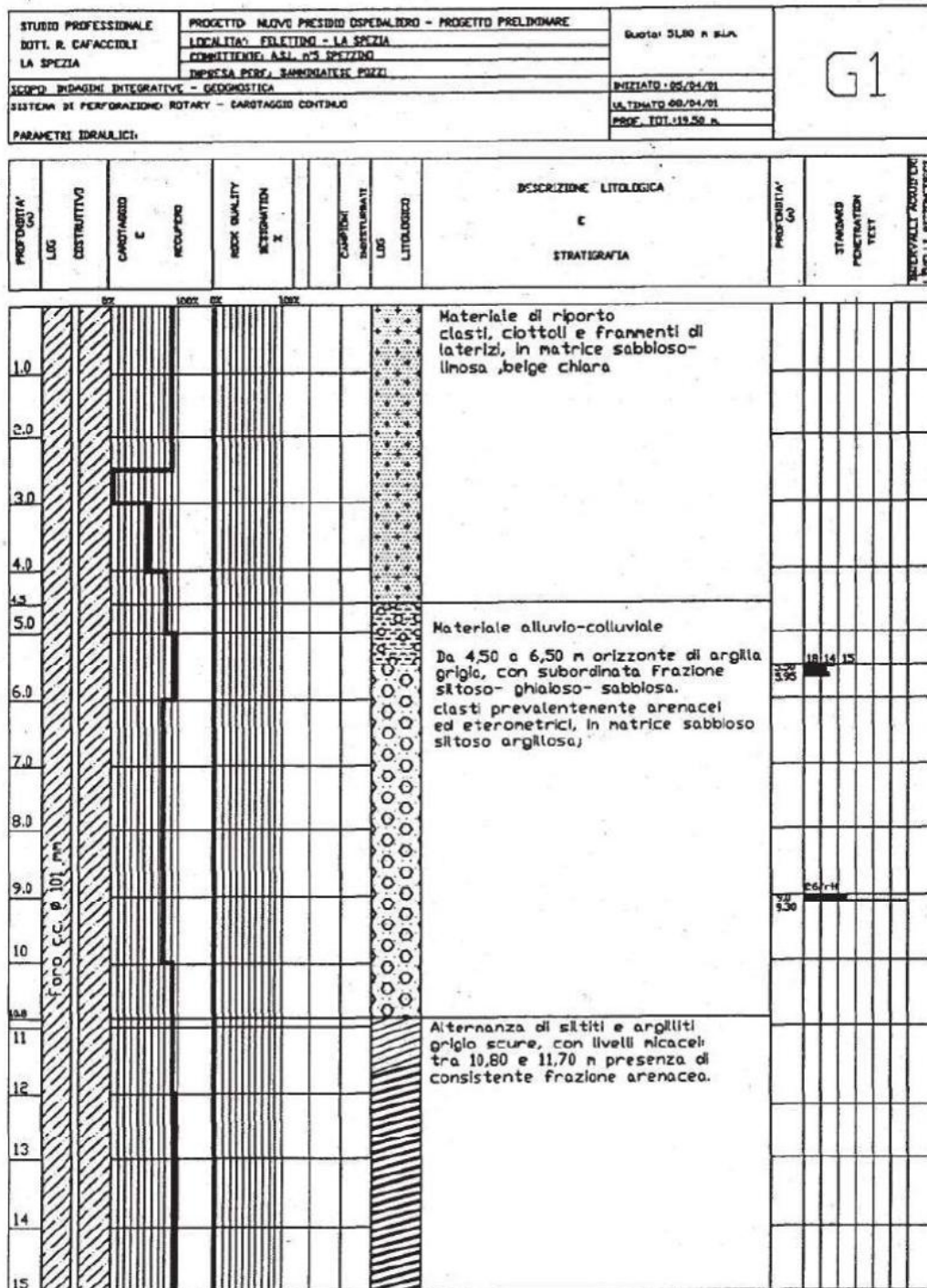
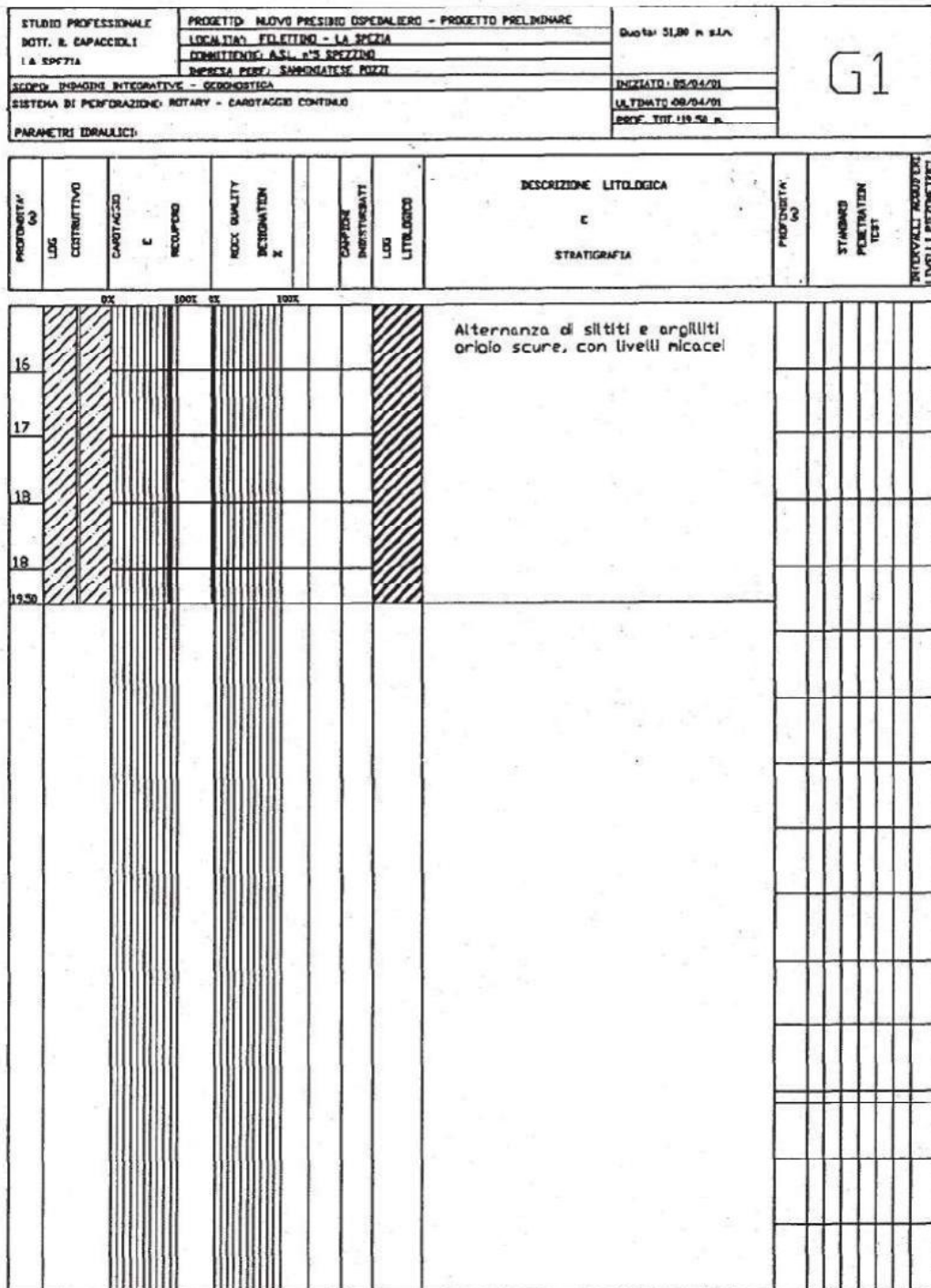


Figura 2.7 Planimetria ubicazione sondaggi e relativa legenda

SONDAGGIO G₁ 2001

L'ubicazione del sondaggio risulta leggermente discostata rispetto all'area in cui è stata successivamente realizzata la paratia. Tuttavia, esso interessa un settore di terreno limitrofo posto a est dell'opera, a una quota sostanzialmente coincidente con quella del fondo scavo della berlinese. Per questo motivo viene considerato rappresentativo delle condizioni geotecniche del sito indagato. Sono state eseguite anche delle prove SPT in foro a diverse profondità. La stratigrafia ricostruita sulla base delle indagini proprie del sondaggio in questione viene allegata in Figura 2.8.



Figura 2.8 Sondaggio G₁

SONDAGGIO S₁ 2011

Si trova a valle rispetto alla berlinese, in prossimità dell'area adibita da progetto ai locali tecnici. Si tratta di un sondaggio a carotaggio continuo di profondità pari a 30 m, attrezzato con piezometro a tubo aperto. La stratigrafia relativa al sondaggio in esame è riportata in Figura 2.9. Sono state inoltre eseguite prove SPT in foro e prelevati campioni sia di terra che rocciosi sui quali sono state eseguite le prove di laboratorio (Figura 2.10).

Committente POLITECNICA		Profondità raggiunta 30m	Quota Ass. P.C. S1	Pagina 1/1						
Operatore IGETECMA SAS		Indagine PROGETTO PRELIMINARE	Carbone OSPEDALE FELETTINO		Inizio/Fine Esecuzione 17-01-2011/18-01-2011					
Responsabile P. ACCOLTI GIL		Sondaggio S1	Tipo Carotaggio CONTINUO							
Quota Scavi	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T. (n° Colpi)	Campioni	Metodo Peforazione	Cost. Carotaggio	Falda	NOTE
1		terreno di riporto e/o rimaneggiato: sabbia limosa con laterizi ed elementi litoidi eterometrici, colore marrone giallastro scuro (10YR4/4)		%C=100						
2		sabbia e sabbia limosa con elementi litoidi (20% circa) arenacei molto alterati, colore marrone grigiastro (10YR5/2)	1.30	%C=100	23-27-50 3.50 PA	3.50 3.70				1.60 1.10
3										
4		sabbia e sabbia limosa con elementi litoidi da 25 a 150mm in percentuale da 40% a 70%, colore grigio scuro bluastro e grigio verdastro (5B4/1 e 5B6/1), tra 8,70 e 9,10 colore grigio molto scuro (10YR3/2); presenza di s.o. poco decomposta alla profondità di circa 5,50m	4.15		23-29-45 6.00 PA	5.50 6.00			S1/C1 5.00	
5										
6										
7										
8										
9						18-27-48 9.00 PA				
10					%C=100					S1/C2 10.00
11						20-32-40 12.00 PA	10.50 11.00			
12										
13						24-28-39 15.00 PA				S1/C3 15.00
14										
15										
16				16.30						
17		flysh molto alterato: alternanza di siltiti/argilliti scagliettate e areniti fini alterate e fratturate di colore grigio verdastro		%C=100						RQD NON MISURABILE 16.82
18										
19										
20									S1/C4 20.00	
21										
22										
23										
24										
25									S1/C5 25.00	
26										
26		arenarie fini e molto fini, fratturate, colore grigio scuro	25.80				(CS) 25.80			
27				%C=100						QUOTA FONDO PIEZOMETRO 27.00
28										
29										
30			30.00				(CD) 30.00	S1/C6 30.00		
31										
32										

Figura 2.9 Sondaggio S₁ stratigrafia

SONDAGGIO	QUOTA P.C. m.s.l.m.	PROF. m. da p.c.	SPT/PROF. m. da p.c.	CAMPIONI/PROF. m. da p.c.	TIPO	CONDIZ.
S1	51,00	30,00	SPT1 - 3,50 SPT2 - 6,00 SPT3 - 9,00 SPT4 - 12,00 SPT5 - 15,00	S1Cr1 3,50-3,70	T	piezometro TA
				S1C2 5,50-6,00	T	
				S1Cr3 10,50-11,00	T	
S2	45,50	40,00m	SPT1 - 3,00 SPT2 - 11,50 SPT3 - 15,50	S2C1 20,50-20,80	R	tubo DH
				S2C2 27,10-27,30	R	
				S2C3 28,00-28,20	R	
S3	45,60	40,00	SPT1 - 3,50 SPT2 - 6,00 SPT3 - 9,00 SPT4 - 12,00 SPT5 - 15,00	S3Cr1 3,00-3,30	T	tubo DH
				S3Cr1 BIS 10,00-10,50	T/R	
				S3C2 21,20-21,50	R	
				S3C3A 21,50-21,70	R	
				S3C3B 23,00-23,20	R	
				S3C4 27,70-27,80	R	
				S3C5 29,00-29,15	R	

T=terra; R=roccia; r=rimaneggiato

N. CAMPIONE	PROFONDITA' m. da p.c.	GRANULOMETRIA	LIMITI DI ATTERBERG	PESO SPECIFICO DEI GRANI	PESO DI VOLUME	TAGLIO DIRETTO	COMPRESSIONE UNIASSIALE	POINT LOAD	SCLEROMETRO
S1C1 r	3,50-3,70								
S1C2 r	5,50-6,00								
S1C3 r	10,50-11,00								
S2C1	20,50-20,80								
S2C2	27,10-27,30								
S2C3	28,00-28,20								
S3C1 r	3,00-3,30								
S3C1 BIS	10,00-10,50								
S3C2	21,20-21,50								
S3C3A	21,50-21,70								
S3C3B	23,00-23,20								
S3C4	27,70-27,80								
S3C5	29,00-29,15								

Figura 2.10 Prove laboratorio 2011 con focus sondaggio S₁

SONDAGGIO S₆ 2012

Il sondaggio è posizionato al di fuori dell'area della paratia ma risulta comunque influente nei confronti del terreno a monte della stessa. Situato ad ovest dell'opera, è condizionato con piezometro a tubo aperto e caratterizzato da una profondità di 20 m. Sono state eseguite inoltre prove SPT in foro. La relativa stratigrafia è riportata in Figura 2.11.

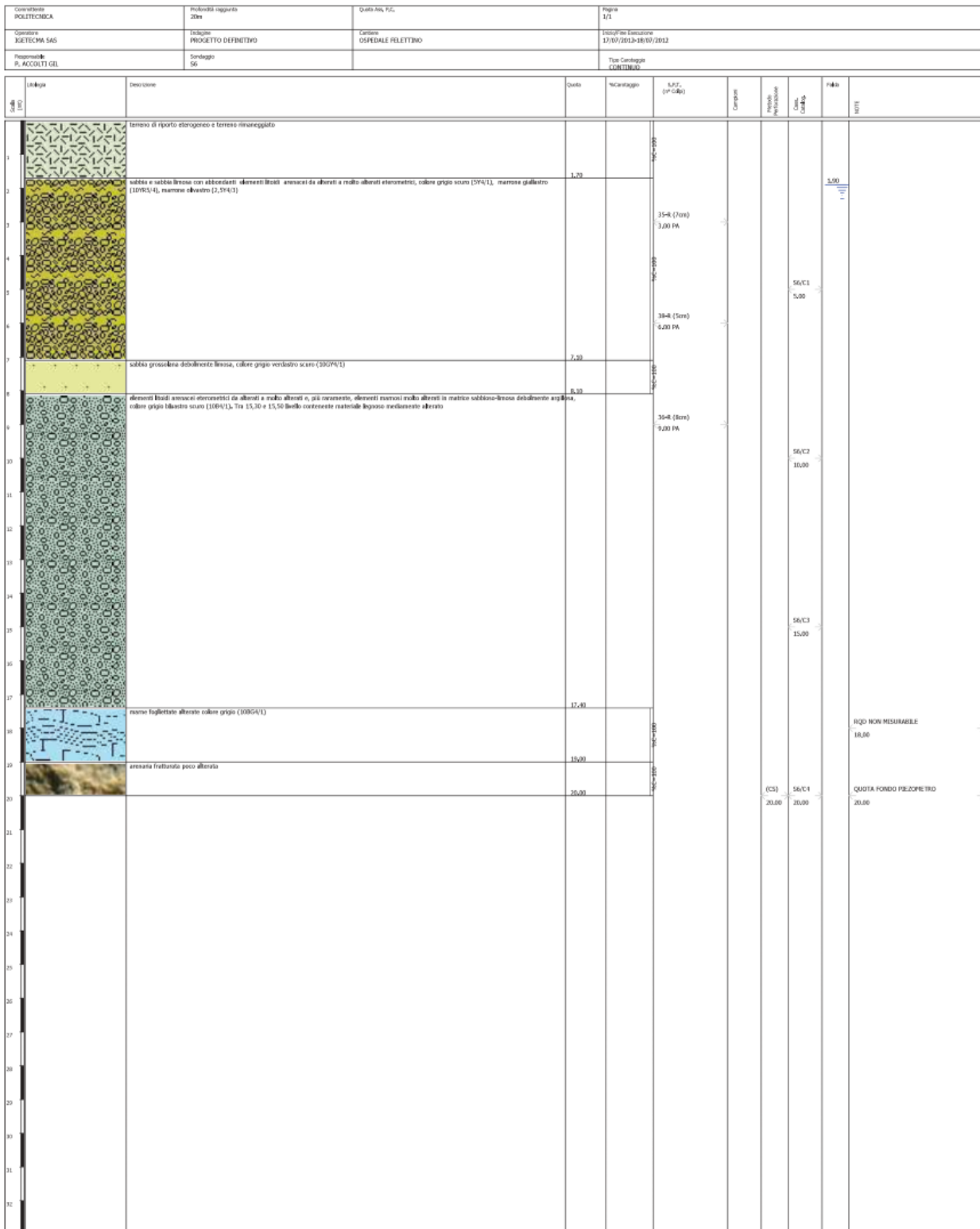


Figura 2.11 Sondaggio S₆ 2012

SONDAGGIO S_{e2} 2015

Realizzato lungo l'allineamento della paratia, fa parte dei sondaggi volti alla progettazione esecutiva dell'opera. Si tratta di un sondaggio a carotaggio continuo di profondità 35 m e attrezzato con piezometro di Casagrande a doppia cella, la cui stratigrafia è indicata in Figura 2.12. Sono state svolte prove SPT in foro, pressiometriche, dilatometriche e di permeabilità Lefranc e Lugeon. Inoltre, sono stati prelevati campioni per le prove di laboratorio evidenziate in Figura. 2.13.

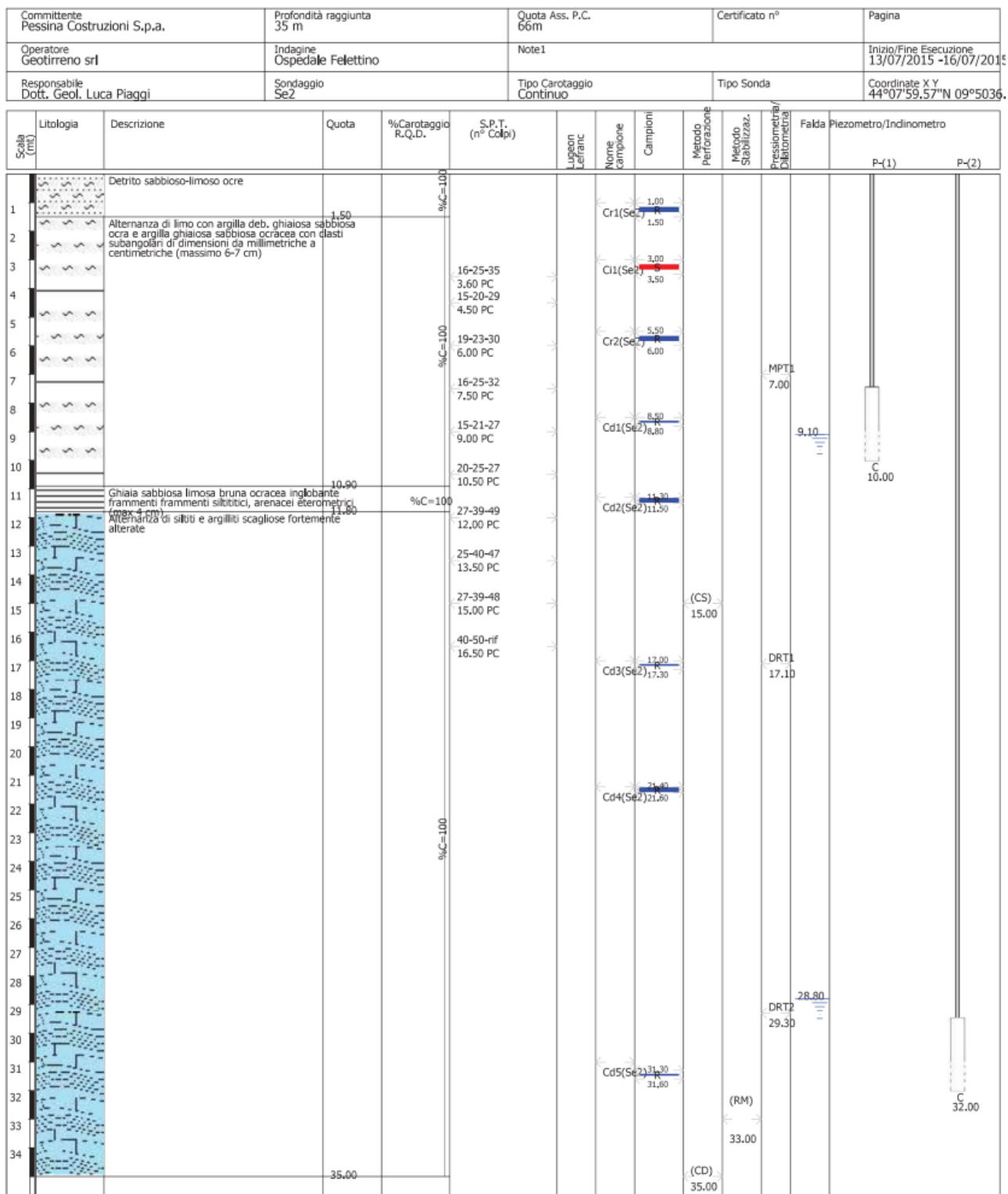


Figura 2.12 Sondaggio S_{e2}

N. CAMPIONE	PROFONDITA' MEDIA m. da p.c.	GRANULOMETRIA	w _n	ATTERBERG	γ_n	γ_d	γ_s	TAGLIO DIRETTO	ELL	TxCU	COMPRESSIONE UNIASSIALE	POINT LOAD	SCLEROMETRO
Se2 Ci1	3,25												
Se2 Cd1	8,65												
Se2 Cd2	11,40												
Se2 Cd3	17,15												
Se2 Cd4	21,50												
Se2 Cd5	31,45												
Se2 Cr1	1,20												
Se2 Cr2	5,60												

Figura 2.13 Prove laboratorio sondaggio S_{e2}

I sondaggi S_{e1} e S_{e2} sono stati realizzati mediante perforazione a distruzione di nucleo. Sono situati in zona paratia, laddove sono riscontrate le maggiori altezze di scavo e lo spessore della coltre superficiale è maggiormente rilevante. Sono caratterizzati da una profondità di 30 m ed attrezzati con inclinometri, al fine di monitorare eventuali spostamenti dell'opera. Il sondaggio S_{e13p} ricade nei pressi dei due sopra citati ed è attrezzato con un piezometro a tubo aperto.

SONDAGGIO S_A 2017

Ubicato a monte della paratia, leggermente al di fuori della sua area di impronta in direzione ovest. Ha una profondità complessiva di 30 m ed è stato condizionato con un piezometro a tubo aperto. La stratigrafia rilevata è riportata in Figura 2.14.

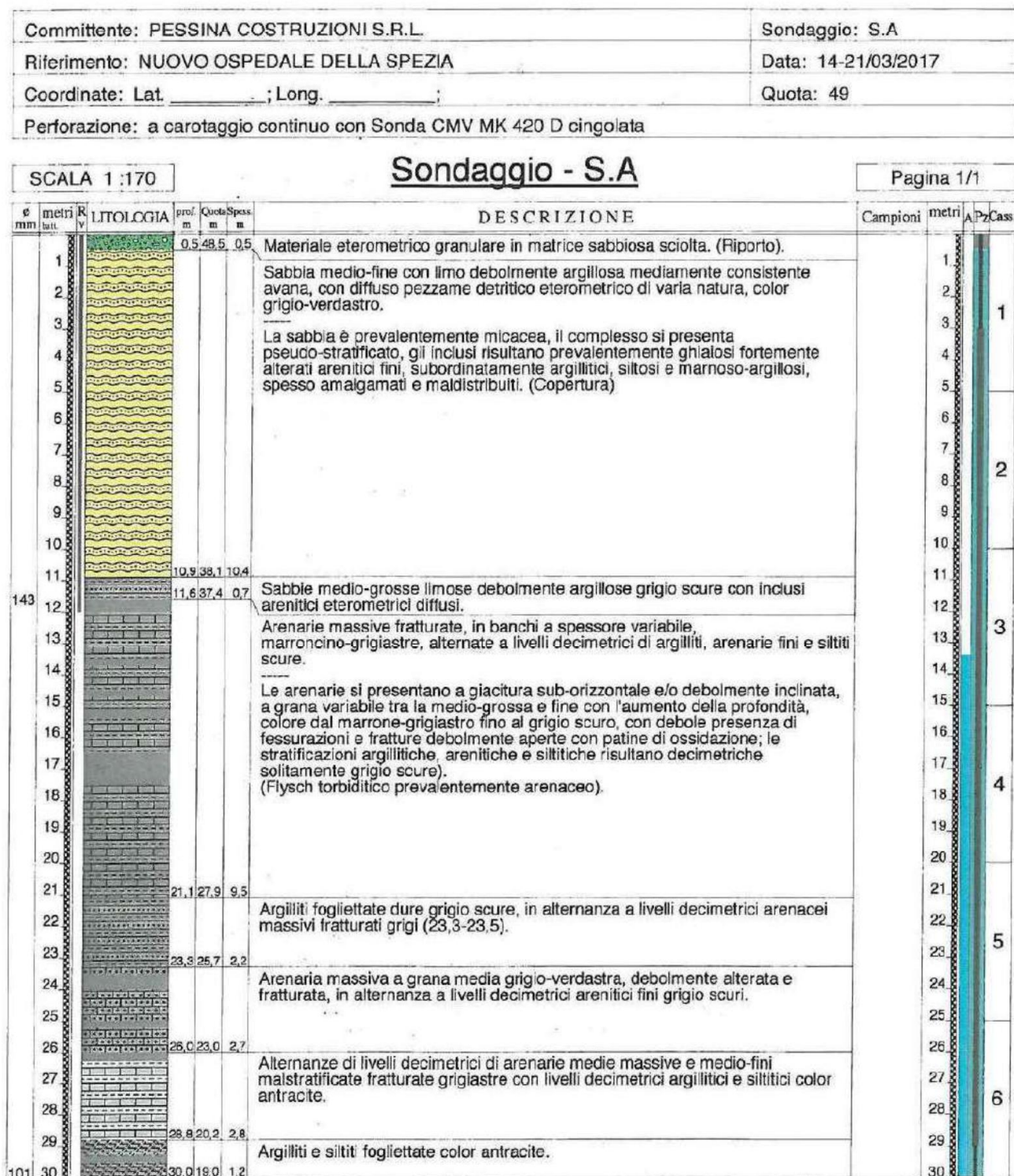


Figura 2.14 Sondaggio S_A 2017

SONDAGGIO S_B 2017

Situato a monte della paratia in posizione centrale rispetto ad essa, ha una profondità di 30 m ed è condizionato con piezometro a tubo aperto. La stratigrafia è riportata in Figura 2.15.

Committente: PESSINA COSTRUZIONI S.R.L.	Sondaggio: S.B
Riferimento: NUOVO OSPEDALE	Data: 07-14/03/2017
Coordinate: Lat. _____; Long. _____;	Quota: 50
Perforazione: a carotaggio continuo con Sonda CMV MK 420 D cingolata	

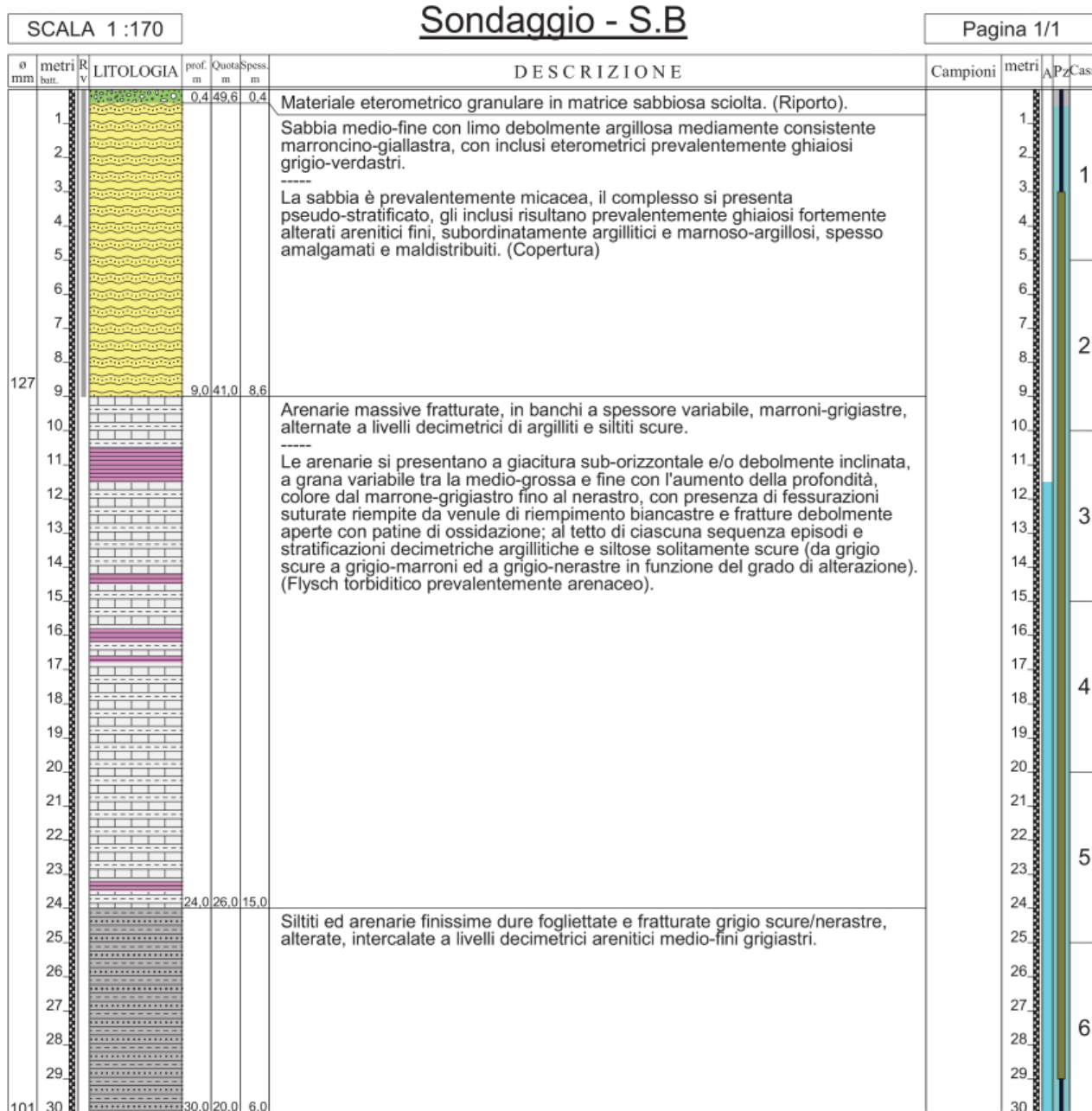


Figura 2.15 Sondaggio S_B 2017

SONDAGGIO S_C 2017

Si trova in direzione ovest a monte della paratia, ha una profondità di 30 m ed è attrezzato con piezometro a tubo aperto. La stratigrafia è riportata in Figura 2.16.

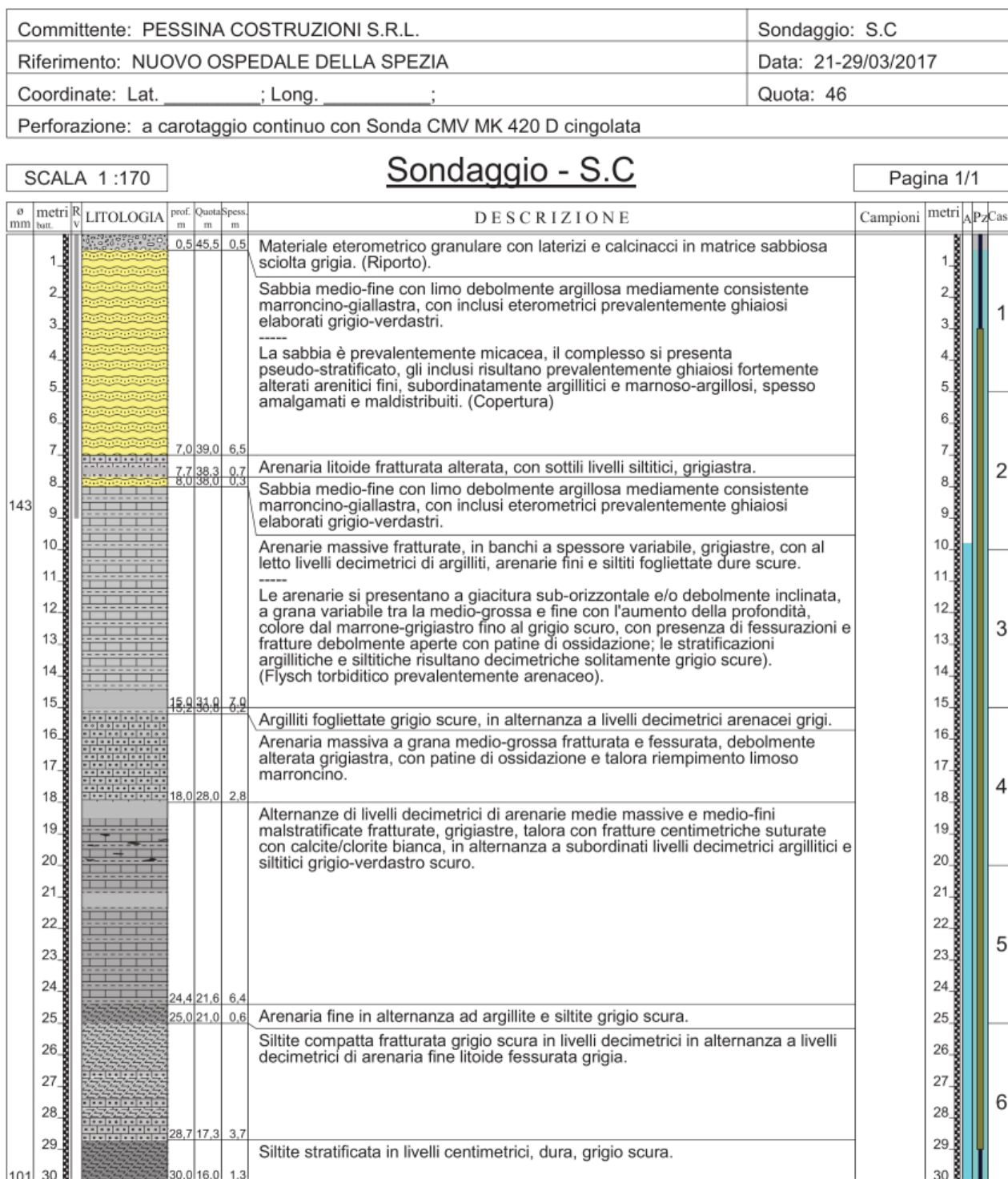


Figura 2.16 Sondaggio S_C 2017

SONDAGGIO S_D 2017

Posizionato a valle della paratia, nei pressi dell'area adibita alla costruzione dell'edificio ospedaliero. Copre una profondità di 30 m e la sua stratigrafia è riportata in Figura 2.17.

Committente: PESSINA COSTRUZIONI S.P.A.	Sondaggio: S.D
Riferimento: NUOVO OSPEDALE DELLA SPEZIA	Data: 30/03 - 06/04/2017
Coordinate: Lat. _____ ; Long. _____ ;	Quota: 58
Perforazione: a carotaggio continuo con Sonda CMV MK 420 D cingolata	

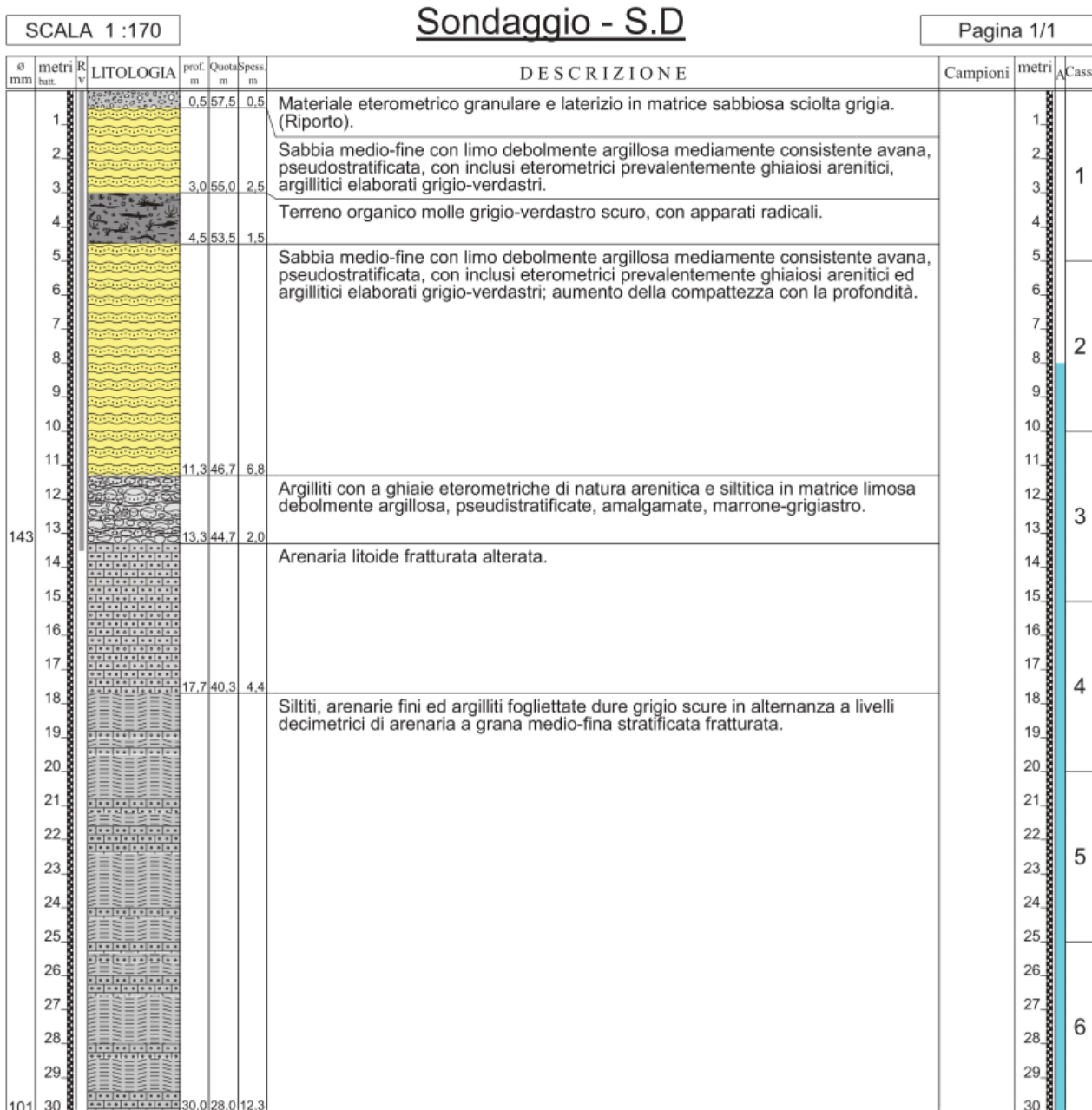


Figura 2.17 Sondaggio S_D 2017

SONDAGGIO S_E 2017

Localizzato a valle della paratia, in prossimità dell'area adibita alla costruzione del polo tecnico. Caratterizzato da una profondità di 30 m, la sua stratigrafia è riportata in Figura 2.18.

Committente: PESSINA COSTRUZIONI S.P.A.	Sondaggio: S.E
Riferimento: NUOVO OSPEDALE DELLA SPEZIA	Data: 09-12/04/2017
Coordinate: Lat. _____; Long. _____;	Quota: 57,54
Perforazione: a carotaggio continuo con Sonda CMV MK 420 D cingolata	

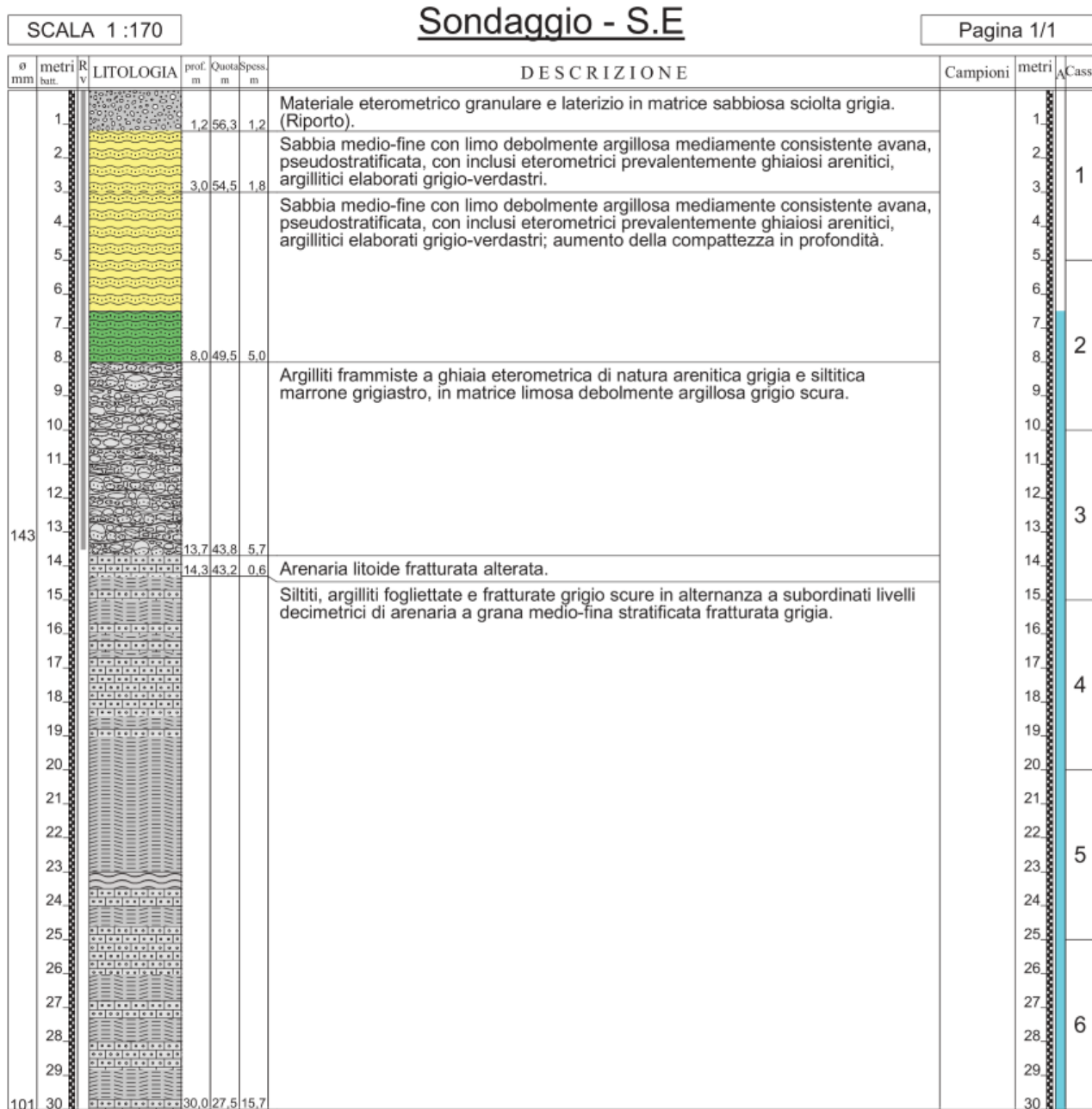


Figura 2.18 Sondaggio S_E 2017

SONDAGGIO S_G 2017

Si trova ad ovest della paratia, nei pressi dell'ubicazione del sondaggio S_A. Il sondaggio permette le indagini fino a una profondità di 30 m e la sua stratigrafia è riportata in Figura 2.19.

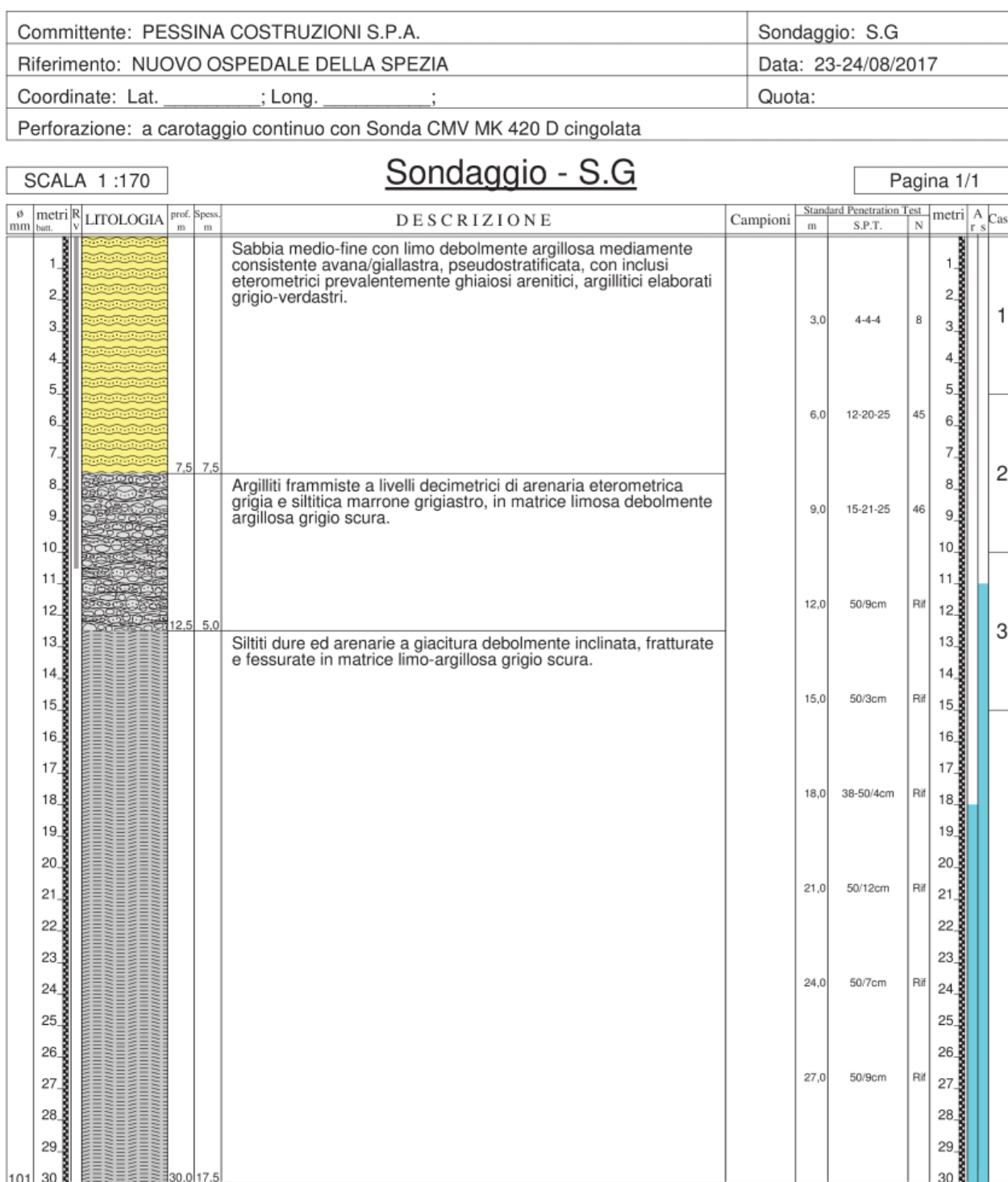


Figura 2.19 Sondaggio S_G 2017

SONDAGGI S_{Hi} e S_{Hp} 2017

Sono entrambi localizzati a monte dell'area interessata dalla paratia. Il sondaggio S_{Hi} è stato realizzato mediante perforazione a carotaggio continuo (diversamente da quello S_{Hp}) per una profondità di 30 m ed attrezzato con tubo inclinometrico. La sua stratigrafia è riportata in Figura 2.20. Il sondaggio S_{Hp} copre una profondità di 20 m ed è condizionato con un piezometro a tubo aperto. Tuttavia, di questo sondaggio non si dispone della documentazione tecnica relativa alla stratigrafia rilevata.

Committente: PESSINA COSTRUZIONI S.P.A.	Sondaggio: S.Hi
Riferimento: NUOVO OSPEDALE DELLA SPEZIA	Data: 30-31/08/2017
Coordinate: Lat. _____; Long. _____;	Quota: 69,04
Perforazione: a carotaggio continuo con Sonda CMV MK 420 D cingolata	

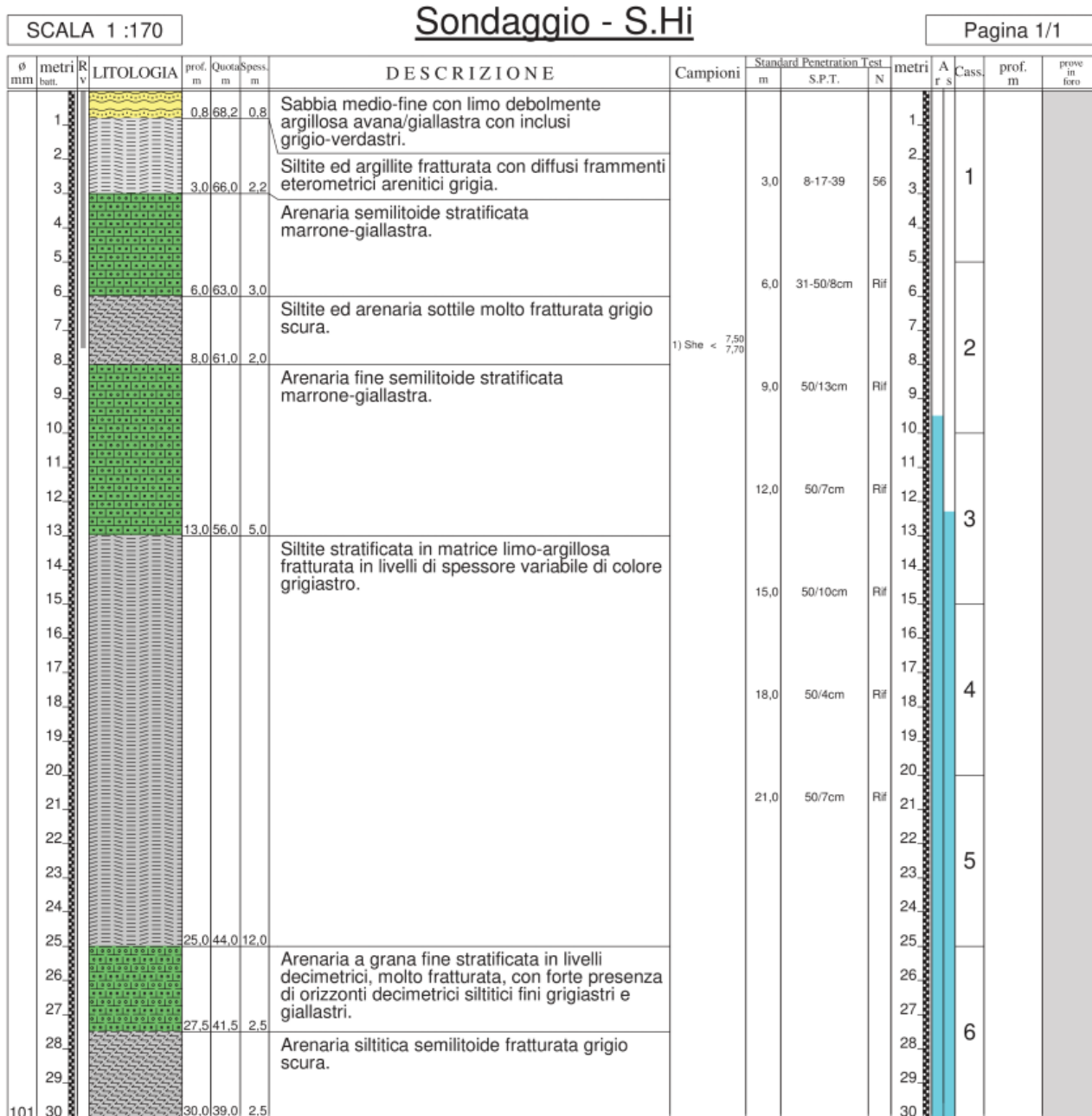


Figura 2.20 Sondaggio S_{Hi} 2017

SONDAGGIO S_I 2017

Localizzato in direzione est della paratia al limite della zona di interesse, nei pressi dell'ubicazione del sondaggio G₁. Caratterizzato da una profondità di 15 m, la sua stratigrafia è riportata in Figura 2.21.

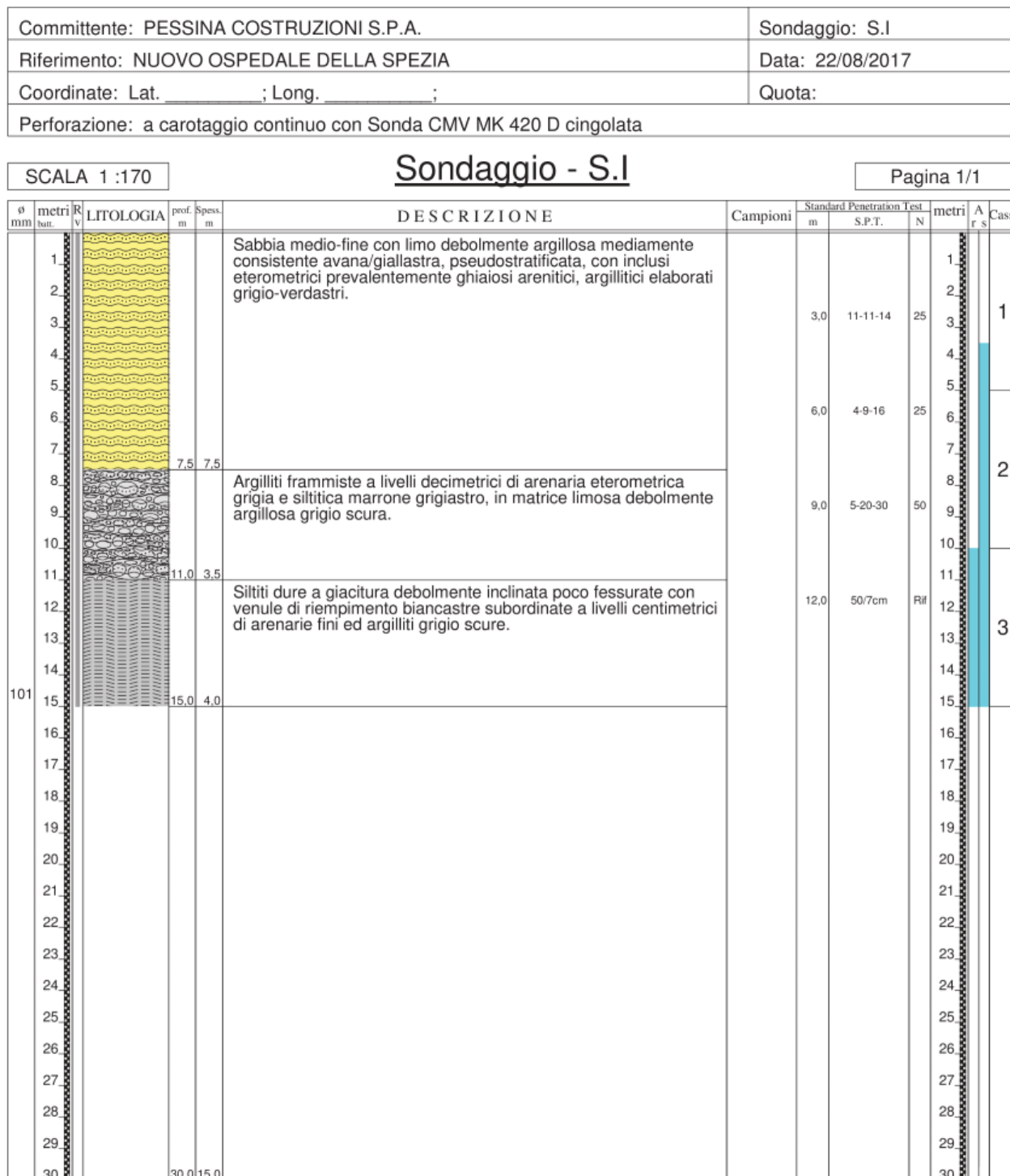


Figura 2.21 Sondaggio S_I 2017

SONDAGGIO S₁ 2019

Ubicato in posizione centrale a monte della berlinese, copre una profondità di 25 m. Realizzato con la funzione indagare e monitorare in maniera approfondita il comportamento della paratia, è stato attrezzato con un tubo inclinometrico. Sono stati prelevati inoltre campioni di terreno rimaneggiato poi sottoposti alle prove di laboratorio. La sua stratigrafia è riportata in Figura 2.22.

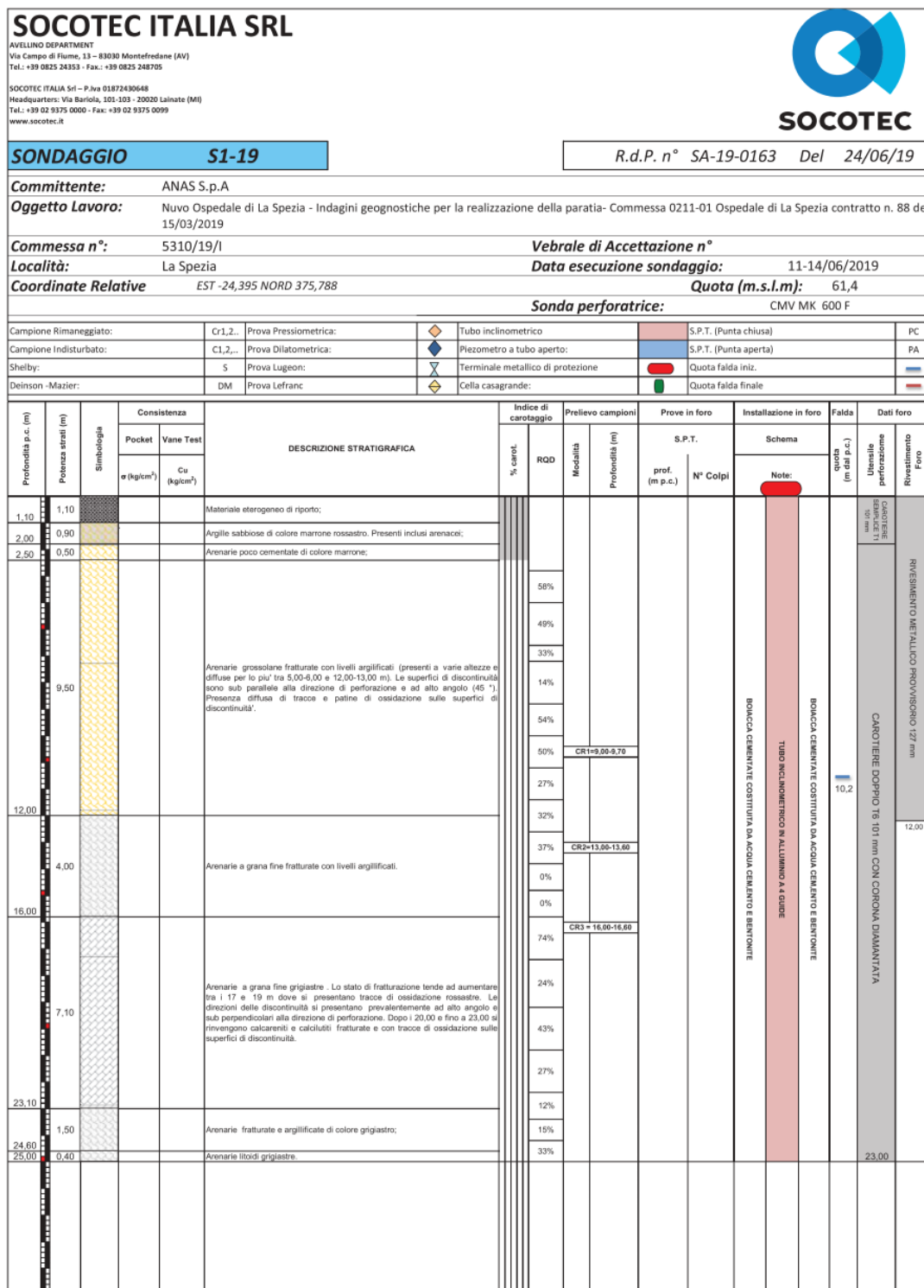


Figura 2.22. Sondaggio S₁ 2019

SONDAGGIO S₂ 2019

Situato in direzione ovest a monte della paratia, copre una profondità di 26 m. Allo stesso modo del precedente è condizionato con tubo inclinometrico ed è stata eseguita una prova SPT in foro. Inoltre, sono stati prelevati campioni di terreno rimaneggiato poi sottoposti alle prove di laboratorio. La sua stratigrafia è riportata in Figura 2.23, mentre le prove relative ai campioni di entrambi i sondaggi sono evidenziate nella tabella di Figura 2.24.

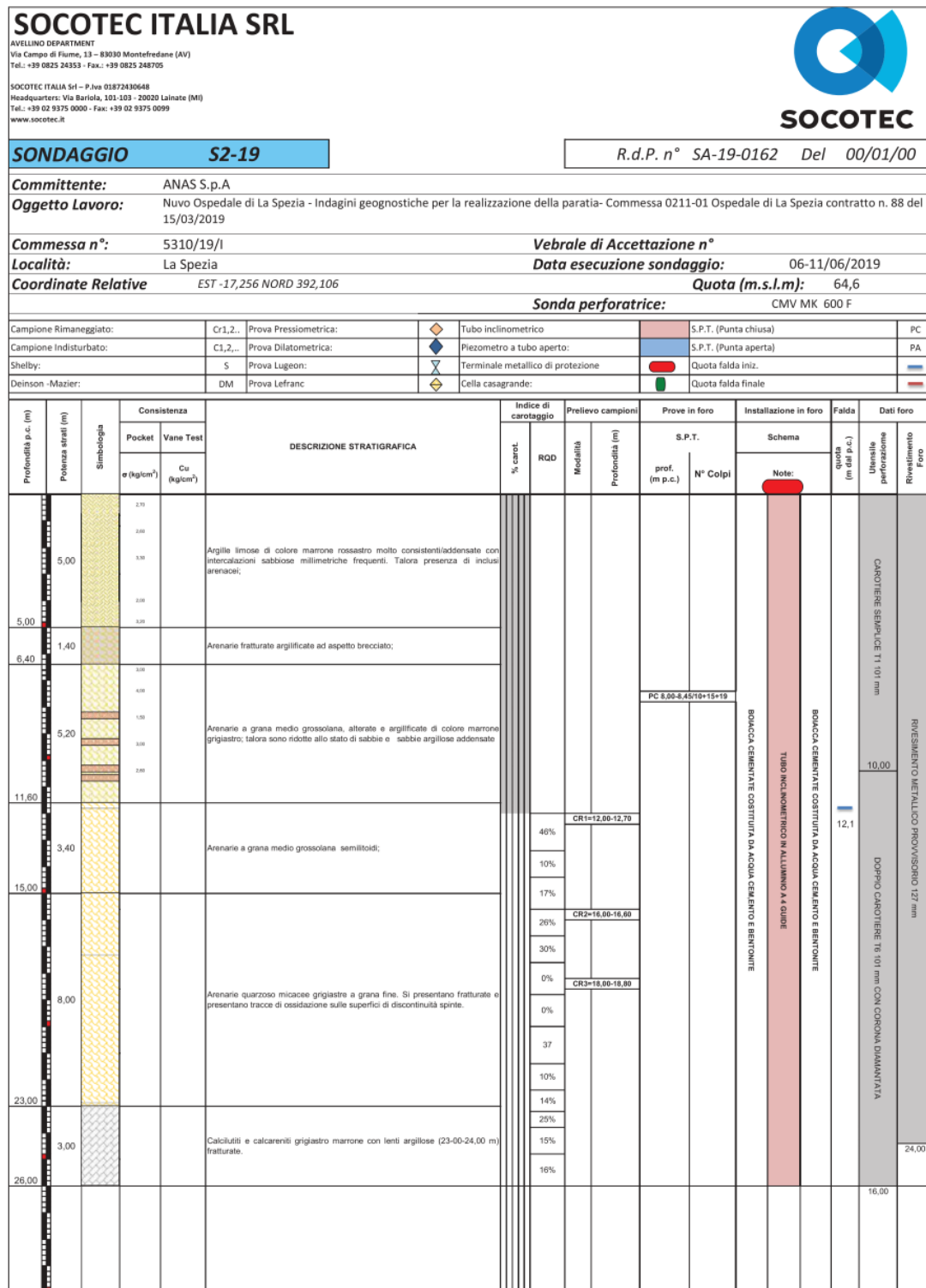


Figura 2.23 Sondaggio S₂ 2019

N. CAMPIONE	PROFONDITA' MEDIA m. da p.c.	GRANULOMETRIA	WIR	ATTERBERG	γ_m	γ_d	γ_s	TAGLIO DIRETTO	ELL	TxCU	COMPRESSIONE UNIASSIALE	POINT LOAD	SCLEROMETRO	TAGLIO SU ROCCIA
S1-19/C1	9,35													
S1-19/C2	13,30													
S1-19/C3	16,30													
S2-19/C1	12,25													
S2-19/C2	16,30													
S2-19/C3	18,40													

Figura 2.24 Prove laboratorio campagna indagini 2019

L'interpretazione dei dati ricavati dai sondaggi [5] e delle relative stratigrafie permette di definire un assetto geologico-stratigrafico proprio dell'area interessata dalla berlinese. A tal fine si segnala che le indagini geognostiche, sono state integrate negli anni anche da indagini di tipo geofisico mediante stendimenti sismici a rifrazione.

In particolare, per la zona di interesse della paratia, risultano significative le quattro sezioni sismiche tomografiche nell'ambito della campagna di indagini del 2012. Come si può vedere dalla Figura 2.25, una sezione taglia la paratia secondo il suo allineamento e quindi in direzione longitudinale al proprio asse, mentre le restanti sono trasversali. Queste tipologie di indagini sono state rilevanti al fine di individuare la velocità sismiche delle onde di compressione V_p e di taglio V_s , variabili in funzione della profondità del sottosuolo. Questo parametro, unito alle stratigrafie rilevate dai sondaggi e alle prove in sito e di laboratorio, ha permesso di individuare delle discontinuità litologiche e quindi di definire con una precisione maggiore un modello geologico nella sua interezza. Le sezioni sismiche tomografiche riportate nelle Figure 2.26, 2.27, 2.28 e 2.29, mostrano i relativi gradienti di V_p e V_s ricavati dalle indagini effettuate.

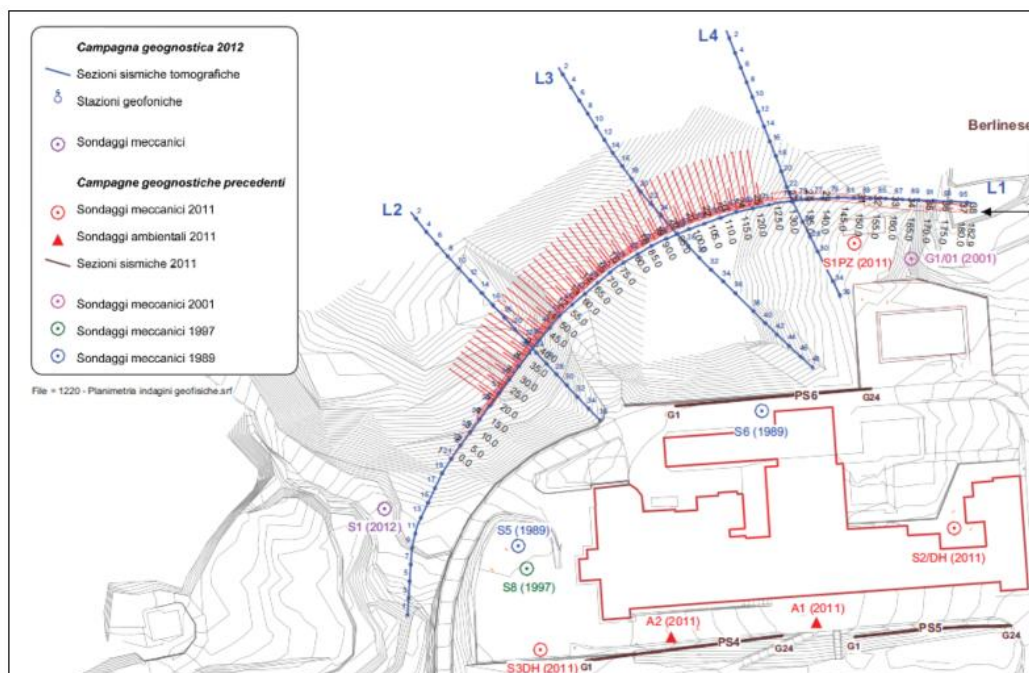


Figura 2.25 Indagini geofisiche 2011-2012 con focus su area berlinese

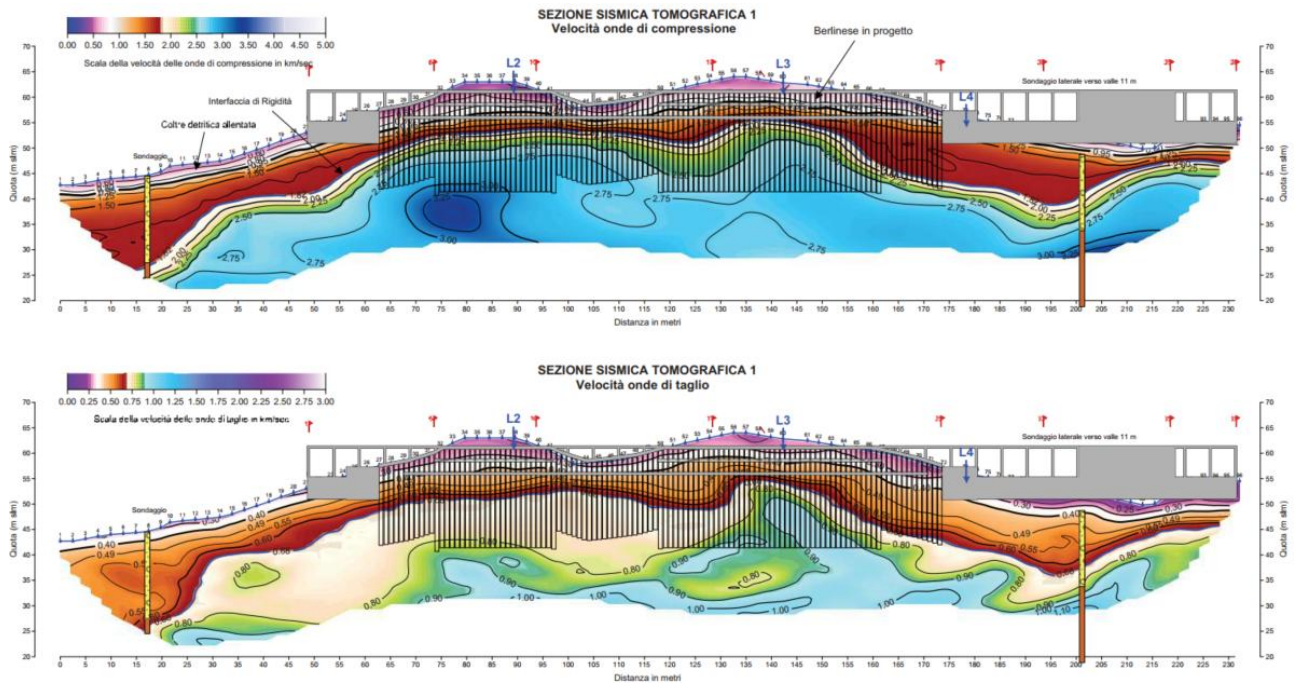


Figura 2.26 Sezione sismica tomografica L1 con rappresentazione gradienti V_p e V_s

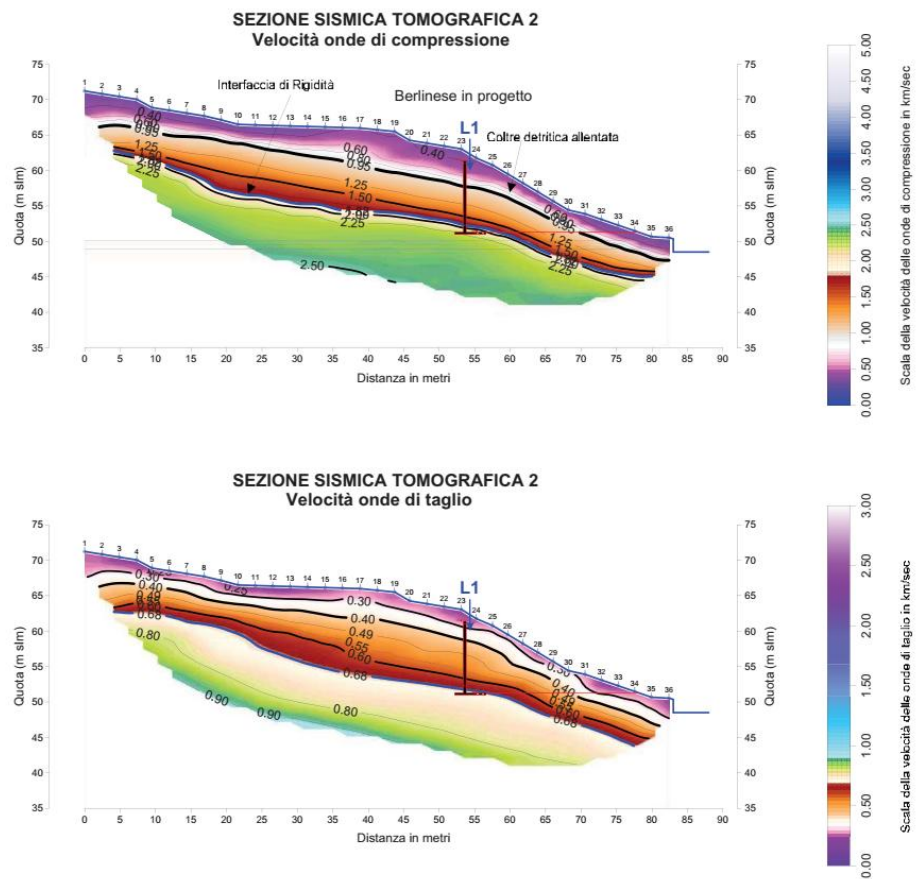


Figura 2.27 Sezione sismica tomografica L2 con rappresentazione gradienti V_p e V_s

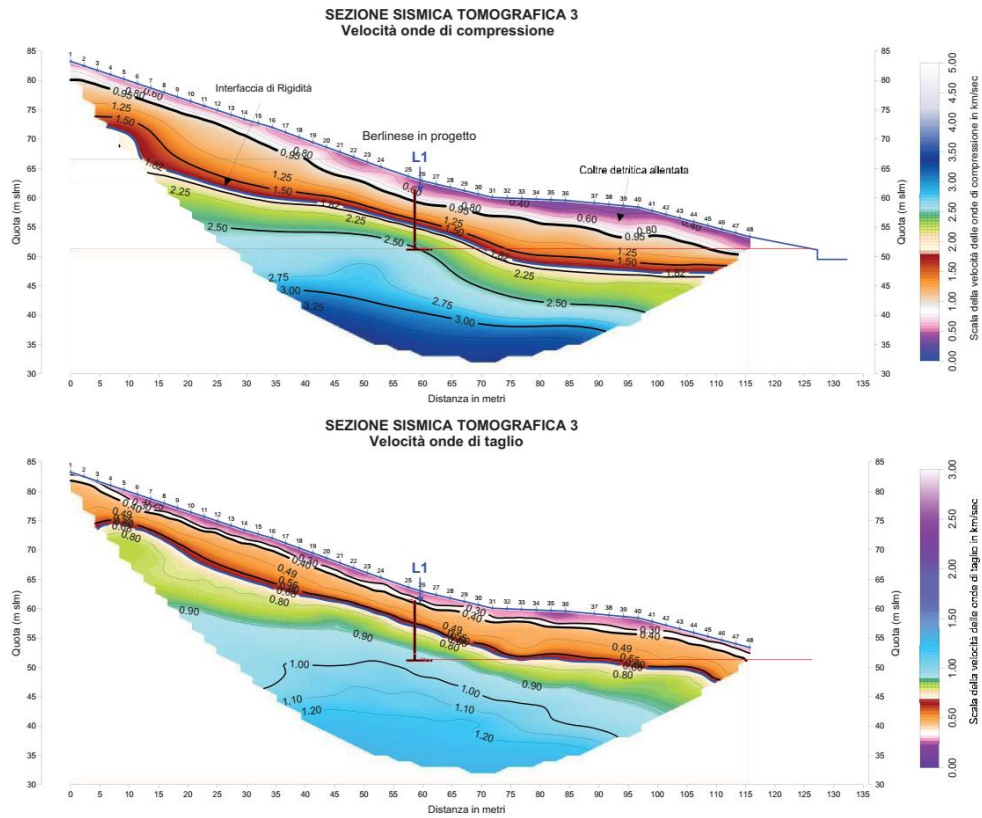


Figura 2.28 Sezione sismica tomografica L3 con rappresentazione gradienti V_p e V_s

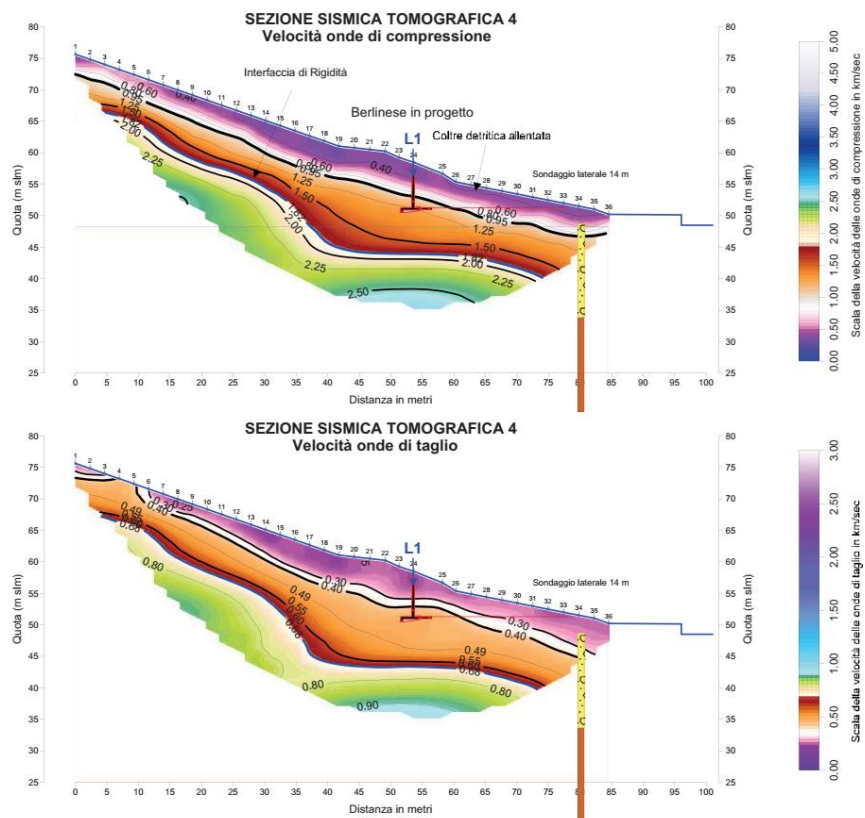


Figura 2.29 Sezione sismica tomografica L4 con rappresentazione gradienti V_p e V_s

Gli strati più superficiali sono caratterizzati da depositi di copertura di origine eluvio-colluviale e alluvio-colluviale di conoide aventi spessori variabili e granulometria eterogenea. Al di sotto si trova un substrato roccioso con caratteristiche variabili in funzione della profondità, costituito per la maggior parte da torbiditi argillitico-siltitiche con alternanza di zone siltitiche o siltitico-arenacee. La coltre superficiale di copertura e l'ammasso roccioso in profondità sono stati ulteriormente suddivisi a loro volta arrivando così alla definizione di un assetto geologico definitivo basato sui seguenti quattro strati [6] [7] [8]:

- **Unità Cs**

Viene nominata in questo modo la porzione di terreno più superficiale appartenente alla coltre di depositi citata in precedenza. La granulometria del terreno si presenta abbastanza eterogenea con alternanza di strati sabbioso limosi, limo-sabbiosi e limo-argillosi debolmente ghiaiosi. Nel complesso dalle prove effettuate risulta una presenza diffusa di frazione fine oltre a quella di materiale incoerente. Dal punto di vista delle proprietà caratteristiche dello strato, sulla base delle prove in sito e di laboratorio effettuate risulta un grado di addensamento alquanto modesto. Questo è confermato anche dalle indagini geofisiche che individuano per questo strato valori di velocità delle onde di taglio non elevati.

- **Unità Ci**

Caratterizza la porzione inferiore del deposito superficiale di copertura, presenta caratteristiche granulometriche eterogenee e sostanzialmente simili a quelle dell'unità Cs. Tuttavia, si differenzia per un maggiore grado di addensamento, che passa da un valore medio in alcune zone ad uno alto in prossimità di altre. Per questo motivo risulta migliore dal punto di vista geotecnico dello strato superiore

- **Unità Salt**

Rappresentativo della porzione superiore del substrato roccioso, presenta un grado di alterazione e fratturazione elevato. La prevalenza di litofacies argillitiche con alternanza di torbiditi calcareo-marnose e siltoso-arenacee, unito al grado di fratturazione rilevante permettono di attribuire a questo strato proprietà geomeccaniche non ottimali. Questo si riscontra anche nell'analisi dei valori di RQD ottenuti dalle prove sui campioni rocciosi estratti disponibili, i quali presentano valori assai modesti. Lo strato si può definire come flyschoidale molto alterato.

- **Unità Sas**

Viene classificata così la parte inferiore dell'ammasso roccioso in profondità. Presenta caratteristiche litologiche analoghe a quelle dello strato superiore, ma nel complesso risulta migliore dal punto di vista geotecnico. Le prove effettuate sui campioni a queste profondità hanno infatti evidenziato valori di compattezza e litificazione migliori. I valori di colpi restituiti dalle prove SPT in foro hanno infatti evidenziato la tendenza ad aumentare con la profondità all'interno del substrato. La discontinuità tra i due strati dell'ammasso roccioso è stata individuata integrando anche le analisi relative alla variazione della velocità delle onde di taglio e di compressione provenienti dalle indagini sismiche. Questa unità è caratterizzata da valori maggiori rispetto all'unità Salt, rispettivamente pari a $V_s = 800 \div 900 \text{ m/s}$ e $V_p = 2700 \div 3200 \text{ m/s}$

2.2.1 Geomorfologia

L'area di progetto del nuovo ospedale e delle relative opere di sostegno poste a monte è situata nella porzione inferiore del versante collinare e montuoso che delimita (verso nord e nord-ovest) la piana della Spezia, in località Felettino.

Il versante presenta pendenze medie comprese tra il 28-30% nella porzione più elevata, mentre a valle tali valori si riducono fino a circa il 10%. In particolare, la zona individuata per la costruzione dell'ospedale si trovava originariamente ad una quota di circa 47 m.s.l.m.

Complessivamente, l'area di progetto è caratterizzata da una significativa variabilità altimetrica legata alle varie opere strutturali previste. Le quote passano dai circa 50-51 m.s.l.m. nei pressi del serbatoio antincendio ai circa 34 m.s.l.m. in corrispondenza del cancello di entrata. Ne risulta quindi un dislivello di circa 17m ed una acclività media prossima al 9%.

La morfologia del sito varia sensibilmente nella porzione situata a monte della struttura ospedaliera, dove è prevista la realizzazione del polo tecnologico ed è già presente la berlinese oggetto del presente lavoro di tesi. In questa zona il versante presenta un'acclività maggiore, intorno ai 20°, e le quote aumentano progressivamente, passando dai circa 50-51 m.s.l.m. del piano di posa dei futuri locali tecnici ai circa 61-62 m.s.l.m. in corrispondenza della testa della paratia. Si registra invece un abbassamento della quota del piano campagna nei pressi dell'area adibita a parcheggio, con altezze di circa 30.35 m.s.l.m.

Il territorio è delimitato ad est dall'abitato di Felettino e della struttura di Radioterapia, sede di una delle due stazioni dalle quali vengono effettuate le misure topografiche. Sul lato occidentale si trovano invece i locali degli addetti ai lavori e le vie di accesso al cantiere. Ai piedi dell'area scorre il torrente Dorgia, mentre a monte è presente una zona a copertura prettamente boschiva.

L'assetto morfologico del territorio risulta strettamente correlato alle caratteristiche geologiche e litologiche delle formazioni affioranti. Permette di riconoscere la presenza di depositi colluviali e di conoide che ricoprono un substrato roccioso ubicato a maggiore profondità.

Nelle aree a monte dell'ospedale e nei settori circostanti, i depositi di copertura sono prevalentemente caratterizzati da accumuli di versante, mentre nei settori orientale e occidentale sono presenti due conoidi alluvionali. Quella orientale risulta maggiormente estesa e significativa, comprendendo al suo interno sia l'abitato di Felettino sia l'area destinata a parcheggio. La conoide occidentale presenta invece dimensioni minori e si sviluppa lungo il margine occidentale dell'area di progetto.

La mappa dell'assetto geomorfologico dell'area di interesse e la relativa legenda sono riportati rispettivamente nelle immagini di Figura 2.31 e 2.32.



Figura 2.31 Mappa assetto geomorfologico area di studio

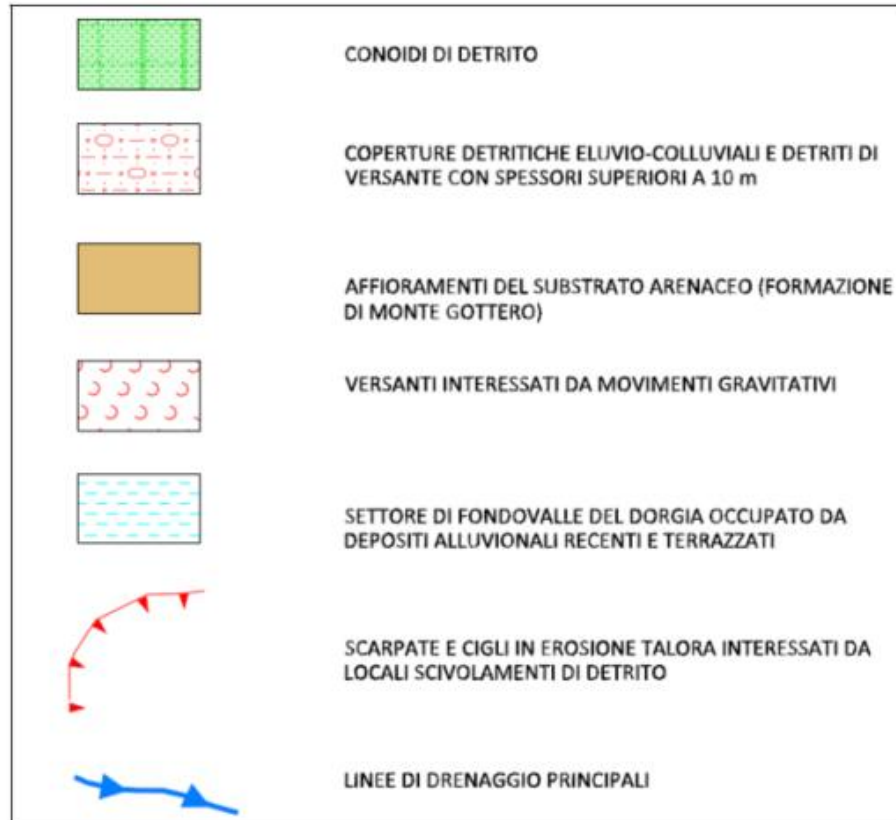


Figura 2.32 Legenda

Lo studio relativo alla potenziale presenza di eventi franosi è stato condotto ricorrendo alla consultazione del webgis IFFI (inventario dei Fenomeni Franosi in Italia). Sono stati identificati tre piccoli movimenti franosi non classificabili, lungo il versante in sinistra dell'impluvio ad Ovest dell'area ospedaliera (Figura 2.33).



Figura 2.33 Catalogo IFFI con identificazione potenziali movimenti franosi

Si ipotizza che i tre fenomeni franosi siano legati all'erosione lungo l'impluvio e appannaggio del solo strato di copertura. Nel tentativo di controllare un'eventuale presenza di ulteriori dissesti è stato consultato il Portale Cartografico Nazionale, dal quale sono stati analizzati i dati interferometrici. Quest'ultimi segnalano la presenza o meno di movimenti sui manufatti e, nel caso in esame, mostrano una significativa stabilità dell'area di progetto [9].

2.2.2 Idromorfologia

La zona oggetto di studio è stata analizzata dal punto di vista idromorfologico facendo riferimento alla Cartografia del Reticolo Idrografico della Regione Liguria (Figura 2.34). L'unità principale è il torrente Dorgia, il quale scorre ai piedi dell'area ospedaliera e nel quale confluiscono le acque dei canali e dei fossi che drenano il versante. Sono presenti infatti due impluvi, uno in direzione ovest e l'altro ad est rispetto alla zona abitata di Felettino, identificato come il Fosso della Quercia/Pellizzara.



Figura 2.34 Reticolo idrografico regione Liguria con focus zona ospedaliera

2.3 Caratterizzazione idraulica

Dal punto di vista idrogeologico l'area è stata analizzata facendo riferimento alle varie campagne di indagini geognostiche, tramite i sondaggi effettuati. Una precisa caratterizzazione risulta complicata alla luce della eterogeneità geologica del territorio, risentendo dell'influenza di due principali unità litologiche.

Il deposito di copertura eluvio-colluviale o alluviale di conoide è costituito da materiale incoerente grossolano eterogeneo. Tuttavia, essendo caratterizzato da un'elevata percentuale di contenuto di fine in alcune zone, presenta valori di permeabilità variabili.

Il substrato roccioso situato in profondità, presenta litofacies siltitico-argillitiche con alternanza di arenacee, caratterizzate nel complesso da una scarsa permeabilità. Tuttavia, in corrispondenza di zone maggiormente fratturate, possono verificarsi locali incrementi di permeabilità. Inoltre, tale substrato svolge la funzione di acquitardo nei confronti degli acquiferi sovrastanti, agendo come una base impermeabile e limitando i flussi idrici verticali.

I livelli di falda registrati nel corso delle varie indagini possono essere identificati tramite le letture piezometriche. A tal proposito sono significativi i seguenti sondaggi attrezzati con piezometro ricadenti nell'area della paratia:

INDAGINI PRELIMINARI (1989,1997,2001,2011,2012)

- Sondaggio S₁ campagna indagini 2011, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S₆ campagna indagini 2012, condizionato con piezometro a tubo aperto

INDAGINI A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE ESECUTIVA (2015)

- Sondaggio S_{e2} campagna indagini 2015, condizionato con piezometro Casagrande a doppia cella
- Sondaggio S_{e13p} campagna indagini 2015, condizionato con piezometro a tubo aperto

INDAGINI INTEGRATIVE SUCCESSIVE (2017,2019)

- Sondaggio S_A campagna indagini 2017, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S_B campagna indagini 2017, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S_C campagna indagini 2017, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S_{Hp} campagna indagini 2017, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S₁₋₁₉ campagna indagini 2019, condizionato con piezometro a tubo aperto
- Sondaggio S₂₋₁₉ campagna indagini 2019, condizionato con piezometro a tubo aperto

Le letture dei livelli idrici di falda sono state effettuate tramite l'utilizzo di piezometri a tubo aperto, ad eccezione del sondaggio Se2, il quale è stato invece attrezzato con piezometro di Casagrande a doppia cella.

Quest'ultima tipologia strumentale consente di intercettare la presenza di due distinti livelli idrici mediante due celle. Quella più superficiale avrebbe permesso la lettura all'interno dei depositi di copertura, mentre l'altra situata maggiormente in profondità avrebbe effettuato le misure relative al substrato roccioso.

L'installazione dei piezometri a tubo aperto riguarda invece la profondità del foro di sondaggio nella sua interezza. Tale strumentazione è caratterizzata da una tubazione in PVC fessurata o microfessurata, con i primi metri superficiali che vengono isolati tramite immissione di bentonite nell'intercapedine, al fine di evitare interferenze tra l'acqua di ruscellamento e la falda.

Il piezometro a tubo aperto risulta maggiormente idoneo ed efficiente in condizioni idrogeologiche semplici (costituite da una sola falda libera), per terreni generalmente grossolani sabbioso-ghiaiosi. La lettura del livello di falda viene effettuata solitamente tramite un trasduttore o freatimetro elettrico. Il piezometro di Casagrande consente di misurare anche le pressioni interstiziali dell'acqua ed è più funzionale nei confronti di terreni coesivi come argille e limi. Il tubo in PVC è caratterizzato da un'estremità aperta e una chiusa da un pistone, sul quale agisce la pressione dell'acqua che causa una variazione del volume del piezometro. Questa pressione è letta generalmente da un trasduttore, ma le letture possono essere effettuate anche tramite sonda elettrica o freatimetro [10].

Le letture registrate dagli strumenti nel corso degli anni sono riportate nelle due tabelle di Figura 2.35 e 2.36. La prima è relativa alle misure effettuate nel biennio 2015-2016 precedente alla costruzione della paratia, mentre la seconda è caratterizzata da letture inerenti al monitoraggio ad opera realizzata, con date a cavallo tra il 2017 e il 2019.

					MISURE AGOSTO 2015				MISURE GENNAIO 2016			
	quota (m s.l.m.)	prof. Celle sup e inf.	ANNO	PROF. PIEZ. A T.A.	Prof. falda cella sup	Prof. falda cella inf	piez. t.a. - PROF. FALDA DA P.C. (m)	piez. t.a. - QUOTA FALDA (m s.l.m.)	Prof. falda cella sup	Prof. falda cella inf	piez. t.a. - PROF. FALDA DA P.C. (m)	piez. t.a. - QUOTA FALDA (m s.l.m.)
S1	51		2011-2012	27			2,30 - 1,6	49.4				
S5	34		2011-2012	30			2,3-2,50	31.7				
S6	45.3		2011-2012	20			1,4-1,9	43.9				
Srad	55.9		2011-2012	15			8	47.9				
S3			1989	30			2.8					
S5	46		1989	30			3.5	42.5				
S6	49.18		1989	26			3.5	45.68				
S7	48.9		1989	30			2.2	46.7				
S2	39.51		1997	15			2.5	37.01				
S3	50		1997	25			5	45				
S4	50		1997	26			4.5	45.5				
S7	45.7		1997	20			1.5	44.2			1.25	44.45
S8	45.8		1997	20			3.4	42.4				
Se2	64	-10 m; -32 m	2015		-9.1	-28.8			6.3	8.2		57.7
Se5	45.5		2015	20			3.7	41.8			3.7	41.8
Se6	45.5	-8 m; -22 m	2015		asciutta	asciutta			1.35	1.05		44.15
Se7	46.04	-6 m; -18 m	2015		asciutta	asciutta			5	5.05		41.04
Se8	47.23	-6 m; -18 m	2015		asciutta	asciutta			asciutta	6.1		41.13
Se9	44.4	-6 m; -18 m	2015		asciutta	asciutta			3.6	5.95		40.8
Se10	47	-6 m; -18 m	2015		asciutta	asciutta			Non misurato			
se4	49.2	-10 m; -23 m	2015		-9.1	-21.1	Acqua nel foro a -1.5 m	47.7	SEPOLTO			
se12	37.5	-10 m; -33 m	2015		9.6	32.4			3	3.4		34.5
Se13p	64		2015	20			6.3	57.7			6	58
Pozzo	37.63		2015	40			4.3	33.33				

Figura 2.35 Letture piezometriche 2015-2016

INFRASTRUCTURE
✓ LETTURE PIEZOMETRICHE



n° Rapporto 282

Località La Spezia - Nuovo Ospedale

DATA	Punto A	Punto B	Punto C	Dietro palo 76 (G1)	1 OVEST Ospedale	2 SUD-EST Ospedale	Punto F	Punto G	Punto H	Punto I	Punto L	Punto M	Punto N
26/07/2017	13,66	9,97	11,67	6,98	1,96	5,36							
02/08/2017	14,68	10,20	13,07	7,07	1,90	5,60							
04/08/2017	14,97	10,35	13,47	7,09	1,91	5,69							
08/08/2017	14,56	10,20	12,54	7,10	1,91	5,86	1,25						
10/08/2017	15,45	10,38	15,21	7,10	1,91	5,88	1,25						
29/08/2017	15,49	10,48	15,45	7,02	1,90	5,87	1,24	10,90		3,50			
30/08/2017	15,50	10,48	15,46	7,04	1,90	5,88	1,24	10,90		3,50			
05/09/2017	15,01	10,33	14,95	7,00	1,88	5,88	1,25	10,80	11,00	3,50			
06/09/2017	14,72	10,27	14,44	7,00	1,88	5,88	1,25	10,69	10,90	3,50			
08/09/2017	14,10	10,03	14,07	6,95	1,88	5,88	1,23	10,33	10,78	3,45			
12/09/2017	13,72	9,88	13,66	6,90	1,88	5,85	1,22	10,02	10,69	3,43			
14/09/2017	13,20	9,71	13,12	6,82	1,87	5,85	1,21	9,80	10,60	3,40			
19/09/2017	12,90	9,60	13,00	6,70	1,85	5,80	1,20	9,65	10,47	3,40			
26/09/2017	12,95	9,70	13,11	6,78	1,87	5,83	1,22	9,73	10,40	3,43			
27/09/2017	13,00	9,76	13,22	6,84	1,90	5,86	1,24	9,79	11,10	3,46			
29/09/2017	13,70	9,90	14,01	6,98	1,33	5,90	1,25	10,00	11,60	3,50			
02/10/2017	13,82	9,96	14,10	7,00				10,12	11,63	3,50			
04/10/2017	13,85	9,95	14,07	6,97				10,07	11,57	3,47			
06/10/2017	13,77	9,90	14,02	6,96				10,22	11,50	3,48			
10/10/2017	13,70	9,92	13,96	6,93				10,29	11,47	3,50			
11/10/2017	13,75	9,88	13,98	6,95				10,33	11,40	3,49			
12/10/2017	13,78	9,90	14,00	6,96				10,38	11,37	3,50			
16/10/2017	13,81	9,92	14,02	6,97				10,40	11,40	3,50			
23/10/2017	13,79	9,89	13,99	6,95				10,38	11,37	3,47			
25/10/2017	13,77	9,88	13,97	6,94				10,36	11,37	3,46			
20/12/2017	10,12	7,90	5,50	5,45				10,20	11,32	3,15	2,84	2,28	0,40
12/01/2018	10,01	7,87	5,57	5,43				10,15	11,27	3,12	2,83	2,27	0,40
17/01/2018	10,03	7,90	5,65	5,56				10,20	11,31	3,16	2,86	2,30	0,40
23/01/2018	10,56	8,10	5,83	5,78				10,43	11,48	3,28	2,91	2,37	0,39
29/01/2018	10,80	8,20	6,10	5,90				10,51	11,50	3,35	2,95	2,43	0,40
07/02/2018	9,41	7,78	5,85	5,68				10,00	11,01	3,26	2,90	2,40	0,38
15/02/2018	9,20	7,90	5,95	5,88				9,90	10,90	3,20	2,85	2,38	0,36
21/02/2018	9,00	7,80	5,88	5,80				9,78	10,72	3,10	2,80	2,35	0,34
02/03/2018	8,57	7,68	5,61	5,33				9,51	10,41	3,00	2,56	2,30	0,32
07/03/2018	5,01	6,10	0,00	4,11				8,61	9,23	2,33	2,11	1,93	0,28
13/03/2018	4,63	5,71	0,00	3,78				8,01	8,89	2,00	1,98	1,78	0,26
21/03/2018	4,41	5,56	0,00	3,70				7,92	8,79	1,96	1,91	1,78	0,27
26/03/2018	4,59	5,73	2,10	3,82				8,05	8,98	2,03	2,00	1,91	0,33
06/04/2018	4,10	5,68	0,00	3,76				7,89	8,67	1,87	1,91	1,75	0,32
12/04/2018	3,98	5,50	0,00	3,61				7,76	8,57	1,80	1,80	1,68	0,32
18/04/2018	5,03	6,18	2,07	5,61				8,26	9,10	2,20	2,35	1,99	0,35
23/04/2018	9,30	5,95	3,70	5,00				10,16	15,70	2,90	3,00	2,80	0,42
04/05/2018	9,85	6,45	4,90	5,42				10,20	15,80	2,76	3,04	2,30	0,45
10/05/2018	10,88	6,85	6,51	5,60				10,29	13,20	3,44	3,10	2,30	0,45
15/05/2018	10,79	6,68	6,41	5,45				10,17	13,18	3,45	3,12	2,32	0,45
21/05/2018	10,91	6,80	6,53	5,63				10,25	13,20	3,50	3,20	2,40	0,45
29/05/2018	11,00	6,92	6,65	5,90				10,30	13,40	3,70	3,32	2,45	0,45
05/06/2018	12,50	7,45	8,06	6,15				10,55	15,60	4,40	3,34	2,70	0,46
15/06/2018	12,56	7,52	8,10	6,21				10,58	15,88	4,42	3,35	2,71	0,45
20/06/2018	12,61	7,59	8,15	6,27				10,64	16,00	4,43	3,37	2,72	0,45
26/06/2018	12,75	7,62	8,20	6,31				10,70	16,01	4,45	3,40	2,73	0,45
03/07/2018	12,70	7,65	8,23	6,34				10,77	16,02	4,49	3,42	2,75	0,46
10/07/2018	13,80	7,75	8,30	6,47				11,00	16,02	4,50	3,43	2,76	0,46
16/07/2018	13,13	7,80	8,35	6,50				11,02	16,02	4,52	3,45	2,78	0,46
19/07/2018	13,22	7,88	8,43	6,66				11,07	16,02	4,54	3,45	2,81	0,46
23/07/2018	13,30	7,91	8,47	6,70				11,10	16,00	4,55	3,47	2,85	0,45



INERASTRO TUBO

25/07/2018	13,70	8,00	8,57	6,81
27/07/2018	13,81	8,03	8,60	6,87
30/07/2018	14,07	8,10	8,68	6,90
01/08/2018	14,35	8,17	8,75	6,98
03/08/2018	14,43	8,20	8,80	7,03
06/08/2018	14,51	8,23	8,82	7,06
08/08/2018	15,00	8,26	8,85	7,11
28/08/2018	14,33	8,17	8,62	6,98
29/08/2018	14,30	8,15	8,49	6,97
31/08/2018	14,28	8,13	8,47	6,95
03/09/2018	13,88	7,90	8,21	6,73
05/09/2018	13,00	7,77	8,11	6,67
07/09/2018	12,60	7,68	8,28	6,60
10/09/2018	13,00	7,70	9,10	6,96
12/09/2018	13,20	7,77	10,75	7,00
14/09/2018	13,27	7,82	10,81	7,03
17/09/2018	13,42	7,95	11,10	7,12
21/09/2018	13,44	7,98	11,12	7,14
24/09/2018	13,46	8,01	11,08	7,08
27/09/2018	13,40	7,83	10,90	7,01
01/10/2018	13,10	7,69	10,79	6,89
03/10/2018	13,02	7,63	10,70	6,83
05/10/2018	13,00	7,60	10,68	6,81
08/10/2018	12,98	7,80	10,91	6,90
10/10/2018	12,79	7,83	10,99	6,96
12/10/2018	13,05	7,67	10,78	6,88
15/10/2018	13,07	7,90	10,80	6,87
17/10/2018	12,97	7,79	10,62	6,80
19/10/2018	13,15	7,83	10,78	6,86
22/10/2018	13,21	7,86	10,83	6,91
24/10/2018	13,27	7,92	10,85	6,94
26/10/2018	13,30	7,93	10,86	6,96
30/10/2018	12,10	7,10	9,91	6,18
31/10/2018	12,17	7,20	10,00	6,26
05/11/2018	11,59	7,11	9,98	6,20
07/11/2018	11,50	7,01	9,91	6,18
09/11/2018	11,57	7,09	9,95	6,23
12/11/2018	11,60	7,11	9,94	6,22
14/11/2018	11,58	7,13	9,90	6,24
16/11/2018	11,61	7,17	9,87	6,30
19/11/2018	11,73	7,24	9,92	6,37
21/11/2018	11,52	7,12	9,89	6,30
23/11/2018	11,47	7,06	9,81	6,27
26/11/2018	11,33	7,00	9,82	6,21
28/11/2018	11,30	7,02	9,85	6,24
03/12/2018	11,37	7,07	9,89	6,30
05/12/2018	11,40	7,06	9,88	6,33
07/12/2018	11,40	7,05	9,86	6,29
11/12/2018	11,73	7,10	9,33	6,41
12/12/2018	11,76	7,11	9,94	6,43
14/12/2018	11,78	7,13	9,94	6,44
17/12/2018	12,00	7,34	9,21	6,67
19/12/2018	12,48	7,42	8,90	6,80
28/01/2019	13,04	7,84	9,00	6,85
30/01/2019	12,82	7,77	8,10	6,78
01/02/2019	12,80	7,74	8,08	6,75
04/02/2019	12,15	7,66	7,92	6,52
06/02/2019	12,28	7,70	7,96	6,61
08/02/2019	12,35	7,72	8,00	6,63
11/02/2019	12,18	7,66	7,92	6,58
13/02/2019	12,21	7,70	7,95	6,60
15/02/2019	12,30	7,73	7,79	6,64
18/02/2019	12,40	7,76	7,87	6,80
20/02/2019	12,43	7,81	7,92	6,83
22/02/2019	12,45	7,84	7,95	6,86
25/02/2019	12,50	7,86	7,98	6,90
27/02/2019	12,53	7,90	8,00	6,92

11,12	16,00	4,57	3,50	2,85	0,46
11,14	16,00	4,60	3,50	2,85	0,46
11,20	16,00	4,61	3,60	2,86	0,46
11,28	16,00	4,62	3,62	2,87	0,47
11,30	16,02	4,63	3,62	2,87	0,47
11,31	16,03	4,64	3,64	2,88	0,47
11,33	16,03	4,65	3,66	2,90	0,46
11,15	15,78	4,60	3,60	2,81	0,43
11,10	15,70	4,59	3,58	2,80	0,44
11,07	15,67	4,57	3,53	2,79	0,45
10,98	14,03	4,41	3,39	2,68	0,43
10,50	12,81	4,13	3,17	2,59	0,41
10,11	12,50	4,03	3,11	2,57	0,48
10,65	16,03	3,10	3,17	3,11	0,56
10,77	18,35	3,05	3,23	4,06	0,62
10,86	18,42	3,07	3,26	4,07	0,64
11,04	18,50	3,13	3,32	4,15	0,68
11,02	18,38	3,10	3,29	4,13	0,70
10,97	18,35	3,17	3,27	4,10	0,70
10,95	18,30	3,12	3,21	4,06	0,70
10,73	16,18	3,10	3,17	4,03	0,69
10,54	16,19	3,08	3,15	4,02	0,70
10,52	16,20	3,07	3,13	3,99	0,69
OTTURATO	16,03	3,15	3,17	4,00	0,69
OTTURATO	16,12	3,18	3,21	4,07	0,70
OTTURATO	16,58	3,14	3,28	4,04	0,68
OTTURATO	16,52	3,12	3,24	4,01	0,68
OTTURATO	16,30	3,10	3,20	3,99	0,67
OTTURATO	16,41	3,13	3,21	4,02	0,67
OTTURATO	16,43	3,18	3,23	4,09	0,68
OTTURATO	16,45	3,20	3,25	4,08	0,69
OTTURATO	16,50	3,21	3,27	4,11	0,70
OTTURATO	13,12	3,01	3,02	3,88	0,65
OTTURATO	13,70	3,07	3,09	4,00	0,65
OTTURATO	13,00	2,58	3,02	3,91	0,65
OTTURATO	12,91	2,56	3,01	OTTURATO	0,65
OTTURATO	12,93	2,50	3,00	OTTURATO	0,66
OTTURATO	13,10	2,48	2,99	OTTURATO	0,68
OTTURATO	13,25	2,48	2,98	OTTURATO	0,69
OTTURATO	13,43	2,52	3,01	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,62	2,54	3,04	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,00	2,52	3,00	OTTURATO	0,69
OTTURATO	12,79	2,50	2,98	OTTURATO	0,68
OTTURATO	12,00	2,49	2,96	OTTURATO	0,68
OTTURATO	11,51	2,50	2,98	OTTURATO	0,70
OTTURATO	12,64	2,51	3,00	OTTURATO	0,70
OTTURATO	12,80	2,49	3,01	OTTURATO	0,70
OTTURATO	12,93	2,53	3,02	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,10	2,54	3,04	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,12	2,54	3,04	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,17	2,53	3,03	OTTURATO	0,70
OTTURATO	13,00	2,48	3,22	OTTURATO	0,75
OTTURATO	12,80	2,43	3,45	OTTURATO	0,80
OTTURATO	14,03	3,08	3,49	OTTURATO	0,76
OTTURATO	15,48	3,02	3,42	OTTURATO	0,75
OTTURATO	15,05	2,99	3,37	OTTURATO	0,75
OTTURATO	15,00	2,86	3,28	OTTURATO	0,70
OTTURATO	15,78	2,90	3,31	OTTURATO	0,73
OTTURATO	16,03	2,93	3,35	OTTURATO	0,76
OTTURATO	15,80	2,89	3,31	OTTURATO	0,75
OTTURATO	16,00	2,90	3,32	OTTURATO	0,76
OTTURATO	16,10	2,95	3,36	OTTURATO	0,77
OTTURATO	16,20	2,97	3,40	OTTURATO	0,80
OTTURATO	16,30	2,98	3,43	OTTURATO	0,81
OTTURATO	16,33	2,99	3,44	OTTURATO	0,82
OTTURATO	16,50	2,45	3,45	OTTURATO	0,83
OTTURATO	16,60	2,33	3,48	OTTURATO	0,85

INFRASTRUTTURE					SOCOTEC					
01/03/2019	12,55	7,91	8,00	6,93	OTTURATO	16,60	2,32	3,50	OTTURATO	0,85
04/03/2019	12,60	7,93	8,03	6,98	OTTURATO	16,70	2,30	3,51	OTTURATO	0,86
06/03/2019	12,68	7,97	8,04	7,00	OTTURATO	16,75	2,28	3,52	OTTURATO	0,87
08/03/2019	12,68	7,96	8,03	7,00	OTTURATO	16,74	2,26	3,50	OTTURATO	0,87
11/03/2019	12,66	7,97	8,00	7,00	OTTURATO	16,70	2,26	3,50	OTTURATO	0,87
15/03/2019	12,60	7,92	7,99	6,99	OTTURATO	16,70	2,21	3,50	OTTURATO	0,87
18/03/2019	12,63	7,95	8,01	7,01	OTTURATO	16,65	2,22	3,52	OTTURATO	0,88
20/03/2019	12,60	7,94	8,00	7,00	OTTURATO	16,60	2,20	3,50	OTTURATO	0,88
21/03/2019	12,61	7,96	8,00	7,13	OTTURATO	16,60	2,19	3,50	OTTURATO	0,88
25/03/2019	12,62	7,89	8,03	7,15	OTTURATO	16,65	2,18	3,51	OTTURATO	0,87
27/03/2019	12,85	8,13	8,16	7,22	OTTURATO	17,02	2,14	3,52	OTTURATO	0,90
29/03/2019	12,89	8,15	8,21	7,25	OTTURATO	17,00	2,13	3,50	OTTURATO	0,90
01/04/2019	12,84	8,18	8,23	7,20	OTTURATO	17,00	2,13	3,50	OTTURATO	0,90
10/04/2019					OTTURATO				OTTURATO	
15/04/2019					OTTURATO				OTTURATO	

Le misure piezometriche nel complesso hanno evidenziato la presenza di una falda superficiale all'interno dei depositi di copertura, al netto delle variazioni riscontrate tra le misure effettuate prima e dopo la realizzazione dell'opera.

Dall'analisi dei dati relativi al biennio 2015-2016, si nota come i livelli di falda registrati dai piezometri installati nei sondaggi di interesse per la paratia sono compresi tra 1,6 m e 6,3 m da p.c (tubo aperto) e pari a 9,1 m da p.c (Casagrande).

Il monitoraggio piezometrico condotto nel periodo tra il 2017 e il 2019 ha invece mostrato livelli piezometrici mediamente più profondi (seppure sempre abbastanza superficiali), con valori massimi fino a 14,1 m da p.c. registrato nel piezometro del sondaggio S_c.

L'analisi complessiva delle misure consente inoltre di ipotizzare la presenza di una modesta circolazione idrica all'interno del substrato roccioso, localizzata principalmente nelle porzioni maggiormente fratturate e alterate. Considerando l'entità limitata di tale circolazione, può ritenersi trascurabile ai fini delle analisi geotecniche.

Nel corso della campagna di indagini del 2015 sono state eseguite anche nove prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc e Lugeon, con l'obiettivo di integrare le misure piezometriche e fornire una caratterizzazione idraulica maggiormente completa.

Entrambe le metodologie consentono di determinare il coefficiente di permeabilità k , sebbene trovino applicazione in contesti differenti. La prova Lefranc è utilizzata principalmente nei terreni superficiali, mentre la prova Lugeon è specifica per la caratterizzazione idraulica degli ammassi rocciosi.

La prima può essere eseguita sia a carico costante che a carico variabile. Nel caso in esame è stata adottata la modalità a carico variabile, che consente nell'immettere acqua nel foro fino a una quota prefissata e nel monitorare l'abbassamento del livello idrico in un determinato range temporale [11].

La seconda, invece, consiste nella misura della portata assorbita da un tratto di foro idraulicamente isolato (mediante packer semplice o doppio) e sottoposto a una differenza di carico idraulico nota. Il risultato della prova viene espresso in unità Lugeon, corrispondenti all'assorbimento di 1 litro d'acqua al minuto per metro di foro, applicando una pressione di 1 Mpa [12].

A scopo illustrativo, nelle Figure 2.37 e 2.38 sono riportati due esempi di prove Lefranc e Lugeon eseguite su un tratto di foro del sondaggio S_{e2}. La tabella riportata in Figura 2.39 riassume invece i risultati delle prove effettuate nei diversi sondaggi, con i rispettivi valori dei coefficienti di permeabilità determinati.

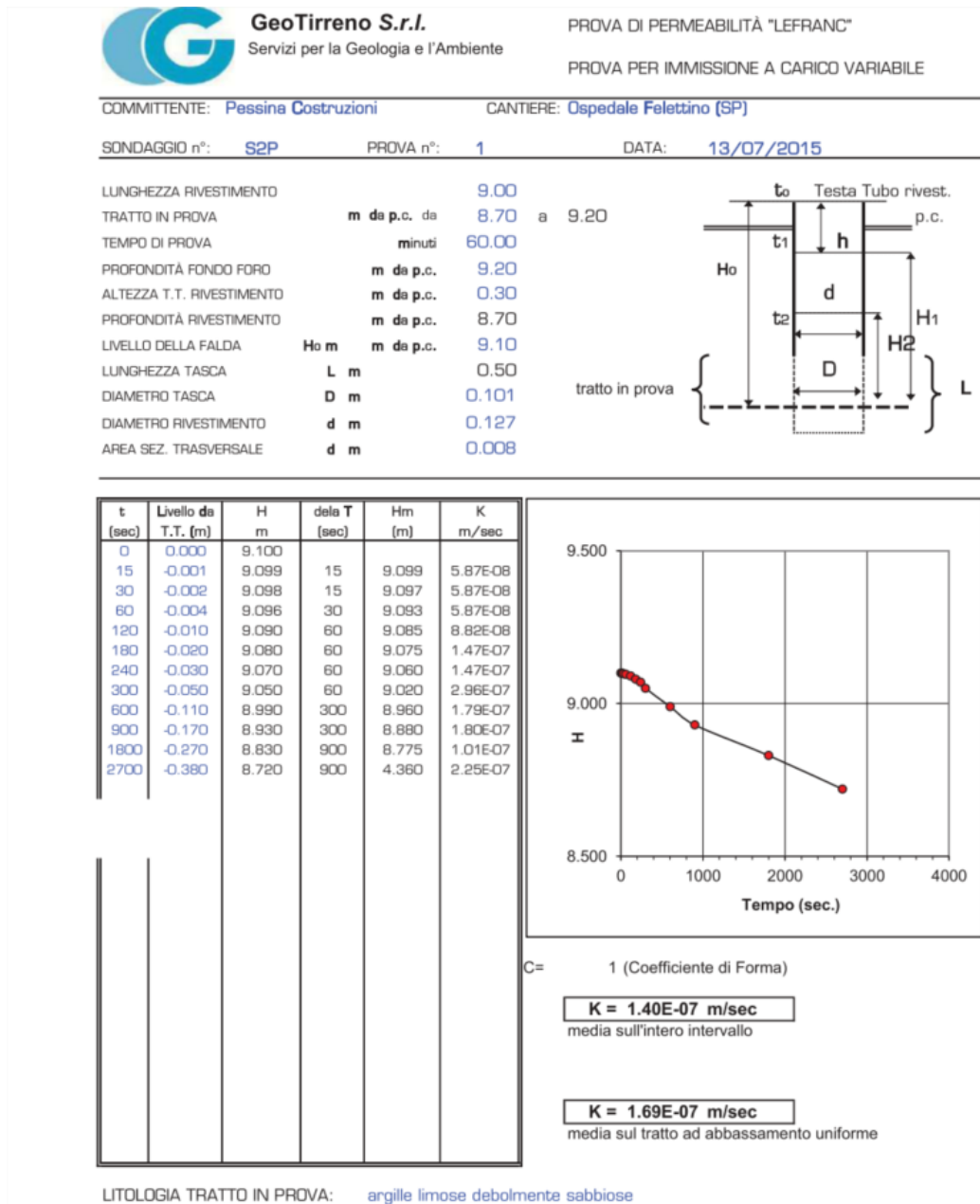


Figura 2.37 Prova Lefranc S_{e2}

GEO TIRRENO S.r.l.
Via Frassina, n°65-54033 Carrara (MS)-tel.0585 833730 - fax. 0585 837912

Committente: Pessina Costruzioni
Località: Ospedale Felettino (SP) Descrizione: DA -22.00 A -23.50
Note: Sigla: S2e-1

Prova Lugeon

Pressione al manometro (kg/cm ²)	Altezza della colonna d'acqua (m)	Perdita di carico (m)	Portata assorbita (l/min)	Unità Lugeon
1	22	0	2.36	4.96
3	22	0	2.71	3.47
5	22	0	2.65	2.64
3	22	0	0.98	1.26
1	22	0	0.26	0.54

Diametro del foro (mm): Lunghezza del tratto di prova (m):
Unità Lugeon selezionata:

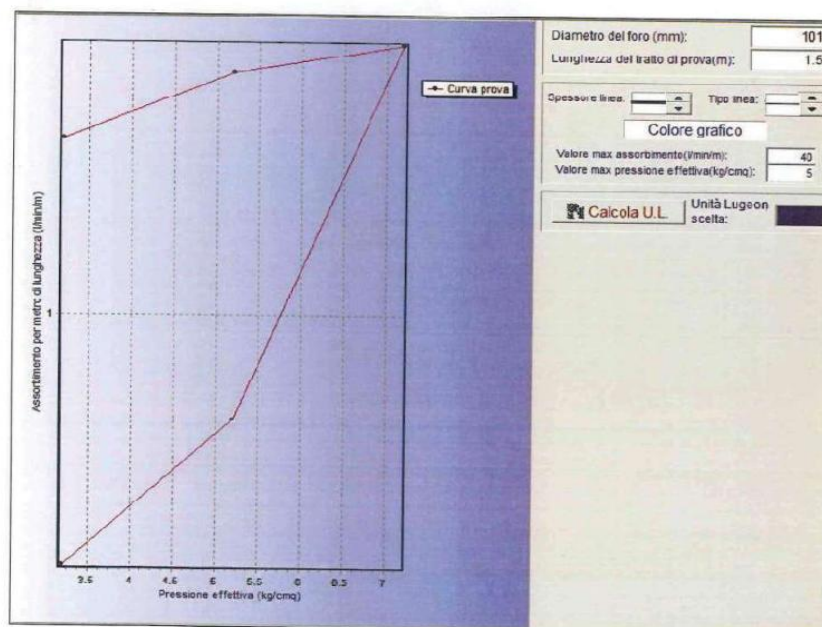
GEO TIRRENO S.r.l.
Via Frassina, n°65-54033 Carrara (MS)-tel.0585 833730 - fax. 0585 837912

Committente: Pessina Costruzioni
Località: Ospedale Felettino (SP) Descrizione: DA -22.00 A -23.50
Note: Sigla: S2e-1

Prova Lugeon: dati della prova

Tempo (min)	Pressione di prova (kg/cm ²)	Acqua assorbita (l)	Lettura al contatore (l)	Somma acqua assorbita (l)	Assorbimento (l/m x min)
10	1	23.8	1004	23.8	1.59
10	3	27.1	1877	27.1	1.81
10	5	28.5	1849	28.5	1.9
10	3	9.8	1839	9.8	0.65
10	1	2.6	1030	2.0	0.17

Diametro del foro (mm): Lunghezza del tratto di prova (m):

Figura 2.38 Prova Lugeon S_{e2}

SONDAGGIO	PROFONDITA' PROVA m. da p.c.	TIPO PROVA	K m/s	Litotipo
Se2	-8,70	LEF	1,4X10 ⁻⁷	copertura
Se6	-2,70	LEF	9,6X10 ⁻⁸	copertura
Se6	-9,70	LEF	2,3X10 ⁻⁶	copertura
Se9	-2,20	LEF	7,7X10 ⁻⁷	copertura
Se9	-6,20	LEF	1,66X10 ⁻⁸	siltiti/argilliti
Se2	-22-23,5	LUG	3,7X10 ⁻⁸	siltiti/argilliti
Se2	-30-31,50	LUG	1,4X10 ⁻⁷	siltiti/argilliti
Se6	-16-17,50	LUG	7,2X10 ⁻⁸	siltiti/argilliti e arenarie
Se6	-23-23,50	LUG	2,66X10 ⁻⁸	siltiti e argilliti

Figura 2.39 Tabella riassuntiva valori k sondaggi campagna 2015

Analizzando i risultati delle prove di permeabilità, si può notare come sia i depositi superficiali che il substrato roccioso profondo siano caratterizzati da valori del coefficiente di permeabilità k abbastanza modesti. In particolare, le prove maggiormente significative al fine della caratterizzazione idraulica dell'area della berlinese sono quelle relative al sondaggio S_{e2}.

I valori sono dell'ordine dei $10^{-7} / 10^{-8}$ m/s, con gli strati superficiali di copertura che presentano una permeabilità leggermente maggiore di quelli rocciosi in profondità. Nel substrato roccioso, tuttavia, possono verificarsi locali aumenti di permeabilità in prossimità di zone alterate e fratturate.

2.4 Caratterizzazione geotecnica

Sulla base di quanto detto nei due capitoli precedenti, l'insieme dei dati raccolti dalle indagini geognostiche e geofisiche unite alle prove in sito ed in laboratorio effettuate, ha permesso di impostare il modello geotecnico dell'area di progetto con i suoi parametri caratteristici.

Il terreno oggetto di studio è stato suddiviso nelle quattro unità geologiche citate nel capitolo 2.2. La coltre di depositi superficiali di copertura è caratterizzata dalla presenza delle unità Cs e Ci, mentre all'interno del substrato roccioso situato maggiormente in profondità sono state individuate le unità Salt e Sas. Una caratterizzazione generale dal punto di vista geologico e litotecnica è già stata fornita, mentre le proprietà meccaniche per la definizione dei parametri geotecnici propri del modello costruito sono state ricavate dall'analisi approfondita dei dati ottenuti dalle prove a disposizione.

Le stratigrafie sono state integrate dalle numerose prove SPT in foro e dallo studio dei campioni prelevati e sottoposti a prove di laboratorio. In sede di analisi sono state svolte prove allo scopo di investigare le caratteristiche fisiche, granulometriche, di consistenza e meccaniche dei campioni estratti dai vari sondaggi di interesse. Le tipologie di prove eseguite saranno riprese nel paragrafo seguente.

In questo capitolo è riportata la cronistoria progettuale della berlinese, partendo dal modello geotecnico iniziale per poi arrivare alla variante caratterizzata dall'introduzione di un terzo ordine di tiranti e dreni sub orizzontali.

2.4.1 Progetto esecutivo iniziale

Il progetto esecutivo sul quale si sono basati i lavori per la realizzazione della paratia a monte dell'area ospedaliera è stato redatto dallo studio "3TI Progetto Italia Ingegneria Integrata Spa" di Roma ad inizio 2016 [13].

La struttura così progettata si presentava costituita da 89 pali in c.a. trivellati di diametro 1000 mm e disposti secondo un interasse di 1,30 m, per uno sviluppo longitudinale pari a circa 105 m. I pali avevano una lunghezza variabile tra i 18 e i 21 m ed erano collegati in testa da una trave di coronamento di dimensioni 1,00 x 1,20 m. La paratia era ancorata mediante due ordini di tiranti a 6 trefoli inclinati di 20° rispetto all'orizzontale, disposti secondo un interasse orizzontale di 2,60 m e pretesati con uno sforzo di 400 kN. Il primo ordine si trovava ad una quota di +59,70 m.s.l.m. e comprendeva 37 tiranti di lunghezza complessiva pari a 23 m (11 di bulbo di fondazione e 12 di tratto libero), mentre il secondo era disposto 3,50 m sotto per un totale di 39 tiranti di lunghezza 20 m (11 di bulbo di fondazione e 9 di tratto libero). Il progetto prevedeva inoltre due ordini di dreni sub orizzontali di lunghezza 10 m disposti secondo un interasse di 2,60 m.

La rappresentazione di una sezione tipo a scopo esemplificativo, caratterizzata dai due ordini di tiranti, è riportata in Figura 2.40.

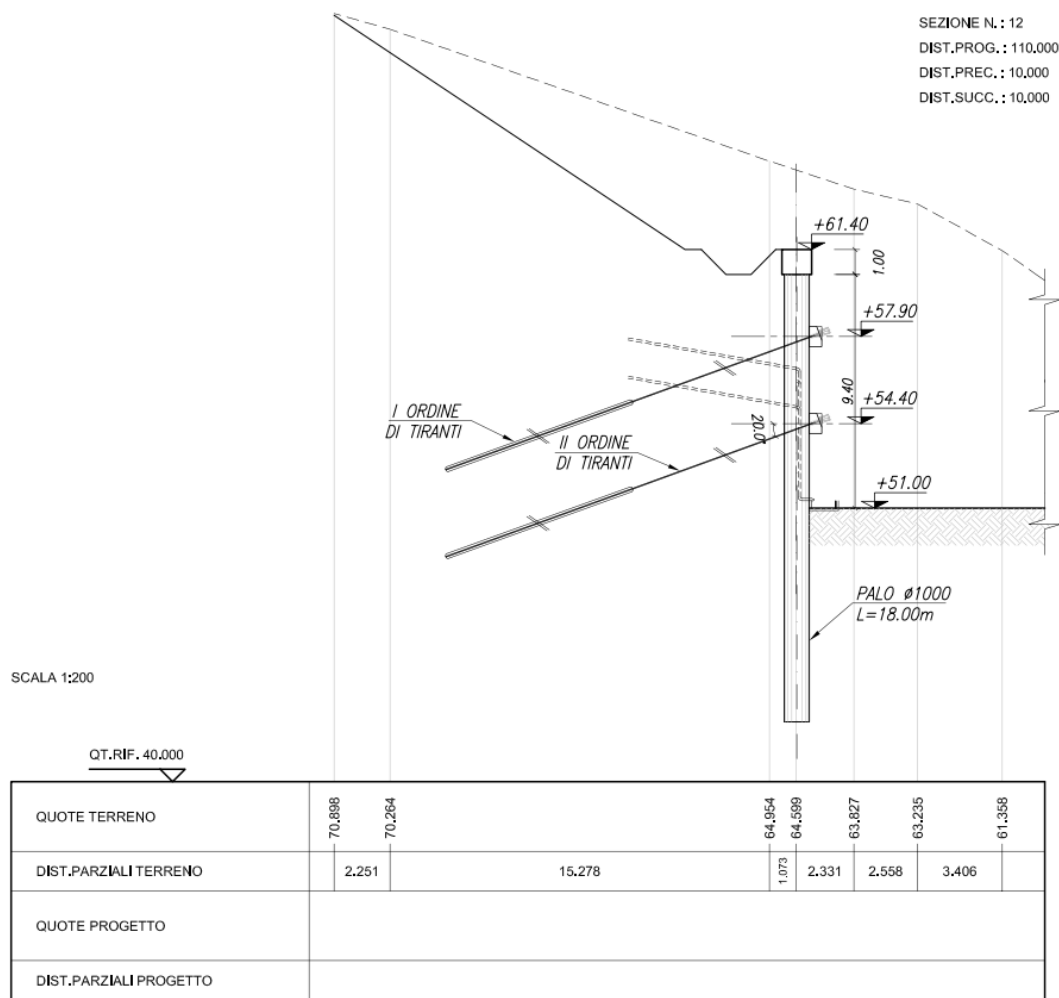


Figura 2.40 Sezione 12 paratia due ordini tiranti

Le analisi di dimensionamento e verifica della paratia sono state condotte mediante la creazione di un modello geotecnico capace di fornire una rappresentazione della struttura e del terreno dell'area da essa interessata. A tale scopo vengono riportati di seguito i risultati delle prove SPT in foro e di quelle di laboratorio effettuate sia per gli strati della coltre detritica che per il substrato roccioso inferiore (Figure 2.41, 2.42, 2.43 e 2.44). Questi dati risalgono a campioni relativi a sondaggi della campagna di indagine del 2015, eseguita propriamente a supporto del progetto esecutivo dell'opera. Si ricorda infatti che tale primo progetto dell'opera da parte dello studio "3TI Progetto Italia Ingegneria Integrata Spa" risale ai primi mesi del 2016. Pertanto, sulla base di tali dati sono stati definiti dei range per i parametri geotecnici necessari a caratterizzare il modello sul quale poi svolgere i calcoli. Tra di loro sono stati definiti il peso specifico del terreno naturale γ_n , la coesione efficace c' , la resistenza al taglio non drenata c_u , l'angolo di attrito interno ϕ , e il modulo di elasticità E' (Figura 2.45). Accanto alle prove di taglio diretto e alle prove triassiali consolidate non drenate, già illustrate nelle tabelle precedenti, un contributo significativo ai fini della caratterizzazione dei parametri geotecnici stimati è stato fornito dalle prove pressiometriche e dilatometriche. Tuttavia, non si dispone della documentazione tecnica relativa a tali prove, pertanto non verranno illustrate in questo documento di tesi.

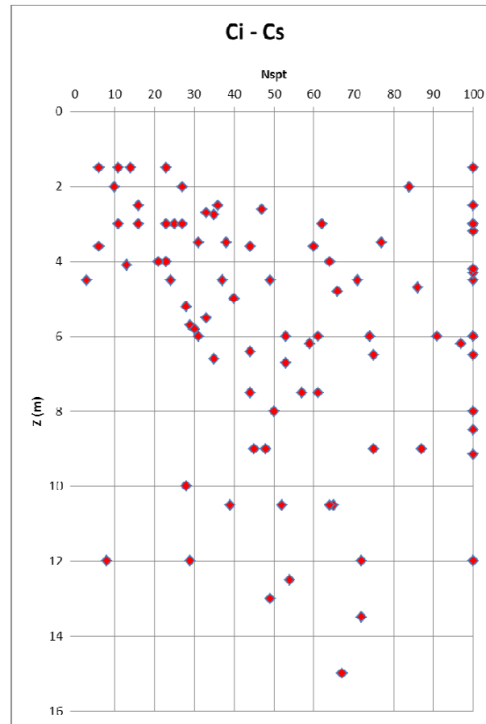


Figura 2.41 Prove SPT unità Cs-Ci

IDENTIFICAZIONE			CARATTERISTICHE FISICHE							
Sond	Camp.	Prof. media	W_n	e	S_r	n	γ_n	γ_d	γ_s	γ_{sat}
		m	%	%	%	%	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³
SE_2	CI1	3.25	30.6	0.9	92	0.4737	18.6	14.2	26.49	18.9
SE_2	CD1	8.65	13.67	0.43	86	0.3	21.5	18.9	26.49	21.9
SE_2	CD2	11.4	10.64	0.46	62	0.32	20.4	18.4	26.49	21.6
SE_6	CR2	11.2	10.65	0.34	85	0.25	22.3	20.2	26.49	22.7
SE_6	CR1	7.5	11.8	0.58	55	0.37	19.1	17.1	26.49	20.8
SE_7	CI2	3.5	16.4	0.63	71	0.39	19.3	1.66	26.49	20.4
SE_7	CI3	5	18.79	0.64	79	0.39	19.5	16.4	26.49	20.3
SE_7	CR1	4.5	11	0.42	70	0.3	21	1.89	26.49	21.9
SE_7	CR2	7.2	2.2	0.35	17	0.26	20.4	20	26.49	22.6
SE_8	CR1	4.5	12	0.43	75	0.3	21.1	18.9	26.49	21.9
SE_8	CR2	5.3	4.5	0.35	35	0.26	20.9	20	26.49	22.6
SE_8	CI2	3	10.16	0.41	67	0.29	21.1	19.2	26.49	22.1
SE_8	CI3	5	8.47	0.39	59	0.28	21.1	19.5	26.49	22.3

IDENTIFICAZIONE			CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE					CARATTERISTICHE DI CONSISTENZA				TAGLIO DIRETTO	
Sond	Cam p.	Prof. media	G	S	L	A	Class. U.S.C.S.	Limiti di Atterberg				c' (kPa)	ϕ' (°)
		m	%	%	%	%		LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC		
SE_2	CI1	3.25	9.6	4.7	44	41.7	CL	40.8	21.6	19.2	0.53	4	23.1
SE_2	CD1	8.65	26.8	20.9	18.6	33.8	CL	24.4	10.5	13.9	0.77	10	33.1
SE_2	CD2	11.4	37.4	30.9	18.2	13.4	CL	23.9	17.1	6.8	1.95	8	30
SE_6	CR2	11.2	30.8	25.2	23.4	20.6	CL	24.1	13.1	10.9	1.23		
SE_6	CR1	7.5	20.7	34	24.6	20.6	CL	18.2	13.5	4.6	1.38		
SE_7	CI2	3.5	15.3	30.9	44.4	9.5	CL	20.4	16.7	3.7	1.07	6	35.4
SE_7	CI3	5	16.2	36.5	27.4	19.9	CL	20.1	17.4	2.6	0.49	8	30.9
SE_7	CR1	4.5	16.1	21.1	47.3	15.5	CL	20.1	15.1	5	1.83		
SE_7	CR2	7.2	37.7	29.3	24.2	8.8	CL	19.3	16.3	3	5.74		
SE_8	CR1	4.5	10.1	8.7	50.2	31.1	ML	28.7	22.4	6.3	2.66		
SE_8	CR2	5.3	30.6	22.2	34.8	12.4	CL	29.1	11.2	17.9	1.4		
SE_8	CI2	3	22.7	59.1	7.6	10.6	CL	30.7	18.7	12	1.71	12	33.3
SE_8	CI3	5	30.8	5.3	41.5	22.4	CL	23.8	10.9	12.9	1.19	32	22.4

Figura 2.42 Prove laboratorio unità Cs-Ci

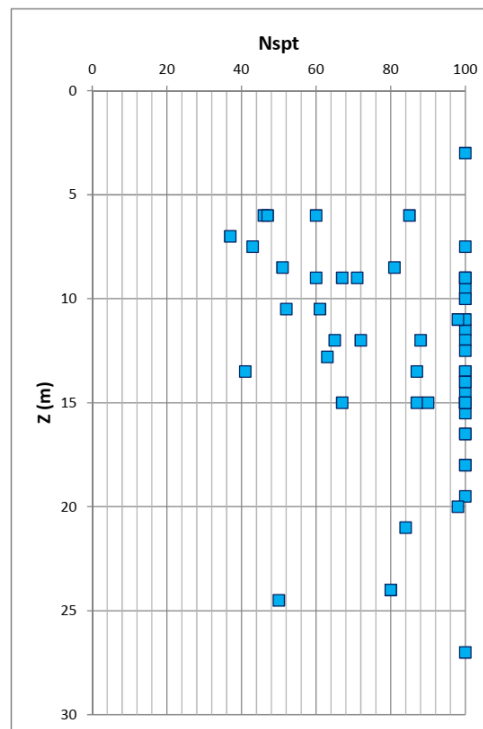


Figura 2.43 Prove SPT unità Salt-Sas

IDENTIFICAZIONE			CARATTERISTICHE FISICHE							
Sond	Camp.	Prof. media	W_n	e	S_r	n	γ_n	γ_d	γ_s	γ_{sat}
		m	%		%	%	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³
SE_2	CD3	17.15	7.22	0.33	60	0.25	21.8	20.4	26.49	22.8
SE_2	CD4	21.5	6.46	0.2	86	0.17	23.9	22.5	26.49	24.1
SE_2	CD5	31.45	10.9	0.33	89	0.25	22.5	20.3	26.49	22.8
SE_7	CD1	12.2	16.6	0.45	35	0.37	22	18.25	27	23.4
SE_7	CD1	12.2	3.5	0.27	35	0.21	22	2.13	26.49	23.4
SE_8	CD1	11	6.8	0.34	55	0.25	21.6	20.2	26.49	22.7

IDENTIFICAZIONE			CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE				CARATTERISTICHE DI CONSISTENZA				Taglio diretto		Prova triassiale consolidata non drenata	
Sond	Camp.	Prof. media	G	S	L	Class. U.S.C.S.	Limiti di Atterberg							
		m	%	%	%	-	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC	c' (kPa)	ϕ' (°)	c (KPa)	ϕ (°)
SE 2	CD3	SE 2	42.3	12.9	28.9	CL	25	15.4	9.7	1.84				
SE 2	CD4	SE 2	31.7	24.5	25.9	CL	21.4	10.4	10.9	1.36	27	35.4		
SE 2	CD5	SE 2	14.9	31.3	18	CL	14	9.6	4.4	0.7	45	26.6		
SE 7	CD1	SE 7	10.8	15.3	58.3	CL	23.3	15.6	7.7	0.87			72	27
SE 7	CD1	SE 7	10.8	15.3	58.3	CL	23.3	15.6	7.7	2.56			72	27
SE 8	CD1	SE 8	23.1	10.6	40.5	CL	25.3	11.8	13.5	1.37			48	28

Figura 2.44 Prove laboratorio unità Salt-Sas

	Unità	γ_n (kN/m ³)	c' (kPa)	c_u (kPa)	ϕ (°)	E' (MPa)
1	Cs-Ci	19 - 21	0 - 15	80 - 150	28 - 35	40 - 60
2	Salt-	21 - 23	30 - 50	200 - 300	23 - 27	100 - 150
3	Sas	22 - 24	70 - 100	> 300	27 - 29	150 - 300

Figura 2.45 Tabella range parametri geotecnici progetto due ordini tiranti

Nella definizione di tali range sono stati tenuti in considerazione la totalità dei dati a disposizione, scegliendo valori minimi e medi e operando in maniera cautelativa. Il modello geotecnico è stato quindi implementato nel software “Plaxis 2D”, tramite il quale sono stati eseguiti i calcoli progettuali necessari all’analisi strutturale dell’opera. Le operazioni sono state effettuate sulla base della sezione ritenuta più gravosa, caratterizzata dalla minore lunghezza dei pali (18m +1 m trave coronamento), maggiore altezza di scavo (10,40 m) e maggiore pendenza del terreno a monte. Le caratteristiche dei pali e dei tiranti sono già state riportate all’inizio del capitolo nella descrizione preliminare del progetto. Alla luce delle considerazioni riportate in questo paragrafo, il progettista ha scelto di impostare un modello geotecnico sulla base dei seguenti valori dei parametri geotecnici (Figura 2.46). Il software di calcolo ha permesso un’analisi del terreno tramite elementi finiti triangolari a 15 nodi, con una stratigrafia costituita dalle quattro unità già descritte ed utilizzando per ogni strato un modello di resistenza del tipo Mohr-Coulomb. Le misure piezometriche sono state sfruttate al fine di ipotizzare un livello di falda, fissato ad una profondità di 6 m da p.c.

TERRENI	γ	c'	ϕ'	E
	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]
Strato 1	20	5	30	40
Strato 2	20	5	30	60
Strato 3	22	30	25	100
Strato 4	22	50	27	150

Figura 2.46 Tabella parametri geotecnici scelti progetto due ordini tiranti

In realtà sono stati elaborati due modelli che differiscono esclusivamente per la presenza di un sovraccarico accidentale a monte della paratia. Per il resto i carichi considerati sono gli stessi (peso proprio struttura, spinta terreno, azione sismica). Nel calcolo dell’azione dovuta al sisma si è adottato un approccio del tipo pseudo-statico, considerando forze statiche equivalenti e calcolando l’incremento di spinta causato dal sisma usufruendo della teoria di Mononobe e Okabe. Nella costruzione dei modelli si è tenuto conto delle varie fasi realizzative, partendo da quella iniziale geostatica, ai vari scavi per gli ordini di tiranti, fino alla configurazione di fondo scavo considerando l’azione sismica. I calcoli sono stati svolti in relazione a stati limite ultimi di tipo geotecnico e strutturale, valutando inoltre il comportamento della struttura nei confronti degli spostamenti e delle fessurazioni (SLE), in accordo alla NTC 08. Il dimensionamento strutturale dell’opera è stato eseguito utilizzando la combinazione di coefficienti A1-M1-R1, mentre la valutazione dell’instabilità della paratia per il raggiungimento della resistenza del terreno è stata svolta con la combinazione A2-M2-R1.

Le verifiche nei confronti dei tiranti sono state condotte con la combinazione A1-M1-R3 e quelle relative alla stabilità globale terreno-opera con la A2-M2-R2. Per quest'ultima tipologia di verifica il progettista ha considerato un modello geotecnico con parametri leggermente diversi dal precedente, ipotizzando valori di coesione efficace c' maggiori per tutte le unità e lasciando invariati i rimanenti parametri.

La verifica di instabilità globale terreno-opera è stata effettuata sulla base della teoria dell'equilibrio limite con il metodo di Bishop semplificato. Tale metodo permetteva di individuare una superficie di scorrimento limite del terreno, il quale veniva così suddiviso in conci. Ogni concio era sottoposto a diverse forze, in particolare il criterio di Bishop semplificato ipotizzava che le forze interconco (ovvero quelle che si scambiavano i conci tra di loro risentendo della reciproca adiacenza) avessero direzione orizzontale. Questa verifica è stata eseguita mediante il software SLOPE/W considerando un comportamento meccanico del terreno di tipo rigido-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Il codice di calcolo ha generato una quantità elevata di superfici di scivolamento circolari, calcolando il coefficiente di sicurezza ottimale FS, dato dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile e quella propriamente mobilitata dalla porzione di terreno considerato.

Nel complesso le analisi condotte hanno dimostrato la convergenza dei calcoli, con sollecitazioni agenti (taglio T_{max} , momento M_{max} , azione assiale nei tiranti N_{max} e tensioni efficaci del terreno σ'_x, σ'_y) e spostamenti massimi compatibili con le ipotesi progettuali. Anche le verifiche di stabilità globale hanno dato esito positivo, restituendo un fattore di sicurezza $FS = 1,101$ appena maggiore di quello minimo $FS_{min} = 1,100$. Tuttavia, questo ridotto margine di sicurezza aveva fatto destare perplessità riportate alla DL (direzione lavori) nel corso di alcune riunioni datate luglio 2016. A scopo esemplificativo vengono riportati i due modelli con e senza sovraccarico implementati su "PLAXIS 2D", relativi alla fase di scavo finale (Figure 2.47 e 2.48)

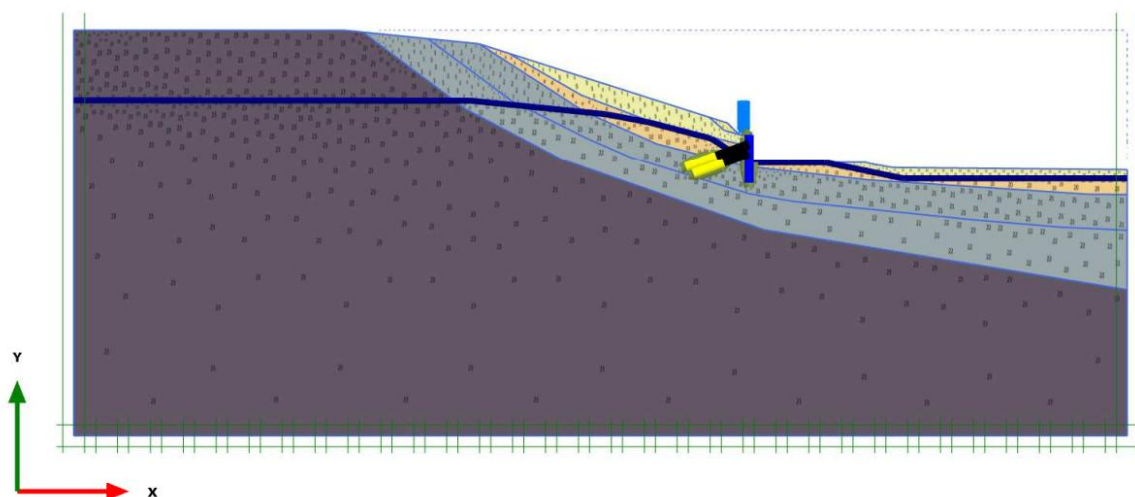


Figura 2.47 Modello geotecnico due ordini tiranti con sovraccarico fase di scavo finale

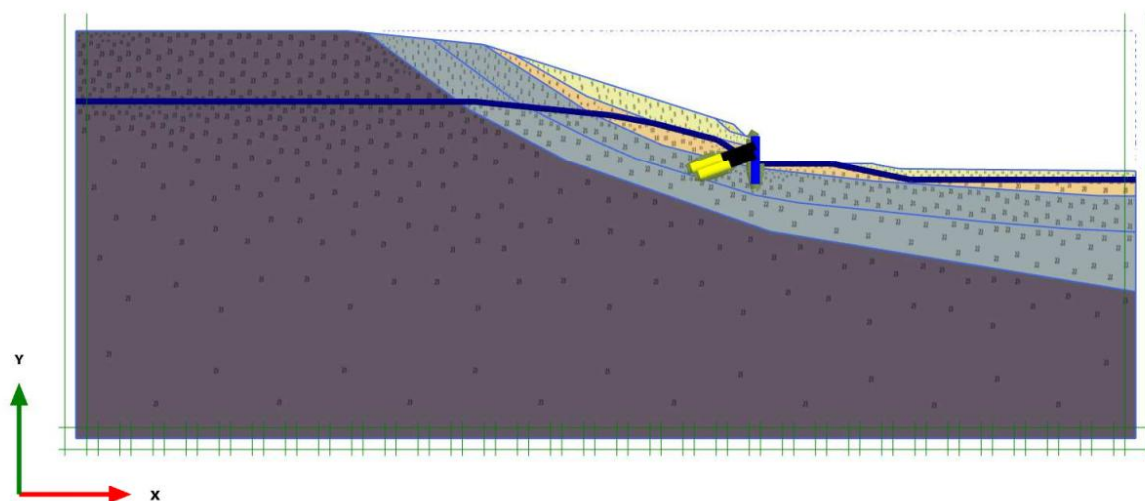


Figura 2.48 Modello geotecnico due ordini tiranti senza sovraccarico fase di scavo finale

2.4.2 Problematiche riscontrate durante l'esecuzione dei lavori

I lavori per la realizzazione della paratia sono iniziati a marzo 2017 secondo il progetto esecutivo firmato dallo studio 3TI, riportato nel paragrafo precedente. Gli 89 pali previsti sono stati completati a luglio 2017 e successivamente sono iniziati i lavori per la realizzazione del primo ordine di tiranti, tramite scavo preliminare, perforazioni ed iniezioni. I primi 37 tiranti, situati alla quota di +59,70 m.s.l.m., sono stati così completati a novembre 2017.

Tuttavia, risale proprio a tale periodo, la richiesta da parte della D.L. (dell'epoca) di una verifica dell'opera così come progettata da 3TI, sottolineando la necessità di intervenire con una variante progettuale. Dato che al momento della richiesta erano stati realizzati i pali e il primo ordine di tiranti nella loro totalità, si era pensato all'aggiunta di un terzo ordine di tiranti ad una quota inferiore, integrato da un'ulteriore fila di drenaggi sub orizzontali.

Il nuovo progetto di variante è stato predisposto ad opera del prof. Ing. Renato Vitaliani dello studio "Iconia Ingegneria Civile" di Padova. Il terzo ordine era previsto da progetto ad una quota inferiore di 3,50 m rispetto al secondo (+51,90 m.s.l.m.), per un totale di 39 tiranti inclinati di 20° rispetto all'orizzontale e caratterizzati da una lunghezza complessiva di 18 m (11 m di bulbo di fondazione e 7 m di tratto libero). Inoltre, era previsto un approfondimento degli scavi fino alla quota finale di +50,40 m.s.l.m. La variante così presentata è stata depositata presso lo Sportello Unico del Comune della Spezia in data 18/05/2018 prot. 59843, ricevendo l'autorizzazione dal competente Servizio Zone Sismiche della Provincia della Spezia in data 05/07/2018 prot. 80541. Nel paragrafo successivo vengono mostrati i calcoli effettuati dallo studio "Iconia Ingegneria Civile", con lo scopo preliminare di verifica del progetto esecutivo ad opera 3TI e successivamente per il dimensionamento della struttura così come da variante progettuale con tre ordini di tiranti.

Tuttavia, preliminarmente in questo paragrafo si riporta un piccolo excursus riguardante l'esecuzione dei lavori, segnalando alcune problematiche riscontrate nel tempo.

Per ogni elemento strutturale sono stati redatti appositi piani di controllo qualità PCQ, sia per quanto riguarda i pali, i tiranti e i manufatti in c.a. (travi coronamento e travi contrasto tiranti) che per i materiali impiegati (cls, acciaio). Inoltre, va riportato che su alcuni pali presi a campione sono state eseguite prove cross-hole (tutte accettabili) e anche la presenza di un campo prova costituito da tre tiranti ad ovest della paratia, sui quali sono state eseguite le verifiche con esito positivo.

Per i tiranti definitivi previsti in fase di progetto sono state riscontrate delle problematiche durante l'esecuzione dei lavori, in particolare per i tiranti 39,43,52 del secondo ordine e 80,84 del terzo ordine. Tutti i tiranti infatti sono stati sottoposti al controllo di accettazione tramite la modalità indicata dalle raccomandazioni AGI-AICAP. I tiranti 39,43 e 52 non hanno superato tali controlli, sfilandosi prima di arrivare al carico limite. È stato così predisposto un intervento di ripristino ad opera del prof. Ing. Vitaliani dello studio "Iconia", volto al rifacimento dei suddetti tiranti sulla base di differenti ipotesi progettuali [14].

L'intervento prevedeva di rimpiazzare i tiranti difettosi con altri nuovi ad 8 trefoli, con inclinazione rispetto all'orizzontale di 30° e lunghezza complessiva di 27 m (11 m di tratto libero e 16 m di bulbo di fondazione). La geometria di progettazione permetteva ai nuovi bulbi di non interferire con quelli vecchi, inoltre era previsto un pretensionamento di 400 kN. Tali modifiche progettuali si allargavano anche ai tiranti 78,82 e 91 del terzo ordine che si trovavano in corrispondenza di quelli sfilatisi. Anche questi, quindi, dovevano essere ripristinati con le stesse modalità e caratteristiche citate per i tiranti 39,43 e 52. La documentazione tecnica relativa all'intervento di ripristino sopra citato è stata depositata come variante non sostanziale al progetto presso la provincia della Spezia in data 15/01/2019 n° 5469, protocollata al n° 1410 il 18/01/2019. Tale intervento è stato eseguito e i nuovi tiranti hanno dato tutti esito positivo nei confronti dei controlli di tesatura.

Una problematica analoga è stata riscontrata anche per i tiranti 80 e 84 del terzo ordine, come già accennato in precedenza. Anche per questi tiranti è stato previsto un intervento di ripristino che prevedeva di riforare gli stessi eseguendoli con inclinazione di 30° , a 8 trefoli, con una lunghezza di ancoraggio complessiva pari a 27 m (11 m di tratto libero e 16 m di bulbo di fondazione), pretensionandoli con uno sforzo di 400 kN. La nuova geometria di progetto permetteva ai nuovi bulbi di non trovarsi a contatto con quelli vecchi e l'operazione di riforatura risultava compatibile staticamente con l'armatura della trave di ripartizione. Tuttavia, a differenza del precedente, tale intervento ad oggi non è stato ancora depositato e realizzato causa intervenuta risoluzione contrattuale.

Nel complesso va riportato che nel corso dell'esecuzione dei lavori la D.L. aveva rinvenuto diverse non conformità relative a modalità esecutive di pali e tiranti difformi da quelle progettuali, poi successivamente chiuse e risolte a seguito di alcuni confronti. Fanno eccezione le non conformità inerenti ai tiranti 80 e 84.

2.4.3 Progetto esecutivo di variante

Come già anticipato nel paragrafo precedente, a novembre 2017 lo studio “Iconia Ingegneria Civile” di Padova, sotto la supervisione del prof. Ing. Renato Vitaliani, è stato incaricato di eseguire una verifica dell’opera precedentemente progettata dallo studio 3TI di Roma. Nel fare ciò sono state introdotte differenti ipotesi progettuali, legate al modello geotecnico di riferimento e ai valori dei relativi parametri geotecnici assunti (Figura 2.49) [15].

TIPOLOGIA DI TERRENO	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)
1: Cs	20	7	30	40
2: Ci	20	7	30	60
3: Salt	22	40	25	100
4: Sas	22	60	27	150

Figura 2.49 Tabella parametri geotecnici variante tre ordini tiranti

Si segnala che il progettista dello studio padovano aveva sollevato dei dubbi riguardo alle variazioni di alcuni valori considerati nel precedente progetto esecutivo, dove i calcoli di dimensionamento strutturale e quelli per la verifica della stabilità globale terreno-opera erano stati effettuati sulla base di due modelli diversi.

Anche il calcolo dell’azione sismica effettuato con il metodo pseudo-statico adottando il criterio di Mononobe e Okabe, era stato messo in discussione. Si riteneva infatti che tali ipotesi fossero congruenti in presenza di struttura deformabile, caratteristica che non appartiene alla berlinese in oggetto essendo ancorata almeno su due livelli. Per opere di sostegno rigide il metodo di Wood risultava maggiormente significativo. In realtà l’ipotesi migliore riguardava una procedura semi automatica che contemplava la variazione delle spinte partendo da un valore maggiormente conservativo (Wood), fino ad un valore minimo (Mononobe e Okabe), a seconda del livello di deformabilità della paratia.

La verifica dell’opera è stata eseguita nei confronti di quattro differenti sezioni tipo trasversali, a differenza di quanto svolto nel progetto esecutivo, dove i calcoli erano stati effettuati sulla base di un’unica sezione ritenuta la più gravosa. Tale ipotesi è stata ritenuta dal nuovo progettista non cautelativa, in quanto trascurante alcune importanti condizioni al contorno come il profilo di sbancamento a valle della paratia (più marcato nella zona sud-ovest) e l’eterogeneità del profilo geologico-geotecnico. Le quattro sezioni tipologiche 2, 2A, 4, 6 sono riportate nelle Figure 2.50 e 2.51, rispettivamente in planimetria e prospetto longitudinale [16] [17].

Le analisi di verifica della paratia svolte dallo studio “Iconia Ingegneria Civile” sono state effettuate mediante il codice di calcolo “ParatiePlus17”, così come quelle di dimensionamento successivamente eseguite considerando la variante progettuale con tre ordini di tiranti. Il software permette la rappresentazione della paratia con elementi tipo “beam” dotati di rigidezza flessionale EJ, la quale interagisce con il terreno circostante schematizzato alla “Winkler” (costituito da un insieme di molle ciascuna con la propria rigidezza).

Le spinte del terreno sono state modellate in riferimento alla teoria di Lancellotta (2007) per il coefficiente di spinta passivo k_p (assumendo un valore dell'angolo di attrito terreno-paratia δ uguale a quello di attrito interno ϕ), e utilizzando Coulomb per il coefficiente di spinta attiva k_a . Il modello è stato inoltre considerato in relazione alle varie fasi realizzative, analogamente a quanto fatto nelle analisi in Plaxis 2D per il progetto esecutivo.

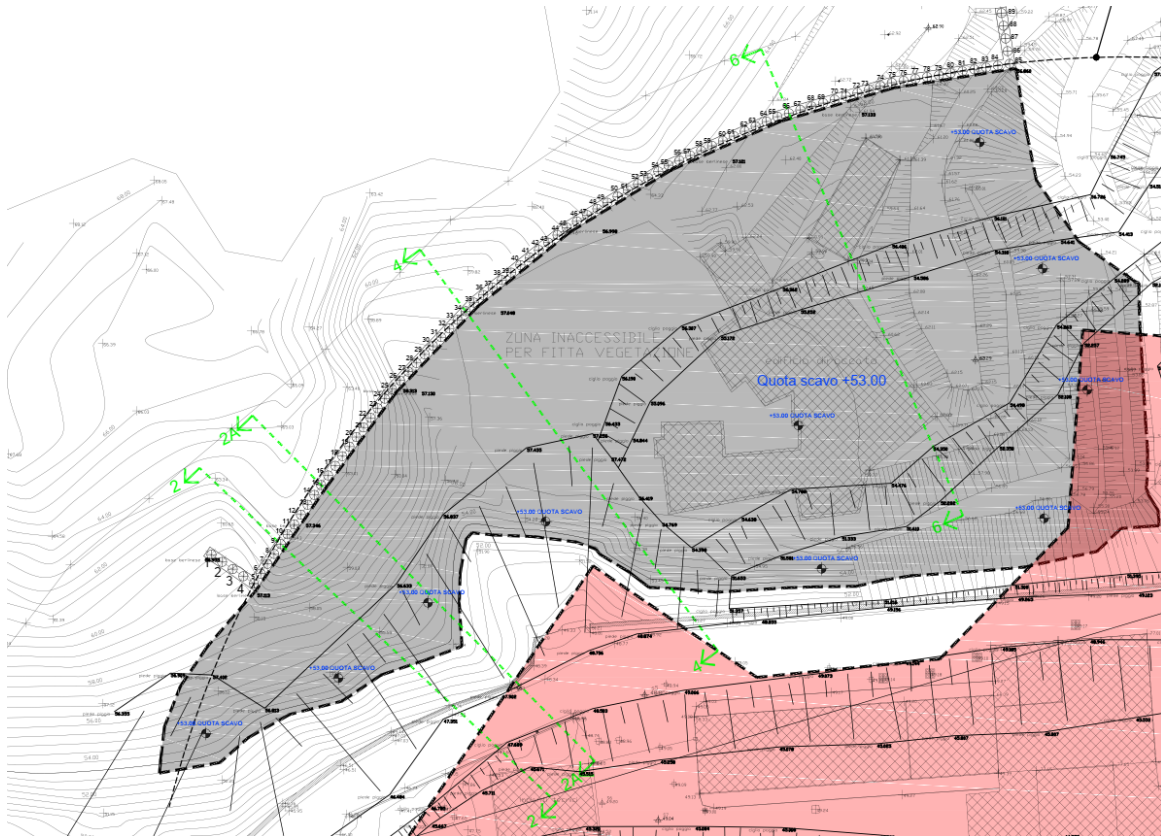


Figura 2.50 Dettaglio planimetria berlinese con le quattro sezioni tipo

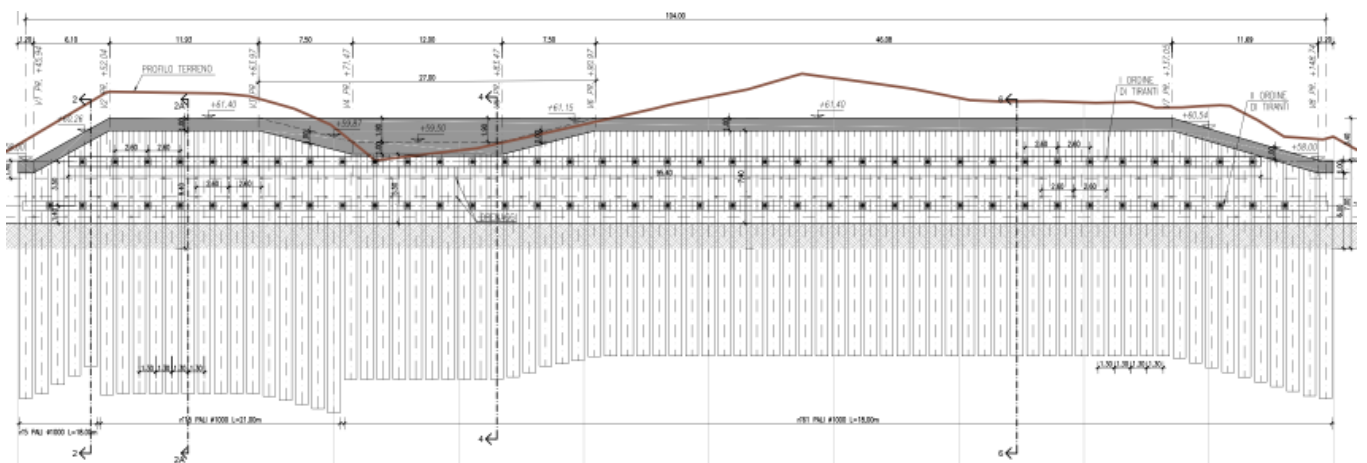


Figura 2.51 Dettaglio profilo berlinese con le quattro sezioni tipo

I calcoli effettuati sono stati svolti nel rispetto della normativa NTC 08 con il metodo degli stati limite. Il dimensionamento strutturale dell'opera è stato eseguito facendo riferimento alle combinazioni di coefficienti 1 e 2 dell'approccio 1, rispettivamente A1-M1-R1 e A2-M2-R1. I tiranti di ancoraggio sono stati verificati con la combinazione A1-M1-R3, mentre la verifica di stabilità globale terreno-paratia è stata effettuata con la combinazione A2-M2-R2. Come detto in precedenza, tali analisi sono state svolte sulle quattro sezioni tipo ritenute significative ai fini del comportamento strutturale dell'opera. I risultati delle verifiche eseguite nei confronti di queste sezioni, schematizzate come da progetto esecutivo, sono riportati nelle tabelle sottostanti di Figura 2.52 e 2.53.

Soluzione Progetto Esecutivo (sollecitazioni/m)									
	Paratia						1° tirante	2° tirante	3° tirante
	$M_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kNm/m]	$M_{Ed_max_A2M2}$ (statica+sismica) [kNm/m]	$T_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/m]	$T_{Ed_max_A2M2}$ (statica+sismica) [kN/m]	$M_{Ed_max_ESERCIZIO}$ [kNm/m]	$S_{post_ESERCIZIO}$ [mm]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/m]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/m]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/m]
Sezione2	453	1210	175	373	223	2,6	201	210	-
Sezione2A	571	1555	210	484	286	5,0	217	241	-
Sezione4	298	793	156	245	228	2,0	201	207	-
Sezione6	952	Non converge	295	Non converge	528	10,0	257	286	-

Soluzione Progetto Esecutivo (sollecitazioni/palo)									
	Paratia						1° tirante	2° tirante	3° tirante
	$M_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kNm/palo]	$M_{Ed_max_A2M2}$ (statica+sismica) [kNm/palo]	$T_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/palo]	$T_{Ed_max_A2M2}$ (statica+sismica) [kN/palo]	$M_{Ed_max_ESERCIZIO}$ [kNm/palo]	$S_{post_ESERCIZIO}$ [mm]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/tirante]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/tirante]	$R_{Ed_max_A1M1}$ (statica+sismica) [kN/tirante]
Sezione2	589	1573	228	485	290	2,6	523	546	-
Sezione2A	742	2022	273	629	372	5,0	564	627	-
Sezione4	387	1031	203	319	296	2,0	523	538	-
Sezione6	1238	Non converge	384	Non converge	686	10,0	668	744	-

Figura 2.52 Risultati verifiche strutturali configurazione come da progetto esecutivo

Progetto Esecutivo			
	R_d / E_d		γ_R
Sezione2	1.065	<	1.1
Sezione2A	1.094	<	1.1
Sezione4	1.152	>	1.1
Sezione6	1.278	>	1.1

Figura 2.53 Risultati verifica stabilità globale terreno-opera configurazione come da progetto esecutivo

Le verifiche effettuate dallo studio “Iconia Ingegneria Civile” hanno evidenziato alcune criticità nei confronti delle soluzioni proposte in sede di progetto esecutivo ad opera “3TI”. In particolare, con le nuove ipotesi progettuali, alcune sollecitazioni flettenti di calcolo sono risultate maggiori di quelle resistenti. Per la sezione 6 in particolare l’analisi numerica non converge e non assicura la stabilità locale della struttura (per la combinazione A2-M2-R1 statica + sismica). Anche la verifica di stabilità globale terreno-opera ha restituito esito positivo soltanto parzialmente. Infatti, si vede che per le sezioni 2 e 2A il rispettivo fattore di sicurezza FS risulta inferiore al valore minimo fissato da normativa, $FS_{min} = 1,1$, pertanto i risultati di tali analisi non soddisfano i requisiti minimi di sicurezza. Si rende necessaria quindi una revisione progettuale, firmata dallo studio “Iconia” tramite la variante di progetto introdotta all’inizio del capitolo di questo documento. Le quattro sezioni tipo sono state così aggiornate, aggiungendo un terzo ordine di tiranti a quota +51,90 m.s.l.m. e un ulteriore ordine di dreni con le stesse caratteristiche dei precedenti (Figura 2.54) [18].

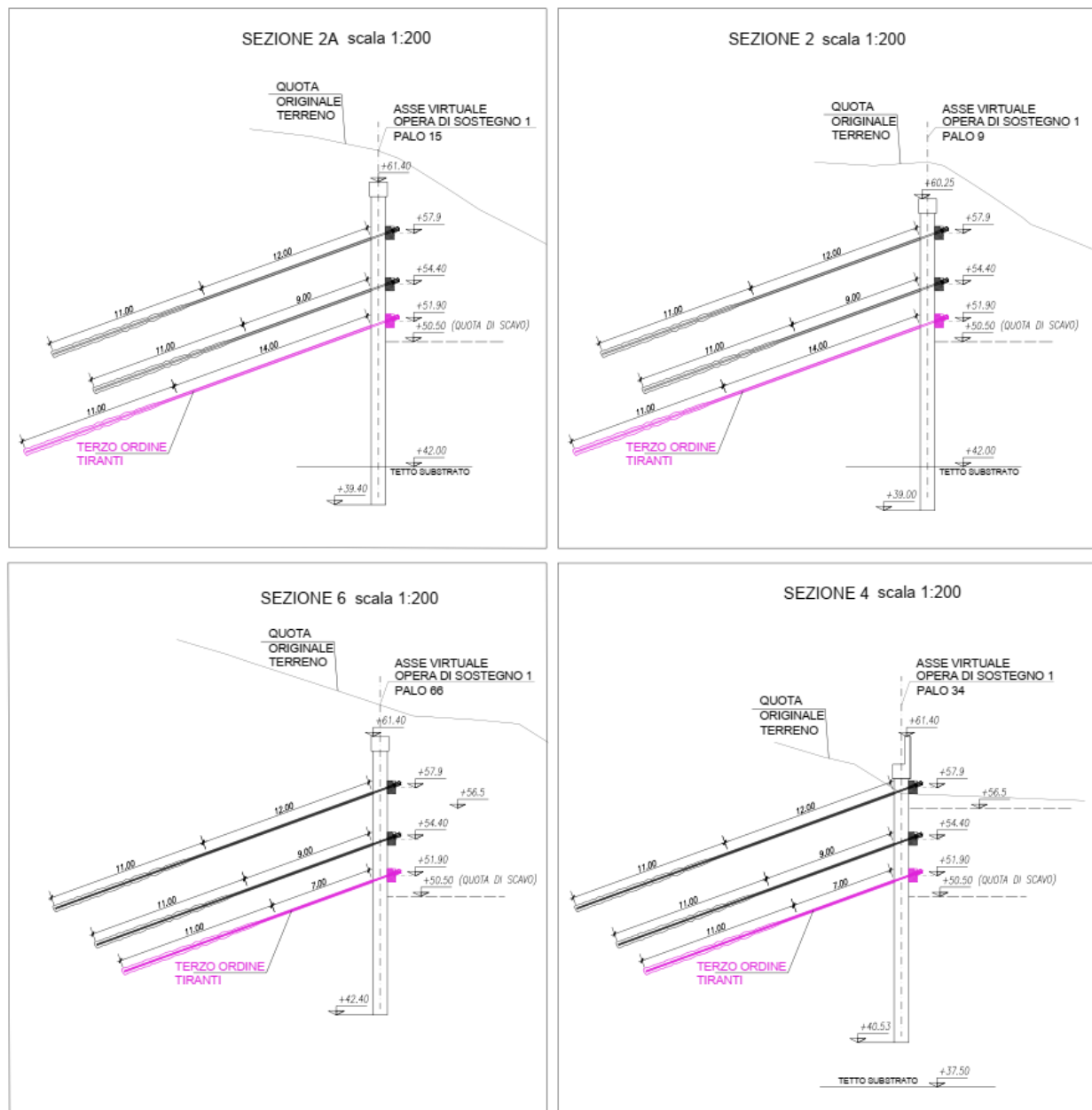


Figura 2.54 Sezioni tipo progetto variante con

Le analisi di dimensionamento e verifica delle quattro sezioni nella nuova configurazione progettuale sono state svolte con le stesse modalità di quelle precedenti relative alla soluzione proposta da progetto esecutivo.

Il modello geotecnico di ogni sezione con le sue caratteristiche è stato implementato nel software “ParatiePlus17” e sono stati eseguiti i calcoli in accordo alla normativa di riferimento. I risultati sono riportati nelle tabelle seguenti di Figura 2.55 e 2.56.

Soluzione Progetto di Adeguamento (sollecitazioni/m)									
	Paratia						1° tirante	2° tirante	3° tirante
	M _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kNm/m]	M _{Ed_max_A2M2} (statica+sismica) [kNm/m]	T _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/m]	T _{Ed_max_A2M2} (statica+sismica) [kN/m]	M _{Ed_max_ESERCIZIO} [kNm/m]	S _{post_ESERCIZIO} [mm]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/m]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/m]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/m]
Sezione2	199	701	134	229	154	1,5	201	204	200
Sezione2A	230	895	156	292	177	2,3	202	207	200
Sezione4	217	294	129	136	167	1,5	204	206	204
Sezione6	358	893	184	354	276	3,5	204	212	200

Soluzione Progetto di Adeguamento (sollecitazioni/palo)									
	Paratia						1° tirante	2° tirante	3° tirante
	M _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kNm/palo]	M _{Ed_max_A2M2} (statica+sismica) [kNm/palo]	T _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/palo]	T _{Ed_max_A2M2} (statica+sismica) [kN/palo]	M _{Ed_max_ESERCIZIO} [kNm/palo]	S _{post_ESERCIZIO} [mm]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/tirante]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/tirante]	R _{Ed_max_A1M1} (statica+sismica) [kN/tirante]
Sezione2	259	911	174	298	200	1,5	523	530	520
Sezione2A	299	1164	203	380	230	2,3	525	538	520
Sezione4	282	382	168	177	217	1,5	530	536	530
Sezione6	465	1161	239	460	359	3,5	530	551	520

Fig. 2.55 Risultati verifiche strutturali nuova configurazione tre ordini tiranti

Progetto di Adeguamento			
	R_d / E_d		γ_R
Sezione2	1.112	>	1.1
Sezione2A	1.133	>	1.1
Sezione4	1.152	>	1.1
Sezione6	1.287	>	1.1

Fig. 2.56 Risultati verifica stabilità globale terreno-opera nuova configurazione tre ordini tiranti

Confrontando tali risultati con quelli precedenti relativi alla soluzione con due ordini di tiranti, si nota come la variante progettuale restituisca esito positivo nei confronti della totalità delle analisi svolte.

Nel dimensionamento e verifica strutturale della paratia, infatti, i calcoli mostrano una congruenza (intesa come rispetto dei limiti massimi) tra le caratteristiche di resistenza dei vari elementi strutturali e i valori di sollecitazione e spostamento agenti. Questo vale sia per i pali che per i tiranti di ancoraggio.

Anche la verifica di stabilità globale terreno-paratia risulta soddisfatta per tutte e quattro le sezioni di riferimento, con valori del fattore di sicurezza FS sempre maggiori di quello minimo.

Si riportano a scopo esemplificativo, per ogni sezione, le varie configurazioni di sollecitazione (M_{Ed} , T_{Ed} , R_{Ed}) e spostamenti ottenuti con la combinazione di calcolo A1-M1-R1 (Figure da 2.57 a 2.72).

SEZIONE 2

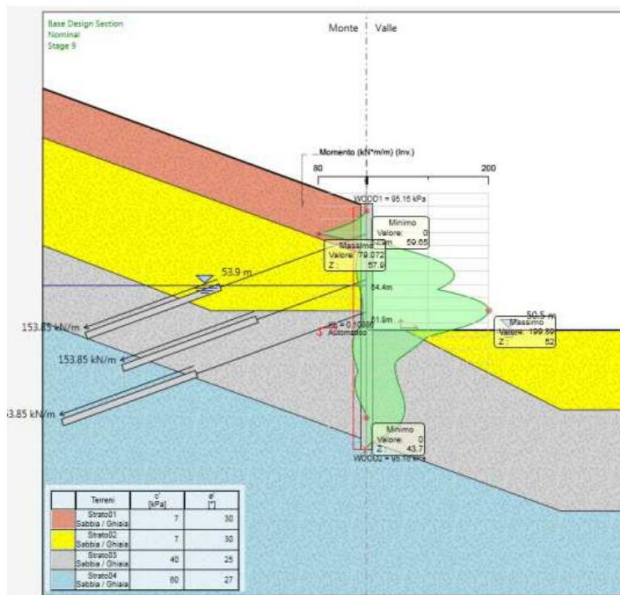


Figura 2.57 Involuppo M_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

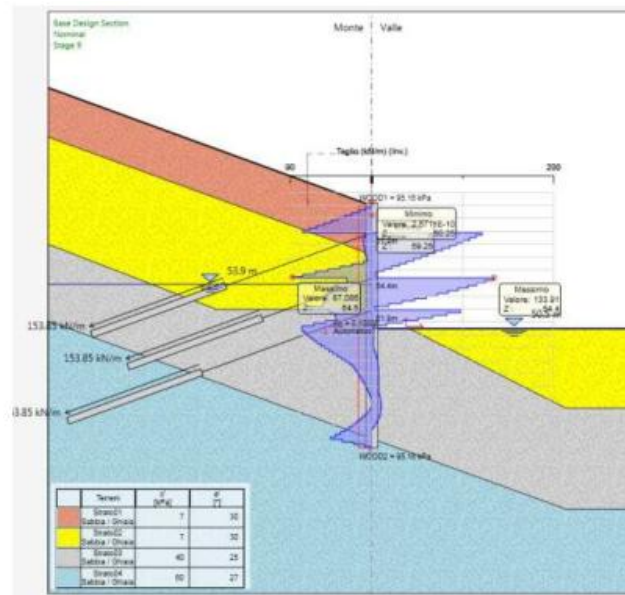


Figura 2.58 Involuppo T_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

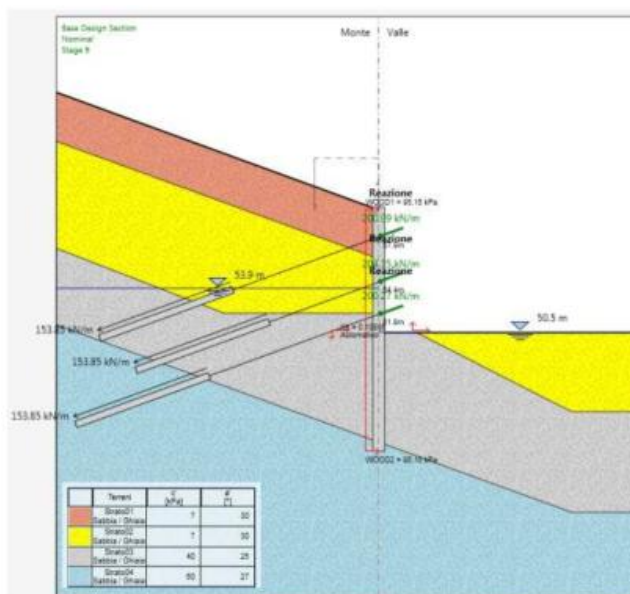


Figura 2.59 Involuppo R_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

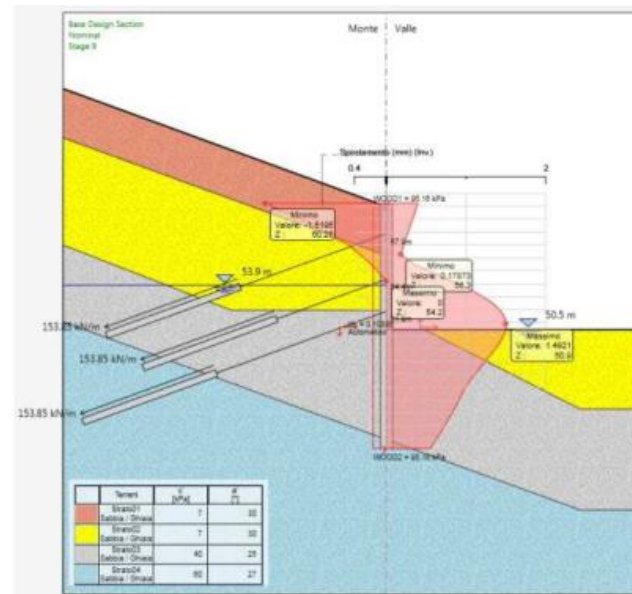


Figura 2.60 Diagramma spostamenti SLE

SEZIONE 2A

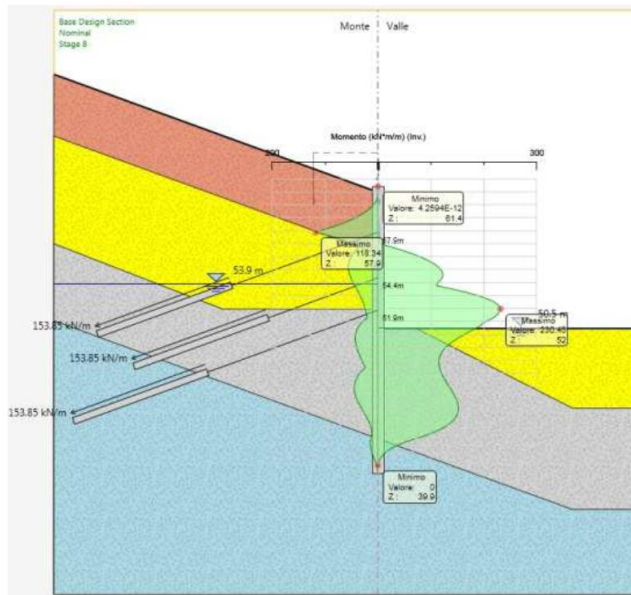


Figura 2.61 Involuppo M_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

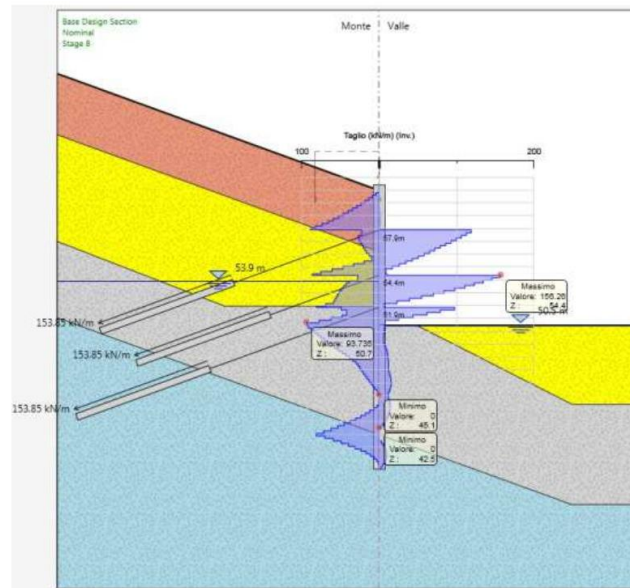


Figura 2.62 Involuppo T_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

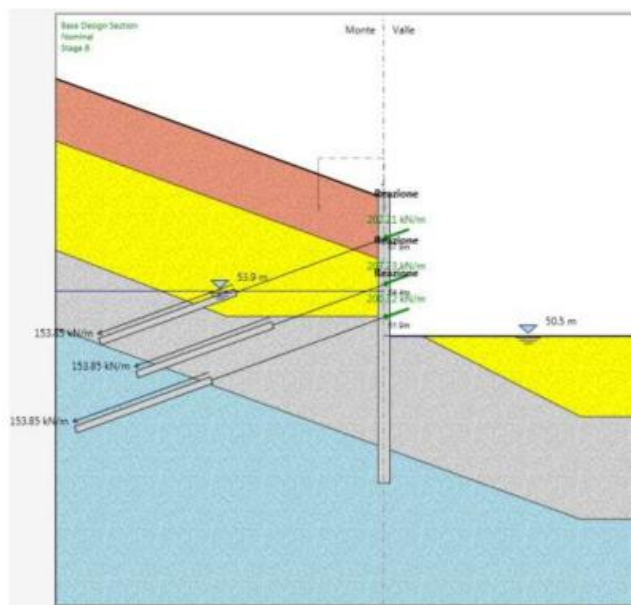


Figura 2.63 Involuppo R_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

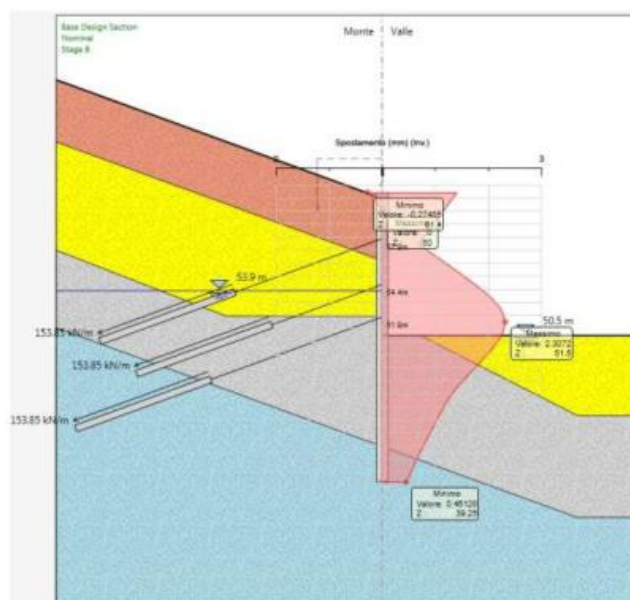


Figura 2.64 Diagramma spostamenti SLE

SEZIONE 4

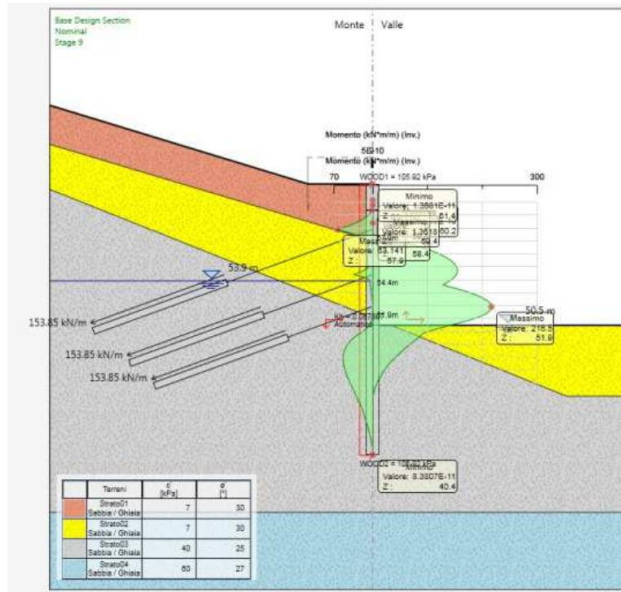


Figura 2.65 Involuppo M_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

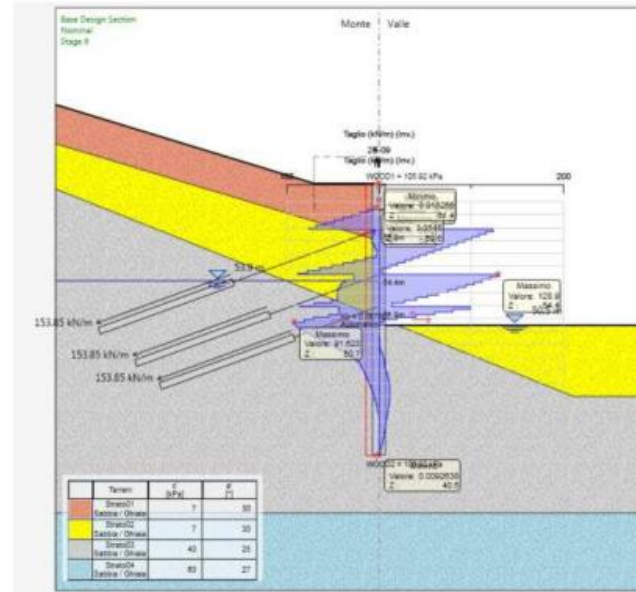


Figura 2.66 Involuppo T_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

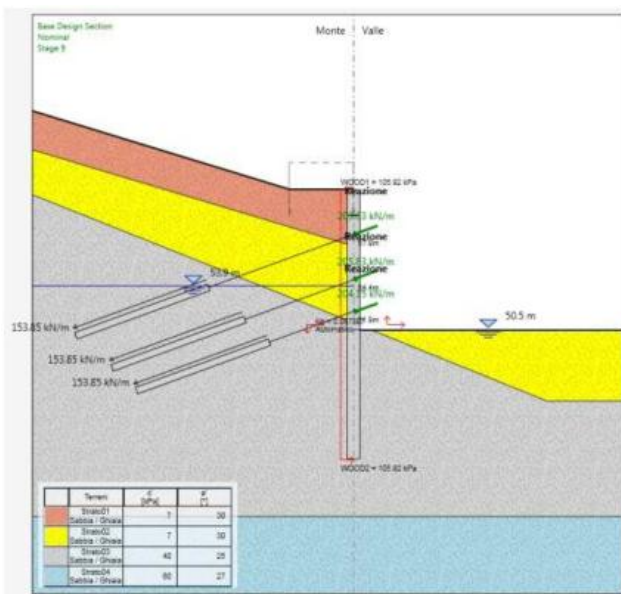


Figura 2.67 Involuppo R_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

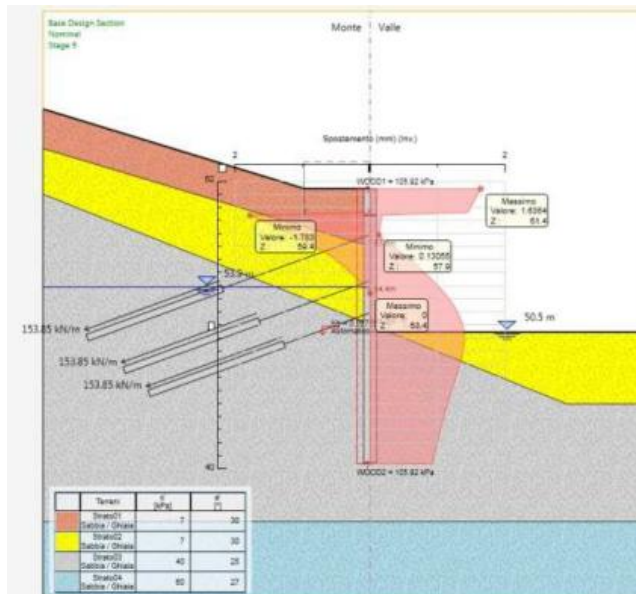


Figura 2.68 Diagramma spostamenti SLE

SEZIONE 6

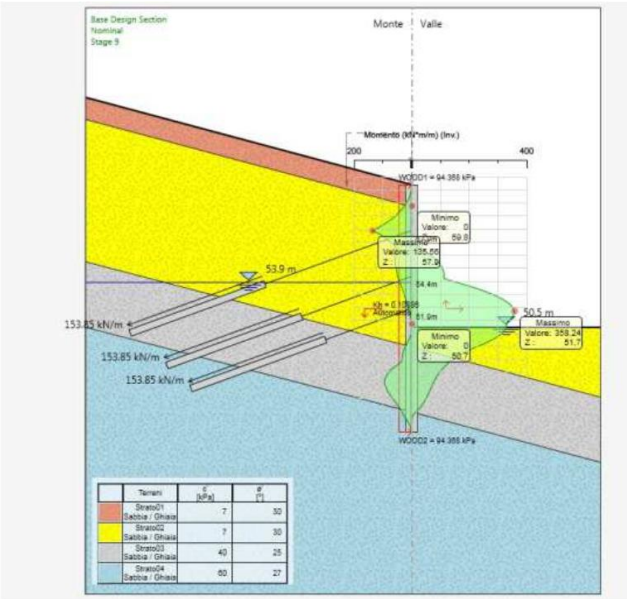


Figura 2.69 Involuppo M_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

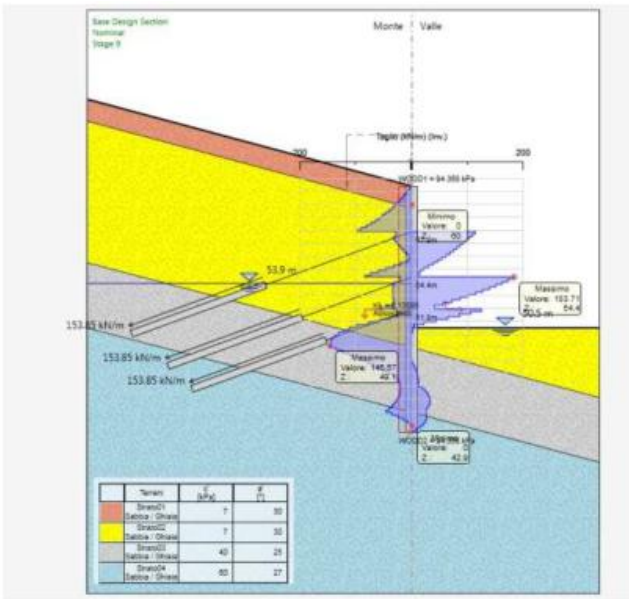


Figura 2.70 Involuppo T_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

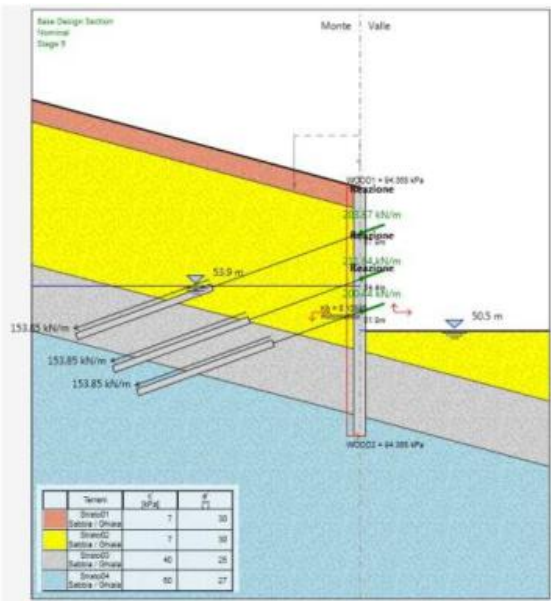


Figura 2.71 Involuppo R_{Ed} SLU A1-M1-R1 fase statica+sismica

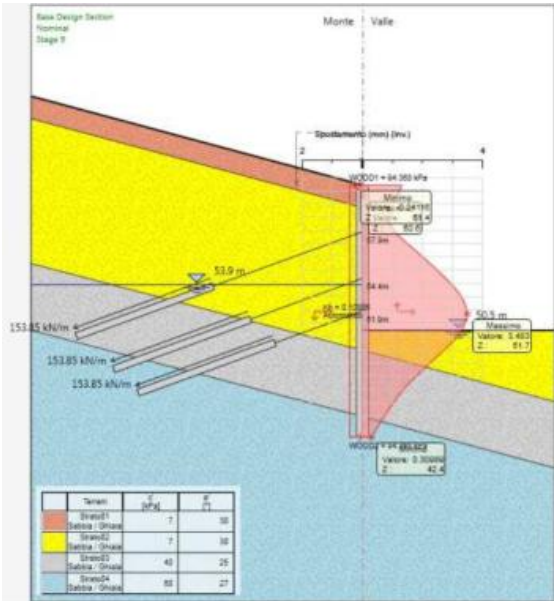


Figura 2.72 Diagramma spostamenti SLE

3. ANALISI NUMERICA DEGLI STATI LIMITE

3.1 Modello numerico rivisitato dell'opera

Il modello geotecnico sviluppato nel progetto esecutivo di variante è stato ricostruito dallo scrivente sulla base di alcune ipotesi progettuali differenti, eseguendo le analisi di dimensionamento e verifica con l'utilizzo del codice di calcolo "Paratie Plus 25".

In particolare, si è scelto di impostare un unico modello geotecnico "misto", considerando la sezione con la massima altezza fuori terra e la minore lunghezza dei pali, unita alla stratigrafia peggiore delle quattro sezioni di riferimento (2, 2A, 4 e 6) introdotte dalla variante progettuale dello studio Iconia. Questa analisi si è svolta sulla base del profilo e delle sezioni geologiche della paratia, ricostruite dallo studio di Padova nell'ambito del progetto di variante citato nel capitolo precedente.

Il profilo longitudinale geologico della berlinese è già stato mostrato nell'immagine di Figura 2.30 del paragrafo 2.2. Le sezioni geologiche sono riportati nelle Figure 3.1, 3.2, 3.3 [19].

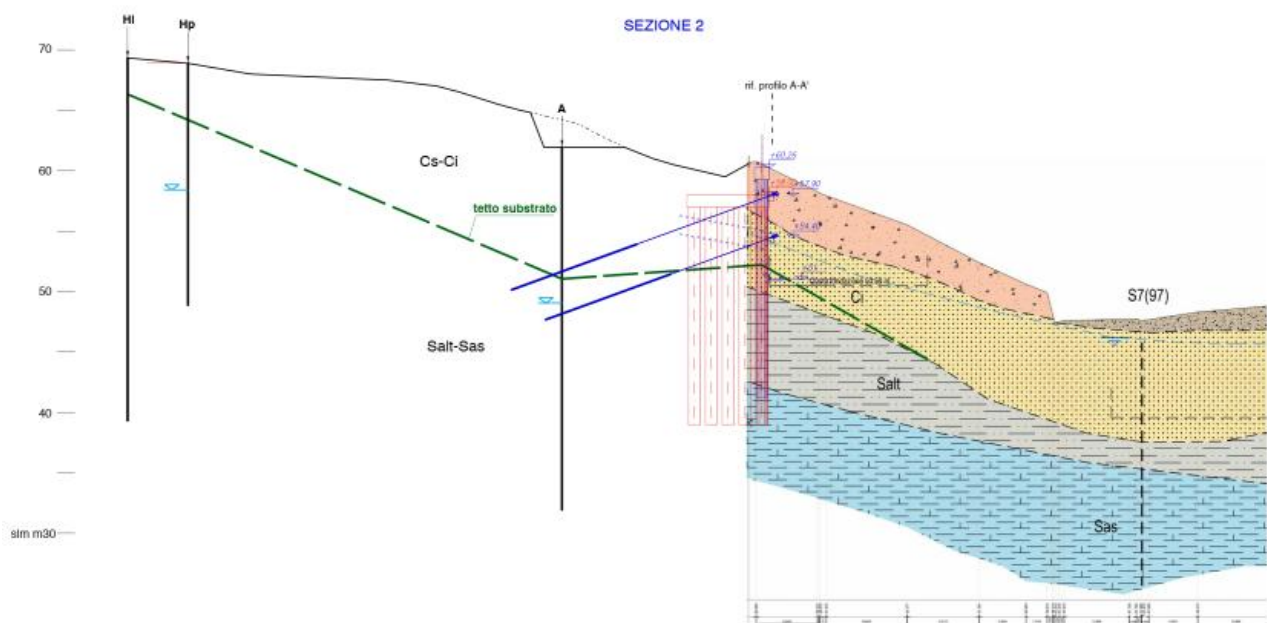


Figura 3.1 Sezione geologica SEZ 2

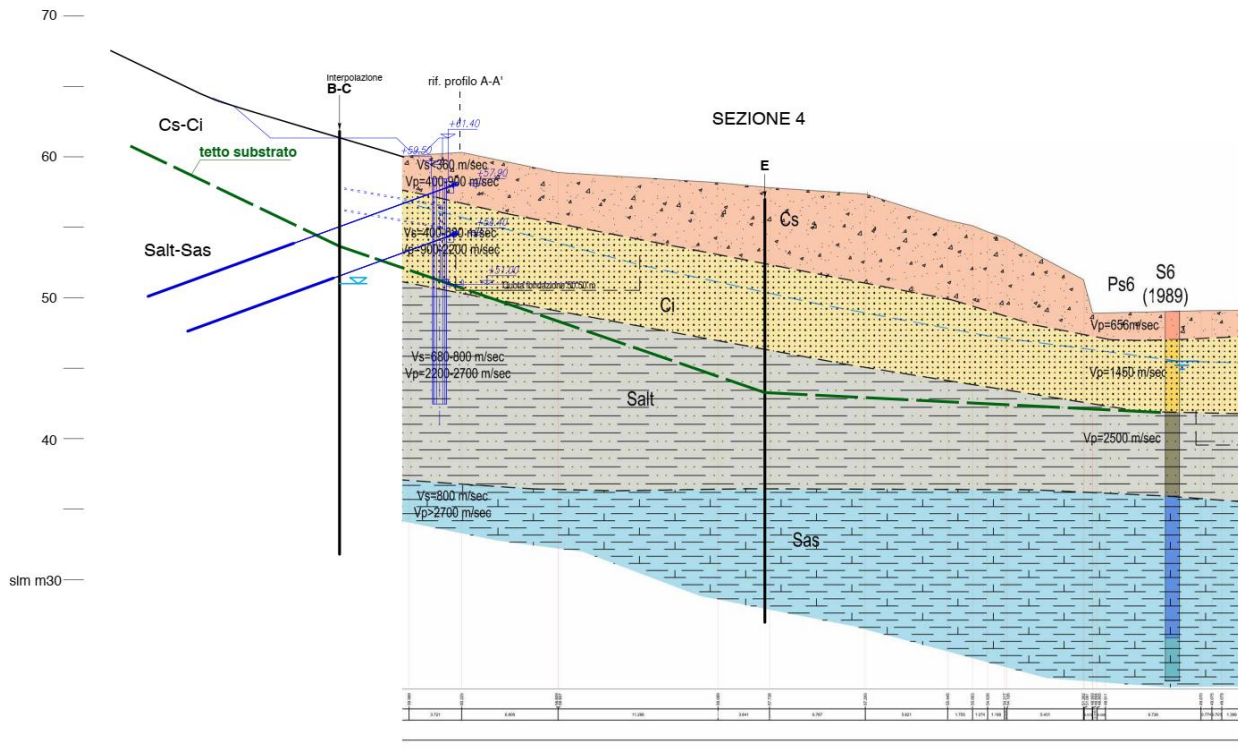


Figura 3.2 Sezione geologica SEZ 4

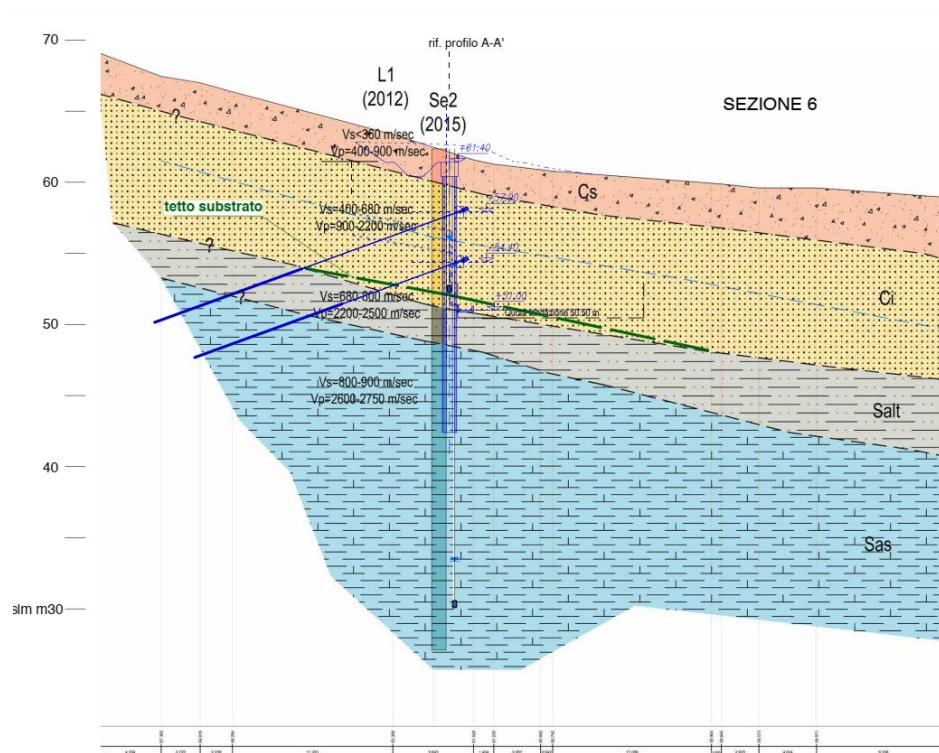


Figura 3.3 Sezione geologica SEZ 6

La documentazione disponibile (la sezione geologica 2A non è stata reperibile) mostra l'andamento e lo spessore delle varie unità lungo la berlinese e in corrispondenza delle sezioni. È stata scelta come sezione di riferimento per il nuovo modello geotecnico quella caratterizzata dalla minore lunghezza dei pali e la maggiore altezza fuori terra (quota trave coronamento +61,40 m.s.l.m. per un'altezza totale di 10,90 m), unita alla stratigrafia maggiormente sfavorevole, operando in maniera cautelativa. Dall'analisi delle sezioni geologiche, si nota come la stratigrafia della SEZ 4 risulti la peggiore. Infatti, il palo risulta ammorsato nell'unità Salt che si presenta oltretutto con uno spessore notevole. Tale unità, come dichiarato nella caratterizzazione geologica-geotecnica effettuata nel capitolo precedente, risulta essere parte del substrato roccioso avente natura flyschoidale, caratterizzato da un elevato grado di fratturazione e valori di RQD molto bassi. Si distingue pertanto per caratteristiche geotecniche e di resistenza meccanica non ottimali. Il modello, quindi, è stato revisionato sulla base di questa stratigrafia, ritenuta la più critica e sfavorevole ai fini dei calcoli.

Inoltre, il nuovo modello geotecnico è stato costruito sulla base di differenti condizioni idrauliche. L'ipotesi precedente era quella di falda orizzontale con livello piezometrico ricavato dalle misure registrate nel corso delle indagini. Le letture piezometriche avevano riscontrato valori di falda abbastanza superficiali prevalentemente interni ai depositi di copertura, confermati anche dagli elaborati (profilo geologico e sezioni geologiche) precedentemente citati. La documentazione allegata nel paragrafo 2.4.3 mostra i modelli geotecnici delle quattro sezioni di riferimento, caratterizzati da una falda a monte posta a una quota di +53,90 m.s.l.m. Conoscendo le quote di testa dei pali per le diverse sezioni, si può dunque dire che è stato ipotizzato un livello piezometrico generale oscillante tra i 6 m e 7 m di profondità. Nella presente rivisitazione del modello è stato ritenuto più coerente con il comportamento idrogeologico del sito, nonché con le informazioni desumibili dalle sezioni geologiche, assumere un andamento inclinato della superficie di falda, in grado di seguire la pendenza del terreno a monte della paratia. Tale ipotesi si pensa possa essere maggiormente rappresentativa delle effettive condizioni del sottosuolo e considera inoltre la depressione del livello piezometrico in prossimità dell'opera. In corrispondenza della paratia, infatti, si verifica una perdita di carico idraulico che determina un abbassamento della superficie piezometrica. Ciò è giustificato dalla presenza dei tre ordini di dreni sub orizzontali, i quali intercettano le acque provenienti da monte, favorendone il regolare deflusso e garantendo un efficace controllo delle condizioni idrauliche del pendio. Tale comportamento è stato riprodotto nel modello mediante un abbassamento non lineare della superficie di falda in prossimità della struttura, come illustrato in Figura 3.4.

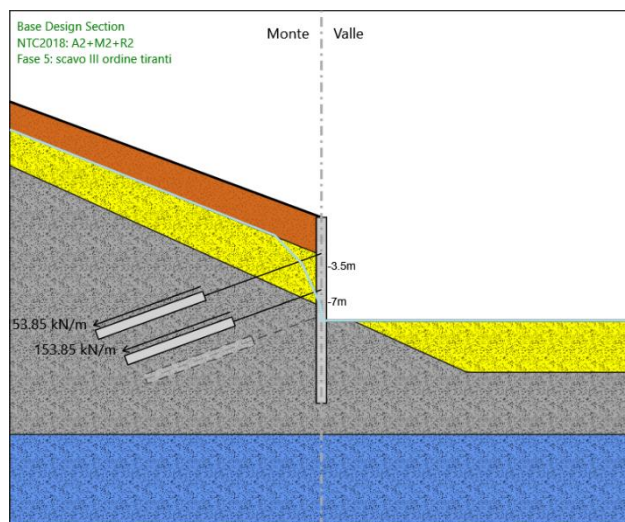


Figura 3.4 Modellazione falda

Il quadro geotecnico di riferimento è stato assunto sulla base dei risultati dei sondaggi e delle prove in sito e in laboratorio disponibili. Anche in questo caso il terreno è stato schematizzato mediante le quattro unità geotecniche riportate nel capitolo precedente, con valori dei parametri di resistenza meccanica analoghi a quelli utilizzati per la variante progettuale firmata “Iconia”. La tabella dei parametri geotecnici caratterizzanti il modello revisionato è riportata in Figura 3.5.

Unità	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (Mpa)
Cs	20	7	30	40
Ci	20	7	30	60
Salt	22	40	25	100
Sas	22	60	27	150

Figura 3.5 Tabella parametri geotecnici modello revisionato

Va fatta una precisazione riguardo al valore del modulo elastico E riportato in tabella. Il valore corrispondente rappresenta il modulo elastico valutato lungo la retta di consolidazione vergine E_{VC} , mentre il modulo elastico nel tratto di scarico e ricarico viene calcolato mediante la seguente formula:

$$E_{UR} = 1,6 * E_{VC}$$

Tale calcolo è implementato nel software, che restituisce il valore di E_{UR} dopo aver inserito quello di E_{VC} ipotizzato da modello.

La sezione di calcolo di riferimento è caratterizzata dalla minore lunghezza dei pali e dalla maggiore altezza fuori terra, valori rispettivamente pari a 18 m e 10,90 m. L'andamento e gli spessori delle varie unità sono stati modellati in riferimento alla stratigrafia della SEZ 4, ritenuta la più sfavorevole e operando così a vantaggio di sicurezza. Allo stesso modo la falda è stata modellata in riferimento alle ipotesi sopra citate. Nelle tabelle sottostanti di Figura 3.6 e 3.7 sono riportate le caratteristiche geometriche e strutturali dei pali e dei tiranti considerate nella sezione di riferimento.

Lunghezza Palo (m)	ϕ Palo (m)	Interasse Pali (m)	Area Ferri (cm ²)	Spirale (-)	Copriferro Netto (cm)
18	1,0	1,3	26 ϕ 20	ϕ 10/15 cm	5,0

Figura 3.6 Tabella caratteristiche geometriche e strutturali palo

Tiranti (-)	Quota Estradosso da Trave Coronamento (m)	Numero Trefoli (-)	ϕ Trefoli (-)	ϕ Perforo (mm)	Interasse Tiranti (m)	Pretiro (kN)	L_{tot} (m)	L_{lib} (m)	L_{bulbo} (m)	α (°)	Metodo Iniezione (-)
I Ordine	-3,5	6	0,6"	120	2,60	400	23,0	12,0	11,0	20	I.R.S.
II Ordine	-7,0	6	0,6"	120	2,60	400	20,0	9,0	11,0	20	I.R.S.
III Ordine	-9,5	6	0,6"	120	2,60	400	18,0	7,0	11,0	20	I.R.S.

Figura 3.7 Tabella caratteristiche geometriche e strutturali tiranti

Il modello ricostruito è stato implementato nel codice di calcolo “Paratie Plus 25”, al fine di eseguire le operazioni di dimensionamento e verifica della struttura.

La paratia (o meglio il singolo palo della sezione di riferimento) viene schematizzata tramite elementi finiti di tipo “beam” (trave), definiti nel piano geometricamente da un nodo iniziale e finale, e dalle proprietà inerziali della sezione trasversale. Ogni nodo è caratterizzato da due gradi di libertà: la traslazione in direzione orizzontale e la rotazione intorno ad un asse ortogonale al piano di riferimento. I pali sono quindi elementi tipo trave con larghezza unitaria e spessore assegnato da progetto, contrassegnati da un comportamento elastico lineare e rigidezza flessionale propria EJ.

Il software simula il comportamento del terreno come elastico perfettamente plastico ipotizzando un criterio di resistenza di Mohr-Coulomb. Il terreno viene rappresentato da un insieme di molle indipendenti che interagiscono con la struttura, dove ciascuna molla è caratterizzata da un comportamento elasto-plastico e da una rigidezza $K_{molla} = E * i/L$, funzione delle sue proprietà elastiche e geometriche (E= modulo elastico, i=interasse tra molle, L=lunghezza singola molla).

Lo stato tensionale iniziale della molla, nella condizione geostatica primaria, è funzione della tensione verticale litostatica secondo la relazione $\sigma'_h = K_0 * \sigma'_v$, con K_0 coefficiente di spinta a riposo valutato mediante la seguente formula: $K_0 = 1 - \sin\phi'$.

L'esecuzione di uno scavo o l'applicazione di azioni esterne sulla struttura determina una variazione dello stato tensionale del terreno, rappresentata nel modello mediante la deformazione della molla. In funzione del verso dello spostamento della struttura, la reazione elastica della molla aumenta o diminuisce fino a raggiungere i valori limite corrispondenti alle condizioni di spinta passiva o attiva, rispettivamente in caso di incremento o decremento delle tensioni orizzontali.

I coefficienti di spinta attiva e passiva K_a e K_p in condizioni statiche sono stati calcolati secondo le teorie rispettivamente di Coulomb (1776) e Lancellotta (2007), ipotizzando un angolo di attrito tra terreno e struttura $\delta = \phi'/2$. Invece i coefficienti di spinta attiva e passiva K_{AE} e K_{PE} in condizioni sismiche sono stati ricavati dalle teorie rispettivamente, di Mononobe-Okabe (1926÷1929) e Lancellotta (2007), considerando un angolo di attrito tra terreno e struttura $\delta = \phi'/2$.

I tiranti nel modello sono simulati attraverso elementi elastici collegati ai nodi del palo alle quote previste progettualmente, caratterizzati da una propria rigidezza assiale EA.

Per quanto riguarda le azioni sismiche, sono state calcolate con il metodo pseudo-statico, considerando un insieme di forze statiche equivalenti. In particolare, si è scelto di considerare l'incremento di spinta orizzontale del terreno causato dal sisma sulla base della teoria di Wood, assimilando la paratia ad una struttura rigida in funzione del sistema di ancoraggio su tre ordini di tiranti.

Pertanto, l'incremento di spinta viene ottenuto mediante la seguente relazione:

$$\Delta P_d = (a_g/g) * S * \gamma * H^2 \text{ dove}$$

a_g = accelerazione al bedrock

g =accelerazione di gravità

S = fattore di suolo

γ = peso specifico

H = altezza fuori terra

I parametri sismici elaborati dal software nel rispetto delle normative vigenti (NTC 2018) sono riportati in Figura 3.8. Il coefficiente sismico in direzione orizzontale è ricavato dalla seguente relazione: $k_h = \alpha * \beta * a_{max}$ dove

α è un coefficiente funzione dell'altezza complessiva della paratia e della categoria di sottosuolo

β è un coefficiente funzione del massimo spostamento U_s supportato dalla struttura senza riduzione di resistenza

$$U_s = 0,005 * H_{fuori\ terra}$$

$a_{max} = S * a_g$ è l'accelerazione di picco

Infine, la componente orizzontale dell'accelerazione è ricavata dalla relazione $a_h = k_h * g$

Opzioni

☒ Includi Azione Sismica

1. Definizione accelerazione

Coefficiente accel. base a_g / g **NTC**

Fattore importanza I

Coefficiente S_s

Coefficiente S_T

$a_{max} / g =$

2. Accelerazione di calcolo

☐ Eurocodice

Calcolo coefficiente di risposta R

☒ Input diretto

☐ Da formule

U_s m T_c s

V_{max} m/s V_{max}/a_{max} $>$

☒ NTC

$U_s =$ m

$\beta =$ $>$

$\alpha =$ $>$

$k_h = \alpha \beta a_{max}$

3. Definizione calcolo

Modalità spinta ☐ Paratia fuori terra ☒ Paratia intera

Comportamento idraulico ☐ Terreno pervio ☒ Terreno impervio

k_{vu} (% k_h)

k_{vd} (% k_h)

R_u

Includi inerzia paratia ☒

4. Metodo di calcolo

☐ Procedura Automatica (Paratie)

Valore Applicato

☒ Manuale (Carichi Esterni)

Comportamento Paratia ☐ Flessibile (usa k_h) ☒ Rigido (usa a_{max})

Metodo ☒ Wood ☐ Mononobe-Okabe ☐ Semirigido

B= $\alpha_1 =$ Correlazione $\alpha_1 - \alpha_2$

a_{max} / g (without ductility) = **0,2335** k_h / g (including ductility) = **0,1401** **(NTC)**

Figura 3.8 Parametri sismici modello geotecnico revisionato

Le analisi di dimensionamento e verifica sono state condotte secondo il metodo degli stati limite, in conformità alle prescrizioni delle norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018). Tale approccio prevede la verifica della sicurezza e della funzionalità dell'opera sia nei confronti degli stati limite ultimi (SLU), finalizzati a garantire il raggiungimento di adeguati livelli di sicurezza nei confronti del collasso, sia degli stati limite di esercizio (SLE), volti ad assicurare il corretto comportamento dell'opera durante il normale esercizio controllando la compatibilità di spostamenti e deformazioni. Per le condizioni sismiche, le verifiche sono state eseguite con riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Le verifiche sono state sviluppate adottando le combinazioni di coefficienti parziali previsti dalla NTC 2018, definiti rispettivamente per le azioni (A), per i parametri geotecnici (M) e per le resistenze (R). L'impiego di tali coefficienti consente di tenere conto delle incertezze associate sia alla determinazione delle azioni agenti, sia alla caratterizzazione geotecnica del terreno e alla valutazione delle resistenze disponibili, introducendo opportuni margini di sicurezza.

Per il dimensionamento strutturale agli stati limite ultimi (SLU) sono state utilizzate le combinazioni di A1-M1-R1 e A2-M2-R1, mentre per le verifiche agli stati limite di esercizio (SLE) sono state considerate le combinazioni “rara”, “frequente” e “quasi permanente”.

Le analisi in condizioni sismiche sono state eseguite distinguendo il lato geotecnico da quello strutturale, mediante le combinazioni denominate rispettivamente “SISMICA GEOTECNICA” e “SISMICA STRUTTURALE”, entrambe riferite allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Il dimensionamento dei tiranti è stato condotto adottando la combinazione A1-M1-R3, specificatamente prevista dalla normativa per gli elementi di ancoraggio, mentre la verifica di stabilità globale del sistema terreno-opera è stata eseguita tramite la combinazione A2-M2-R2.

Quest'ultima è stata effettuata nell'ambito della teoria dell'equilibrio limite mediante il criterio di Bishop semplificato, una delle metodologie più diffuse nell'analisi di stabilità dei pendii. Tale metodo prevede la discretizzazione del potenziale volume di terreno instabile in una serie di conci verticali e l'imposizione dell'equilibrio limite lungo una superficie di scorrimento ipotizzata. Per ciascun concio vengono considerate le principali forze agenti, assumendo le forze interconco (forze di interazione tra conci adiacenti) aventi direzione orizzontale, secondo l'ipotesi semplificativa alla base del metodo. Attraverso un processo iterativo il software genera e analizza un numero elevato di superfici di scorrimento circolari, individuando quella critica, cioè quella caratterizzata dal valore minimo del fattore di sicurezza FS calcolato.

Il fattore di sicurezza FS è definito come il rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento e quella effettivamente mobilitata. La verifica secondo la normativa viene effettuata confrontando il valore calcolato con quello minimo prescritto $FS_{min} = 1,1$.

Nei risultati delle elaborazioni vengono riportati sia il valore del fattore di sicurezza FS, sia il rapporto tra quest'ultimo e il fattore di sicurezza minimo definito da normativa $\left(\frac{FS}{\gamma_R}\right)$. Si segnala che nel software “Paratie Plus 25” il fattore di sicurezza minimo è indicato con γ_R .

I valori dei coefficienti parziali relativi alle azioni, ai parametri geotecnici e alle resistenze, adottati nelle varie tipologie di verifica, sono riportati nelle tabelle rispettivamente di Figura 3.9, 3.10 e 3.11

Nome	Carichi Permanenti Sfavorevoli (F_dead_load_ unfavour)	Carichi Permanenti Favorevoli (F_dead_load_ favour)	Carichi Variabili Sfavorevoli (F_live_load_ unfavour)	Carichi Variabili Favorevoli (F_live_load_ favour)	Carico Sismico (F_seism_load)	Pressioni Acqua Lato Monte (F_WaterDR)	Pressioni Acqua Lato Valle (F_WaterRes)	Carichi Permanenti Destabilizzanti (F_UPL_GDStab)	Carichi Permanenti Stabilizzanti (F_UPL_GStab)	Carichi Variabili Destabilizzanti (F_UPL_QDStab)	Carichi Permanenti Destabilizzanti (F_HYD_GDStab)	Carichi Permanenti Stabilizzanti (F_HYD_GStab)	Carichi Variabili Destabilizzanti (F_HYD_QDStab)	Deformazioni anelastica (F_inelasticstrain)
Simbolo	γG	γG	γQ	γQ	γQE	γG	γG	$\gamma Gdst$	$\gamma Gstb$	$\gamma Qdst$	$\gamma Gdst$	$\gamma Gstb$	$\gamma Qdst$	γP
Nominal	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Rara)	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
NTC2018: SLE (Frequente)	1	1	0.75	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
NTC2018: SLE (Quasi Permanente)	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
NTC2018: A1+M1+R1	1.3	1	1.5	1	0	1.3	1	1	1	1	1.3	0.9	1	
NTC2018: A1+M1+R3	1.3	1	1.5	1	0	1.3	1	1	1	1	1.3	0.9	1	
NTC2018: A2+M2+R1	1	1	1.3	1	0	1	1	1	1	1	1.3	0.9	1	
NTC2018: A2+M2+R2	1	1	1.3	1	0	1	1	1	1	1	1.3	0.9	1	
NTC2018: SISMICA STR	1	1	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
NTC2018: SISMICA GEO	1	1	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1.3	0.9	1	

Figura 3.9 Tabella coefficienti azioni A

Nome	Parziale su $\tan(\phi')$ (F_Fr)	Parziale su c' (F_eff_cohe)	Parziale su S_u (F_Su)	Parziale su q_u (F_qu)	Parziale su peso specifico (F_gamma)
Simbolo	$\gamma \phi$	γc	γc_u	γq_u	$\gamma \gamma$
Nominal	1	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Rara)	1	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Frequente)	1	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Quasi Permanente)	1	1	1	1	1
NTC2018: A1+M1+R1	1	1	1	1	1
NTC2018: A1+M1+R3	1	1	1	1	1
NTC2018: A2+M2+R1	1.25	1.25	1.4	1	1
NTC2018: A2+M2+R2	1.25	1.25	1.4	1	1
NTC2018: SISMICA STR	1	1	1	1	1
NTC2018: SISMICA GEO	1	1	1	1	1

Figura 3.10 Tabella coefficienti parametri geotecnici M

Nome	Parziale resistenza terreno (es. K_p) (F_Soil_Res_walls)	Parziale resistenza Tiranti permanenti (F_Anch_P)	Parziale resistenza Tiranti temporanei (F_Anch_T)	Parziale elementi strutturali (F_wall)
Simbolo	γRe	γap	γat	
Nominal	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Rara)	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Frequente)	1	1	1	1
NTC2018: SLE (Quasi Permanente)	1	1	1	1
NTC2018: A1+M1+R1	1	1.2	1.1	1
NTC2018: A1+M1+R3	1	1.2	1.1	1
NTC2018: A2+M2+R1	1	1.2	1.1	1
NTC2018: A2+M2+R2	1	1.2	1.1	1
NTC2018: SISMICA STR	1	1.2	1.1	1
NTC2018: SISMICA GEO	1	1.2	1.1	1

Figura 3.11 Tabella coefficienti resistenze R

Il modello geotecnico così ricostruito è stato suddiviso nelle varie fasi lavorative. Si parte dalla condizione geostatica iniziale fino alla fase finale di fondo scavo e quella comprendente le azioni sismiche. La successione cronologica delle fasi da cui è costituito il modello è la seguente:

- **Fase 0: condizione geostatica**
- **Fase 1: scavo I ordine tiranti**
- **Fase 2: attivazione I ordine tiranti**
- **Fase 3: scavo II ordine tiranti**
- **Fase 4: attivazione II ordine tiranti**
- **Fase 5: scavo III ordine tiranti**
- **Fase 6: attivazione III ordine tiranti**
- **Fase 7: fondo scavo progetto**
- **Sisma**

La condizione geostatica iniziale rappresenta lo stato naturale del terreno prima dell'esecuzione di qualsiasi intervento.

Successivamente viene effettuato il primo scavo fino alla quota prevista per l'installazione del primo ordine di tiranti. Una volta posizionati, questi vengono attivati e messi in tensione, al fine di contrastare le spinte del terreno e garantire la stabilità della paratia.

Lo stesso procedimento viene ripetuto nelle fasi successive dove si realizzano due ulteriori scavi fino alle quote corrispondenti al secondo e terzo ordine di tiranti, seguiti dalla relativa attivazione. In questo modo l'opera al termine della fase 6 si presenta con il sistema di ancoraggio completo previsto in fase progettuale.

Terminata la realizzazione dei tiranti, si raggiunge il fondo scavo di progetto, corrispondente alla configurazione finale dell'opera.

Infine, viene effettuata la verifica in condizioni sismiche, valutando il comportamento della paratia e del terreno sotto l'azione delle sollecitazioni dinamiche indotte dal sisma.

Una visione d'insieme delle varie fasi appena descritte è rappresentata nella pagina seguente dalle Figure 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20.

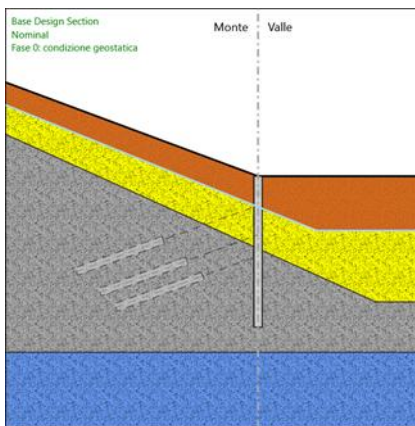


Figura 3.12 Fase 0: condizione geostatica

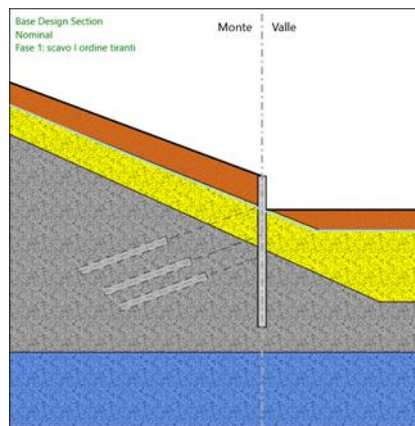


Figura 3.13 Fase 1: scavo I ordine tiranti

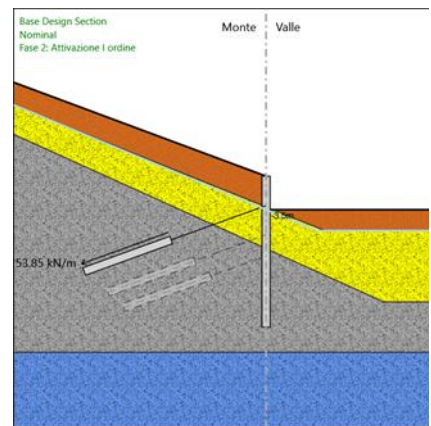


Figura 3.14 Fase 2: attivazione I ordine tiranti

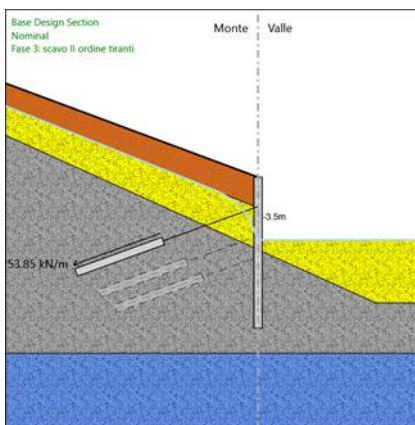


Figura 3.15 Fase 3: scavo II ordine tiranti

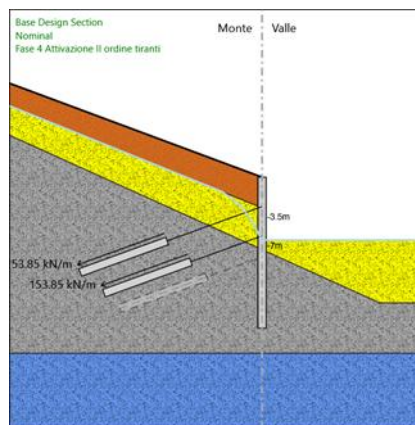


Figura 3.16 Fase 4: attivazione II ordine tiranti

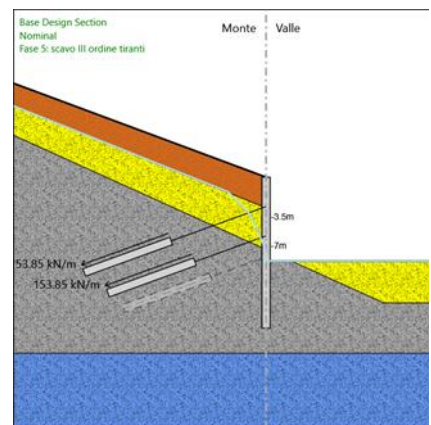


Figura 3.17 Fase 5: scavo III ordine tiranti

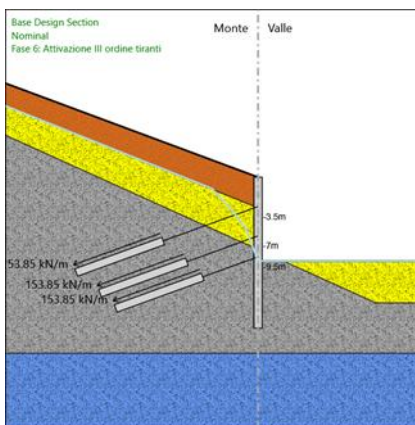


Fig. 3.18 Fase 6: attivazione III ordine tiranti

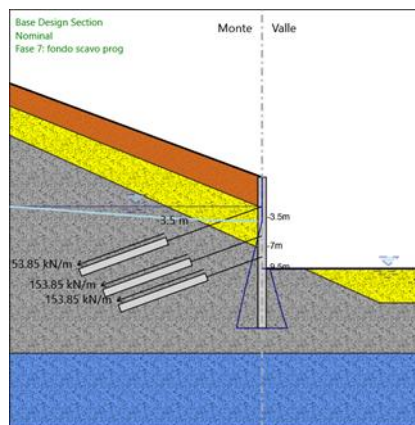


Fig. 3.19 Fase 7: fondo scavo progetto

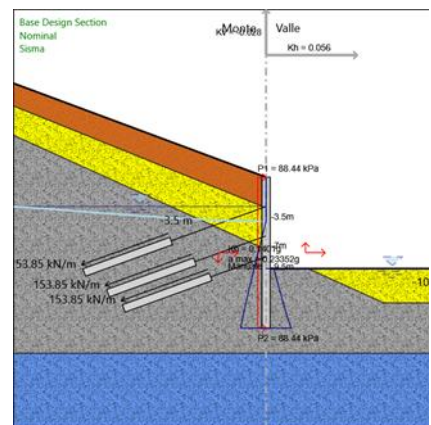


Fig. 3.20 Sisma

3.2 Risultati delle verifiche numeriche

Si riporta nelle figure seguenti un quadro di sintesi dei risultati delle analisi condotte, mettendo in risalto le verifiche maggiormente salienti per ogni combinazione e tipologia di calcolo effettuata.

Tali dati sono stati estrapolati dal report finale generato dal software “Paratie Plus 25” nel quale sono presenti tutte le verifiche per ogni fase e combinazione implementate.

In particolare, si mostrano i risultati dello spostamento massimo registrato in seno alla paratia, i valori massimi delle sollecitazioni agenti (momento flettente e taglio), le massime reazioni nei vincoli (tiranti di ancoraggio) ed il fattore di sicurezza nei confronti dell’instabilità globale terreno-opera.

Di seguito si riporta il dettaglio del significato delle seguenti figure:

- **Spostamento paratia:** valore dello spostamento massimo in seno alla paratia con riferimento allo SLE combinazione “rara”, ritenuta la più significativa (Figure 3.21 e 3.22)
- **diagramma inviluppo sollecitazioni del momento flettente** sulla paratia (valori in $\text{kN}\cdot\text{m}$ a metro lineare) per le combinazioni SLU A1+M1+R1/ SLV M1+R1 e SLU A2-M2-R1/ SLV M2-R1 in cui è massimo il valore del momento flettente sollecitante M_{Ed}
- **diagramma inviluppo sollecitazioni di taglio** sulla paratia (kN a metro lineare) per la combinazione SLU A1+M1+R1/ SLV M1+R1 e SLU A2-M2-R1/ SLV M2-R1 in cui è massimo il valore del taglio sollecitante V_{Ed}
- **Verifica stabilità globale (FS):** fattore di sicurezza per la stabilità globale.

I diagrammi degli inviluppi del momento flettente e del taglio secondo le combinazioni di calcolo A1-M1-R1 e A2-M2-R1 sono riportate nelle Figure dalla 3.23 alla 3.32.

Le verifiche nei confronti delle azioni dinamiche indotte dal sisma, effettuate tramite le combinazioni allo SLV “SISMICA STR” e “SISMICA GEO”, sono riportate nelle Figure 3.33 - 3.36

I calcoli relativi alle massime reazioni agenti nei vincoli di ancoraggio, eseguiti mediante la combinazione di coefficienti A1-M1-R3 sono riportati nella tabella di Figura 3.37.

Le verifiche di stabilità globale dell’insieme terreno-opera, condotte con la combinazione di calcolo A2-M2-R2, sono invece riportate nelle Figure 3.38 - 3.41.

3.2.1 Stato Limite di Esercizio: combinazione Rara

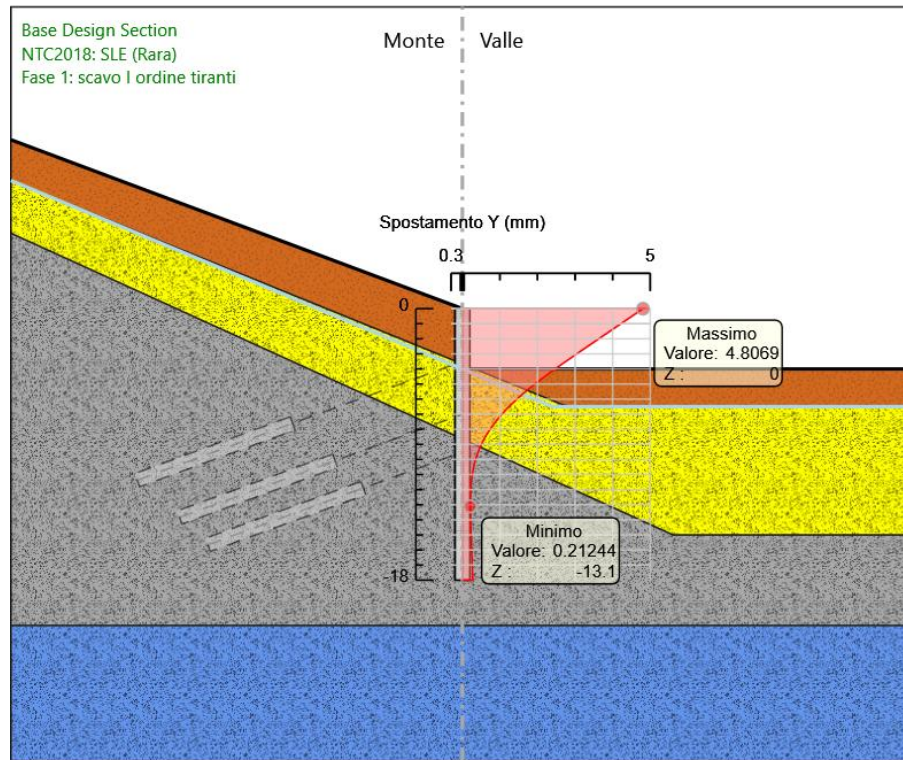


Figura 3.21 SLE diagramma involucro spostamenti (Fase1)

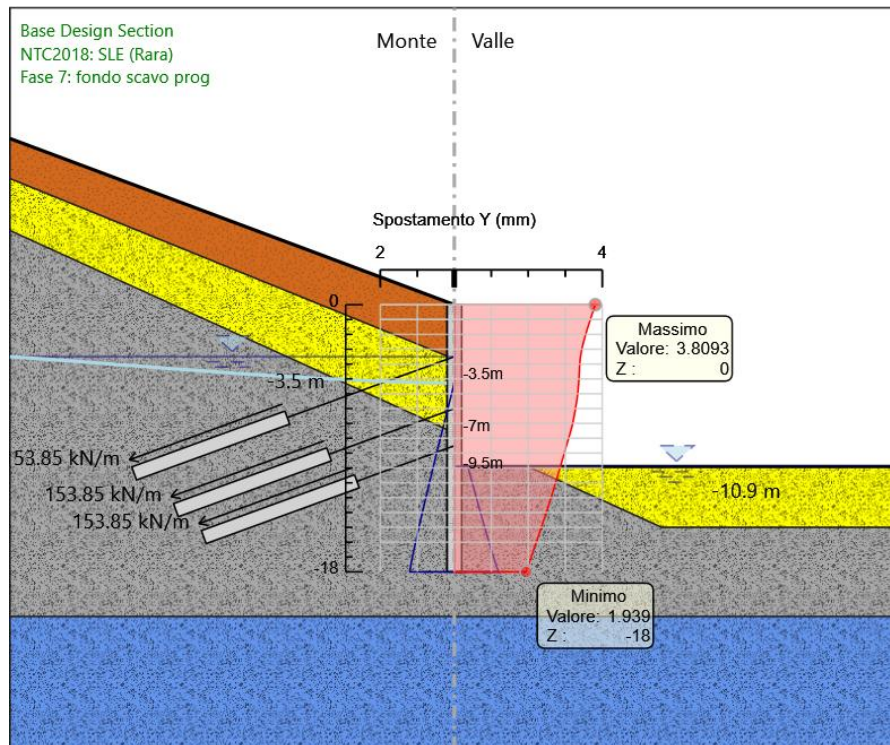


Figura 3.22 SLE diagramma involucro spostamenti (Fase 7)

3.2.2 Stato Limite Ultimo: A1-M1-R1

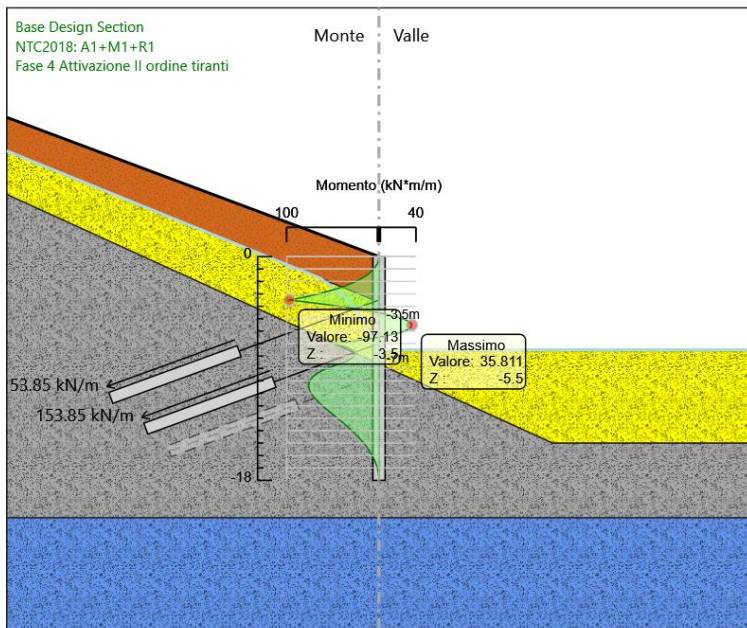


Figura 3.23 SLU A1-M1-R1 diagramma involuppo momento (Fase 4)

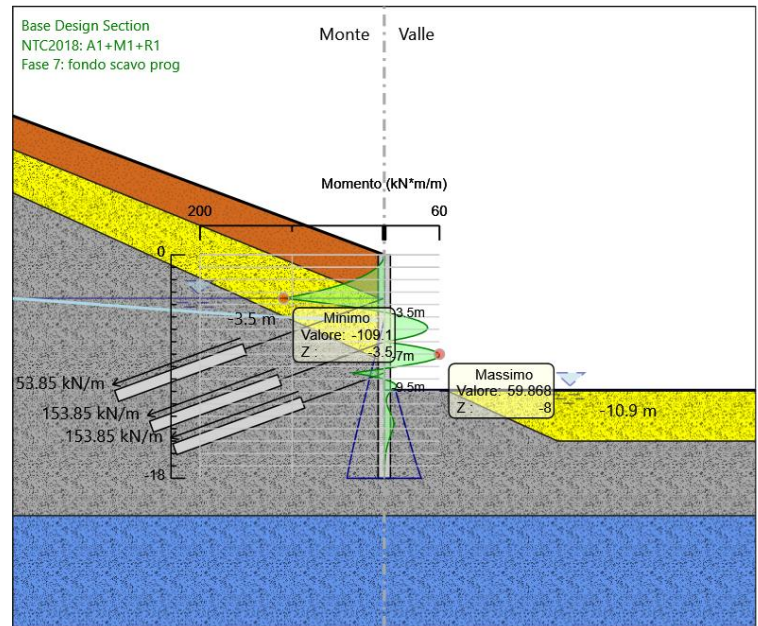


Figura 3.24 SLU A1-M1-R1 diagramma involuppo momento (Fase 7)

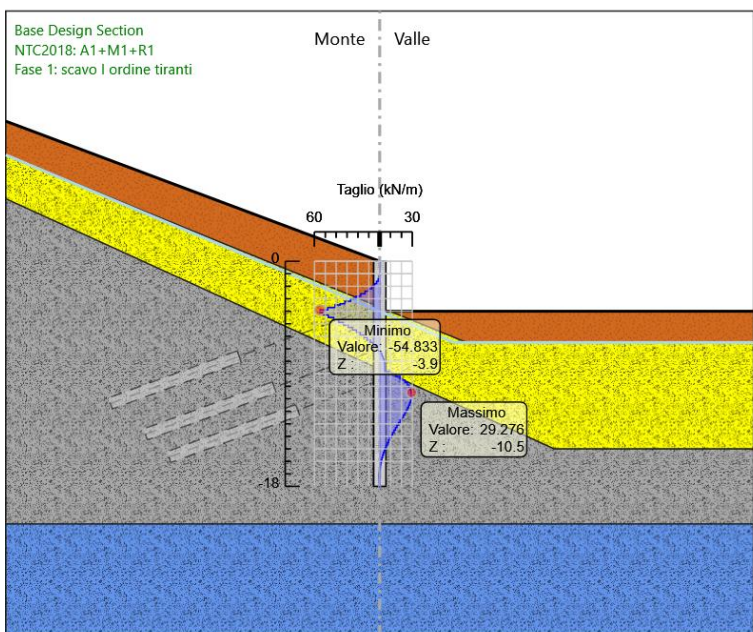


Figura 3.25 SLU A1-M1-R1 diagramma involuppo taglio (Fase 1)

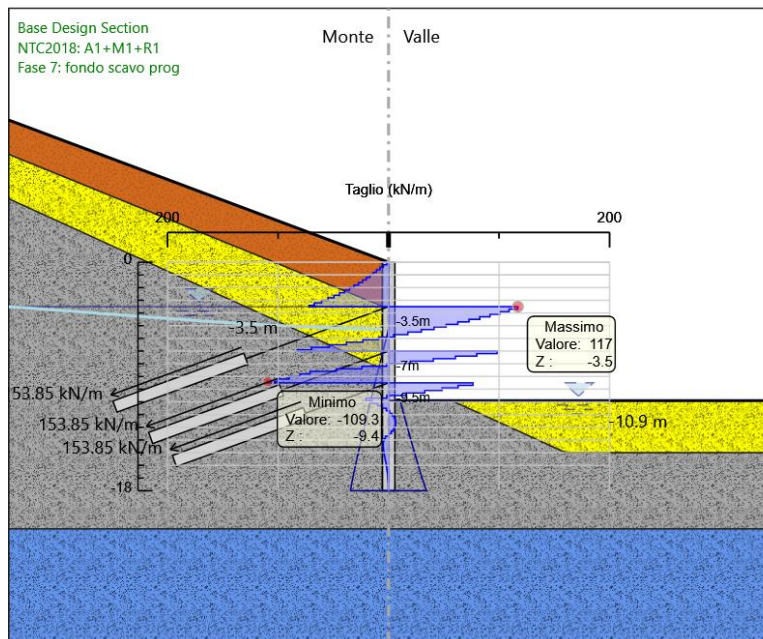


Figura 3.26 SLU A1-M1-R1 diagramma involuppo taglio (Fase 7)

3.2.3 Stato Limite Ultimo: A2-M2-R1

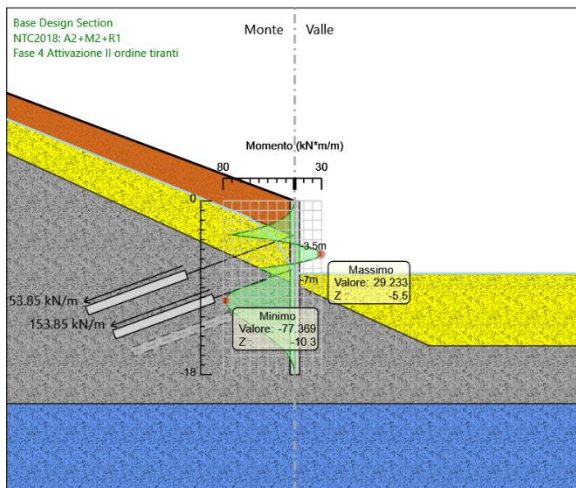


Figura 3.27 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro momento (Fase 4)

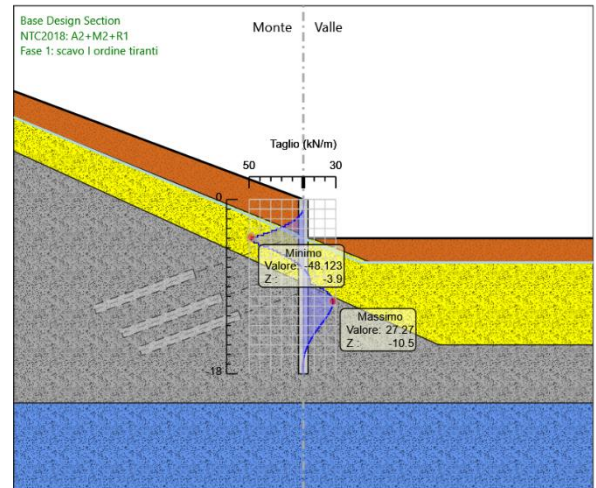


Figura 3.28 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro taglio (Fase 1)

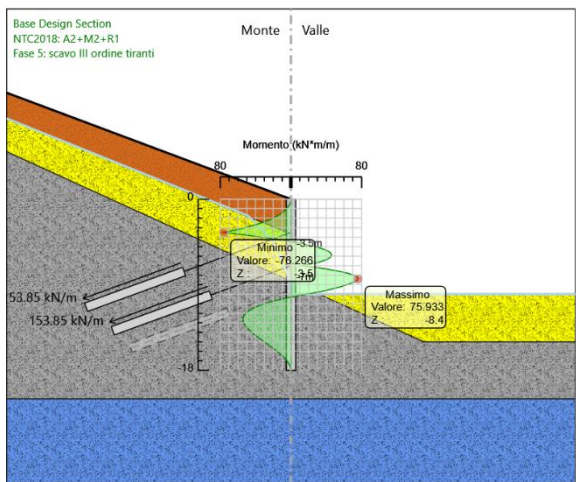


Figura 3.29 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro momento (Fase 5)

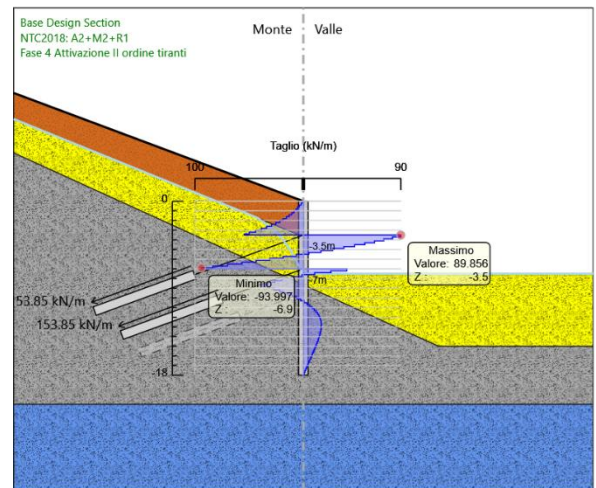


Figura 3.30 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro taglio (Fase 4)

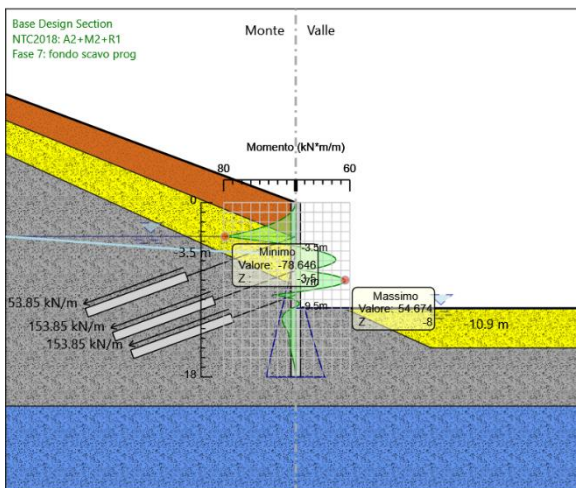


Figura 3.31 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro momento (Fase 7)

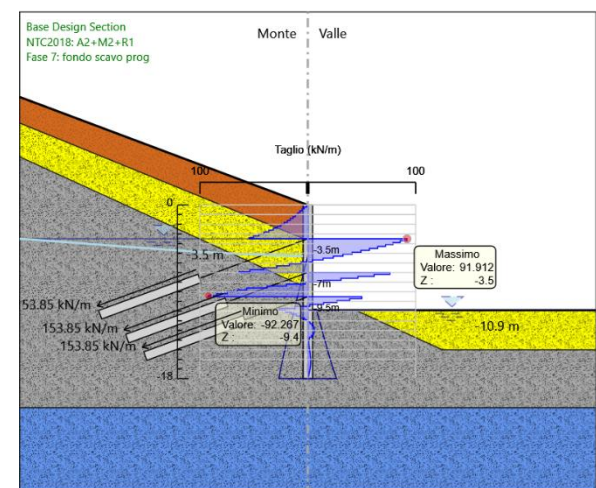


Figura 3.32 SLU A2-M2-R1 diagramma involucro taglio (Fase 7)

3.2.4 Stato Limite Salvaguardia della Vita: SISMICA STR

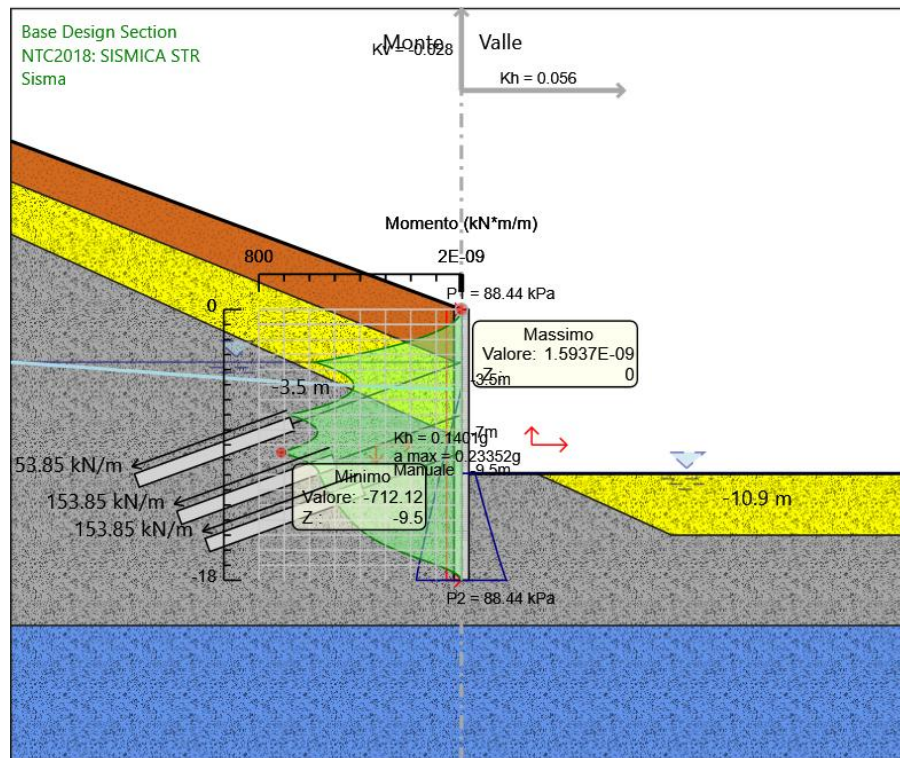


Figura 3.33 SLV “SISMICA STR” diagramma involuppo momento (Sisma)

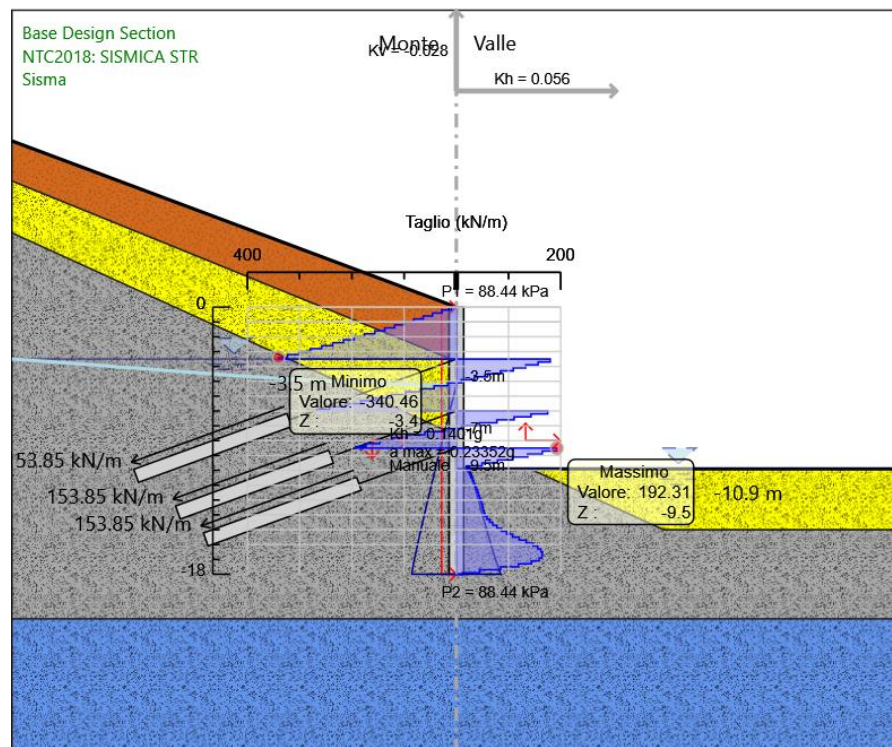


Figura 3.34 SLV “SISMICA STR” diagramma involuppo taglio (Sisma)

3.2.5 Stato Limite Salvaguardia della Vita: SISMICA GEO

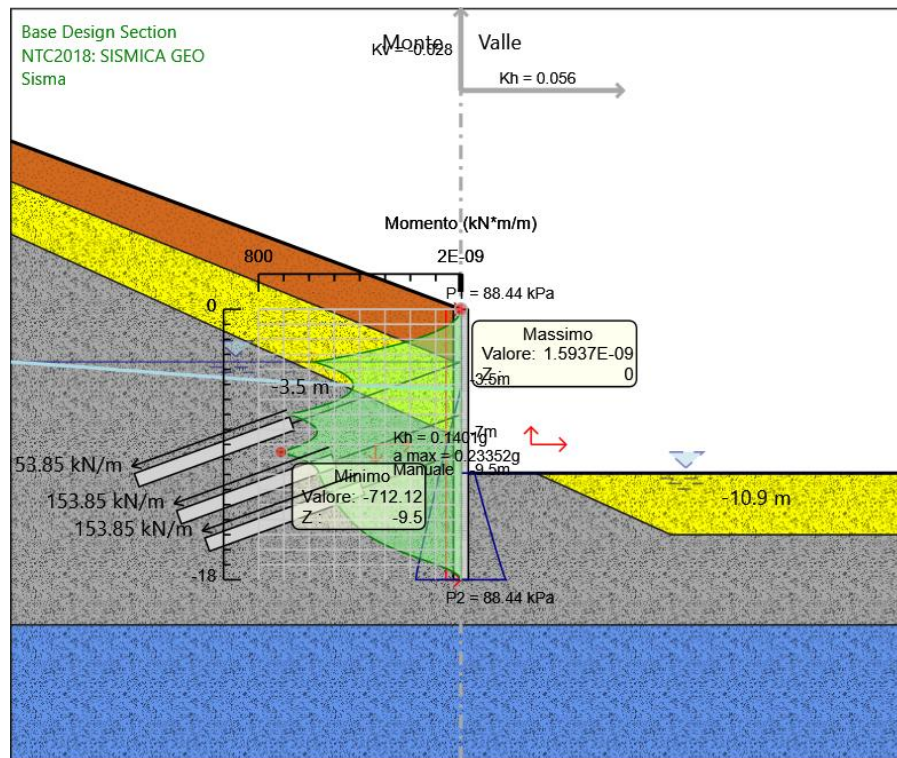


Figura 3.35 SLV “SISMICA GEO” diagramma involucro momento (Sisma)

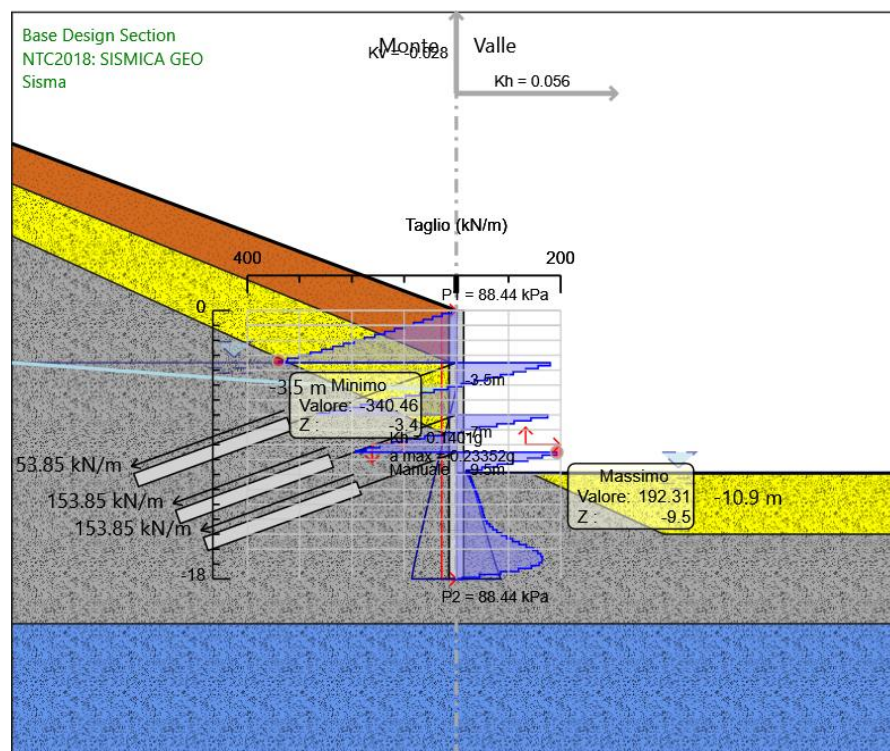


Figura 3.36 SLV “SISMICA GEO” diagramma involucro taglio (Sisma)

3.2.6 Verifiche Tiranti: A1-M1-R3

Design Assumption: NTC2018: A1+M1+R3	Tipo Risultato: Verifiche Tiranti				NTC2018 (ITA)			
Tirante	Stage	Sollecitazione (kN)	Resistenza GEO (kN)	Resistenza STR (kN)	Ratio GEO	Ratio STR	Resistenza	Gerarchia delle Resistenze
I ordine	Fase 2: Attivazione I ordine	520.182	712.094	1.211.113	0.73	0.43		
I ordine	Fase 3: scavo II ordine tiranti	540.875	712.094	1.211.113	0.76	0.447		
I ordine	Fase 4 Attivazione II ordine tiranti	533.581	712.094	1.211.113	0.749	0.441		
I ordine	Fase 5: scavo III ordine tiranti	537.612	712.094	1.211.113	0.755	0.444		
I ordine	Fase 6: Attivazione III ordine tiranti	534.715	712.094	1.211.113	0.751	0.442		
I ordine	Fase 7: fondo scavo prog	537.859	712.094	1.211.113	0.755	0.444		
I ordine	Sisma	537.859	712.094	1.211.113	0.755	0.444		
II ordine	Fase 4 Attivazione II ordine tiranti	520.182	712.094	1.211.113	0.73	0.43		
II ordine	Fase 5: scavo III ordine tiranti	535.119	712.094	1.211.113	0.751	0.442		
II ordine	Fase 6: Attivazione III ordine tiranti	524.679	712.094	1.211.113	0.737	0.433		
II ordine	Fase 7: fondo scavo prog	537.005	712.094	1.211.113	0.754	0.443		
II ordine	Sisma	537.005	712.094	1.211.113	0.754	0.443		
III ordine	Fase 6: Attivazione III ordine tiranti	520.182	712.095	1.211.113	0.73	0.43		
III ordine	Fase 7: fondo scavo prog	539.103	712.095	1.211.113	0.757	0.445		
III ordine	Sisma	539.103	712.095	1.211.113	0.757	0.445		

Figura 3.37 Tabella verifiche tiranti A1-M1-R3

3.3 Considerazioni finali sulle verifiche agli stati limite

Le immagini e i risultati riportati nei paragrafi precedenti, estratti dal report di calcolo generato dal software “Paratie Plus 25”, consentono di delineare un quadro complessivo del comportamento della berlinese nelle varie fasi costruttive e secondo le differenti combinazioni di calcolo previste dalla NTC 2018. L’analisi è stata condotta mettendo in evidenza, per ciascuna verifica, le configurazioni maggiormente gravose e le fasi progettuali nelle quali si sono registrati i valori più significativi di spostamenti, sollecitazioni e reazioni nei tiranti.

I risultati ottenuti mostrano come il modello geotecnico revisionato soddisfi tutte le verifiche previste dalla normativa. Gli spostamenti orizzontali della struttura risultano sempre contenuti entro i limiti massimi progettuali, evidenziando un comportamento deformativo compatibile con le prestazioni richieste sia durante le fasi di scavo, sia nella configurazione finale dell’opera. Analogamente, le verifiche strutturali a flessione e a taglio risultano pienamente soddisfatte, con valori delle sollecitazioni agenti inferiori alle corrispondenti capacità resistenti della sezione.

Anche il sistema di ancoraggio presenta un comportamento conforme alle ipotesi progettuali. Le verifiche sui tre ordini di tiranti mostrano infatti reazioni assiali agenti inferiori alle rispettive resistenze geotecniche e strutturali, confermando il corretto dimensionamento degli elementi di ancoraggio e la loro efficacia nel contenimento delle spinte del terreno durante le fasi costruttive.

Per quanto riguarda la stabilità globale dell’insieme terreno-opera, le analisi condotte mediante il metodo dell’equilibrio limite di Bishop semplificato hanno restituito valori del fattore di sicurezza superiori a quelli minimi prescritti dalla normativa ($\gamma_r = 1,1$). Tali risultati, inerenti alla fase di fondo scavo (fase 7) e a quella comprendente le azioni dinamiche indotte dal sisma (sisma), sono stati caratterizzati da valori di fattori di sicurezza rispettivamente pari a $FS_{Fase\ 7} = 1,389$ e $FS_{Sisma} = 1,238$. Ciò conferma l’assenza di meccanismi di collasso globale e la sostanziale stabilità dell’opera nei confronti delle superfici di scorrimento ritenute critiche.

Nel complesso quindi, nonostante l’introduzione di ipotesi generalmente più gravose sotto il profilo geotecnico, tutte le verifiche eseguite hanno dato esito positivo (Figura 3.42). La scelta cautelativa di adottare la sezione con il modello stratigrafico più sfavorevole, unitamente alla ricostruzione di un modello idraulico maggiormente aderente alle effettive condizioni del sito, ha consentito di definire un modello geotecnico più rappresentativo del comportamento reale dell’opera. La convergenza dei calcoli (Figura 3,38) costituisce un’ulteriore conferma dell’adeguatezza progettuale della berlinese e testimonia come l’opera presenti un soddisfacente margine di sicurezza anche in presenza di una modellazione maggiormente realistica e cautelativa. Il lavoro svolto dimostra come una rappresentazione più fedele delle caratteristiche del sito possa incrementare l’affidabilità delle analisi senza compromettere l’esito delle verifiche progettuali, contribuendo così ad una valutazione coerente delle prestazioni strutturali dell’opera.

Design Assumption	Fase 0: condizione geostatica	Fase 1: scavo I ordine tiranti	Fase 2: Attivazione I ordine	Fase 3: scavo II ordine tiranti	Fase 4: Attivazione II ordine tiranti	Fase 5: scavo III ordine tiranti	Fase 6: Attivazione III ordine tiranti	Fase 7: fondo scavo prog	Sisma
Nominal									
NTC2018: SLE (Rara)		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018: SLE (Frequente)		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018: SLE (Quasi Permanente)		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
A1+M1+R1		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
A1+M1+R3		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
A2+M2+R1		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
A2+M2+R2		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
SISMICA STR		V	V	V	V	V	V	V	V
NTC2018:		V	V	V	V	V	V	V	V
SISMICA GEO		V	V	V	V	V	V	V	V

Figura 3.42 Tabella riassuntiva verifiche svolte

4. MONITORAGGIO DELLA PARATIA

4.1 Strumentazione e metodologia di misura

Nell'ambito del progetto esecutivo per la realizzazione della paratia era stato inserito un piano di monitoraggio volto al controllo della struttura, eseguito mediante strumentazione tecnica appropriata. Ciò nasceva dalla necessità di osservare l'evoluzione temporale del comportamento della berlinese, dalle prime fasi realizzative fino a lavori ultimati ed oltre. Questo permetteva di capire e verificare se le previsioni progettuali fossero state rispettate, indagando alcuni parametri significativi al fine di avere un quadro completo e poter eventualmente effettuare modifiche o correzioni tecniche se necessarie. Il piano di monitoraggio prevedeva in particolare misure di deformazioni o spostamenti strutturali e di carico agente sui tiranti. Le prime sono state effettuate secondo le seguenti metodologie:

- Analisi dei dati restituiti dai tubi inclinometrici installati. Il piano di monitoraggio prevedeva un inclinometro in zona paratia ovest (sondaggio S_{Hi}), un inclinometro in zona paratia est e tre inclinometri installati direttamente all'interno dei pali 16,51,70.
- Rilevamento topografico eseguito tramite stazione totale (teodolite elettronico con distanziometro integrato) installata su una postazione fissa. Tale strumentazione aveva lo scopo di rilevare gli spostamenti della berlinese attraverso il controllo 30 mire ottiche installate sulla struttura e distribuite su tre differenti livelli. Le prime 10 erano collocate sulla trave di coronamento, mentre le restanti 20 erano ripartite equamente sulle due travi di correa realizzate in corrispondenza del primo e secondo ordine di tiranti.

Il controllo del carico agente sui tiranti invece prevedeva l'installazione di 6 celle di carico, equamente disposte lungo il primo e secondo ordine di tiranti. Tramite tale strumentazione si aveva la possibilità di monitorare, durante le varie fasi realizzative della struttura, il tiro nei tiranti. Esso doveva mantenere una certa congruenza e non essere soggetto a perdite significative, in caso contrario si sarebbe dovuto intervenire correggendo l'eventuale anomalia.

Tale piano di monitoraggio inizialmente previsto dal progetto esecutivo è stato poi successivamente revisionato.

Come accennato nel capitolo 2.4.3, è stata predisposta infatti una variante progettuale dell'opera da parte dello studio Iconia Ingegneria Civile, con aggiunta di un terzo ordine di tiranti e di dreni sub orizzontali.

Conseguentemente anche il piano di monitoraggio è stato modificato e aggiornato integrando il precedente con nuove strumentazioni sia in numero che in tipologia [20].

Alle 30 mire ottiche precedentemente previste ne sono state aggiunte altre 10 lungo la trave di collegamento del terzo ordine di tiranti, per un totale di 40 mire. Sono state aggiunte inoltre 3 ulteriori celle di carico sui tiranti del terzo ordine, arrivando così nel complesso a 9.

La novità riguarda l'introduzione di 3 piezometri, disposti immediatamente a monte della paratia (circa 1 m dietro), in corrispondenza delle verticali inclinometriche precedentemente citate. La lettura delle misure piezometriche ed inclinometriche associate permetteva in questo modo di avere un quadro maggiormente completo riguardo al comportamento della struttura. La disposizione degli strumenti, infatti, permetteva di avere tre sezioni monitorate rispettivamente lungo il settore ovest, centrale ed est della paratia.

Inoltre, la presenza di un tubo inclinometrico e di un piezometro a tubo aperto nei sondaggi S₁ e S₂, appartenenti alle indagini del 2019, permettevano un ulteriore controllo riguardo il terreno a monte della struttura. Il piano di monitoraggio aggiornato prevedeva il prolungamento delle varie misurazioni oltre la sola fase di realizzazione dell'opera. Infatti, essendo la paratia in oggetto un'opera di sostegno definitiva, era ritenuto significativo monitorare l'evoluzione del comportamento strutturale nel tempo ad opera realizzata. La frequenza delle misure era fissata sulla base della tipologia di letture e di eventuali anomalie riscontrate. Infatti, in sede di calcolo progettuale, si erano stabilite deformazioni e variazioni di tiro attese per la tipologia di opera che rappresentava la berlinese. La presenza di tre ordini di tiranti caratterizzava l'opera come rigida, permettendo di ipotizzare spostamenti alquanto limitati, dell'ordine di pochi mm. Basandosi sull'esperienza relativa ad opere simili, erano stati definiti così due valori di soglia differenti:

- Spostamento atteso inferiore a 8 mm
- Spostamento di allarme maggiore o uguale a 12 mm

Eventuali scostamenti significativi e anomali avrebbero portato ad una intensificazione delle misure. Sulle variazioni di tensione registrate nelle celle di carico invece veniva ipotizzata una tolleranza di circa il 6 ÷ 10 %. Nel complesso, la totalità della strumentazione prevista dal nuovo piano di monitoraggio aggiornato è rappresentata nelle Figure 4.1 e 4.2, dove sono riportate rispettivamente la disposizione degli strumenti in planimetria e in prospettiva.

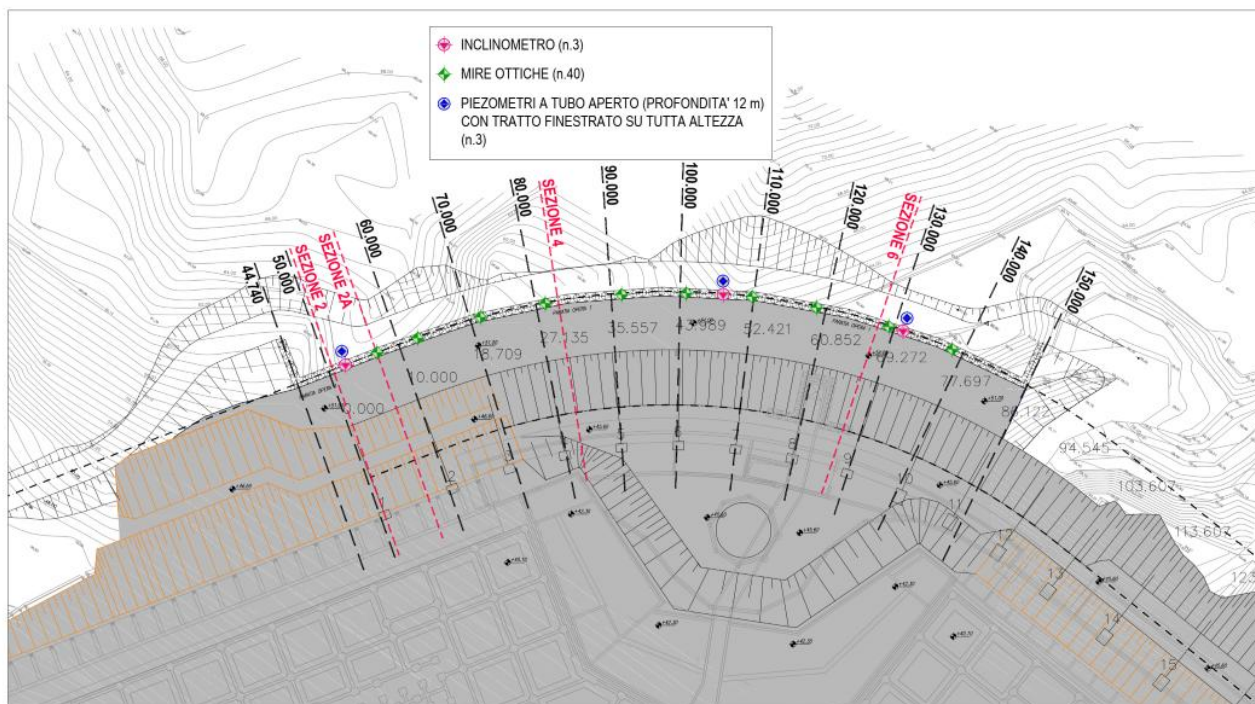


Figura 4.1 Planimetria strumentazione monitoraggio paratia



Figura 4.2 Prospetto strumentazione monitoraggio paratia

4.2 Sistema di monitoraggio

In questo documento di tesi viene approfondito in particolar modo il monitoraggio topografico delle mire ottiche installate sulla berlinese, tramite l'analisi delle letture effettuate dal teodolite a distanziamento elettrico installato su una base fissa. Brevi cenni sulle altre tecniche di monitoraggio e sulle relative strumentazioni utilizzate sono tuttavia riportati di seguito. Si segnala che tutte le varie tipologie di misure hanno subito un'interruzione nel corso degli anni, causata da motivi burocratici esterni legati alle dinamiche di cantiere. Le prime misure coprono un arco temporale di circa 3 anni, dal 2017 (anno di inizio lavori della paratia) al 2019. La ripresa del monitoraggio dell'opera avviene ad inizio 2025 ed è tutt'ora in svolgimento, con cadenze diverse a seconda della tipologia di strumentazione.

4.2.1 Misure Piezometriche

Permettono il controllo dei livelli idrici a monte della paratia, monitorando la spinta dell'acqua per assicurarsi che non generi instabilità e sovrappressioni eccessive. Le misure relative al biennio 2017 – 2019 sono state già riportate ed analizzate nel capitolo 2.3. Per quanto riguarda le altre letture piezometriche si segnala che non si dispone di misure complete e regolari; pertanto, di seguito vengono riportati gli unici dati reperiti ed utilizzabili. [21] Si tratta di letture effettuate da un piezometro a tubo aperto PZ1 di 26 m di profondità, situato a monte della paratia come riportato in Figura 4.3. La misura di zero è datata 19/05/25 e si hanno misurazioni fino al 31/07/25. Il report delle letture effettuate è mostrato nella tabella di Figura 4.4.



Fig. 4.3 Collocazione piezometro PZ1

PZ1	
Data misurazione	Soggiacenza in m
19/05/2025	9,08m
30/06/2025	9,33m
10/07/2025	9,33m
16/07/2025	9,31m
28/07/2025	9,30m (eseguita alle ore 11.15 a seguito di un evento temporalesco notturno)
31/07/2025	9,31m

Figura 4.4 Report monitoraggio piezometro PZ1

Le letture evidenziano un sostanziale equilibrio del livello idrico che si attesta intorno ai 9,3 m di profondità da p.c. e quindi confermano l'ipotesi di una circolazione idrica abbastanza superficiale.

4.2.2 Misure InclinoMetriche

Come già accennato nel paragrafo 4.1, le letture sono state effettuate sulla base di cinque tubi inclinometrici complessivamente installati. Di questi cinque, tre si trovano all'interno dei pali della paratia, mentre gli altri due sono installati nei sondaggi a monte. Risultano notevolmente significativi gli inclinometri interni ai pali, in quanto deformazioni eccessive dei tubi inclinometrici implicherebbero direttamente instabilità dei pali e della struttura nel suo complesso. La strumentazione utilizzata è caratterizzata dalla presenza di una sonda inclinometrica biassiale, centralina di interfaccia bluetooth, software Ghibli, sonda testimone e blocca cavo per testa pozzo. In sede di misurazione veniva portata la sonda a fondo foro operando in risalita con letture ogni 50 cm, scegliendo preliminarmente una guida di riferimento e misurando l'azimut rispetto al nord. La guida viene rinominata guida 1, le altre dalla 2 alla 4 in senso orario. Il sensore di rilevazione sul piano di scorrimento e quello sul piano ad esso ortogonale sono definiti rispettivamente A e B ed ognuno ha un verso positivo e negativo (Figura 4.5). Ogni misurazione conta 4 letture e i valori restituiti sono stati mediati.

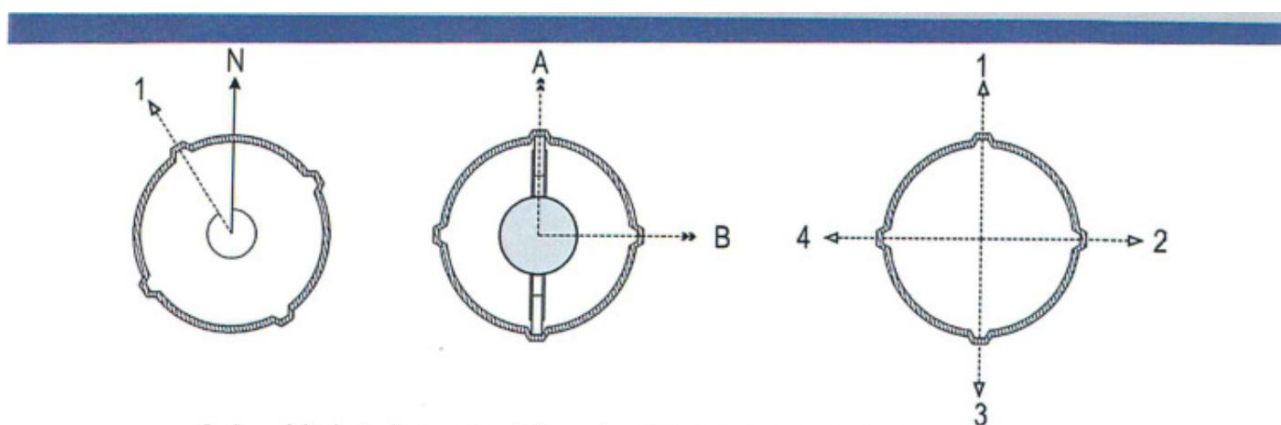


Figura 4.5 Sezione tubo, sonda e caratterizzazione guida e sensori

L'elaborazione dei risultati finali avviene considerando un punto iniziale di base e sommando ad esso i vari contributi alle diverse profondità, espressi come variazione tra le letture di zero e del giorno in esame. In questo modo si ha la possibilità di ricavare la deformata del tubo e quindi del palo nel quale è stato installato. I risultati di tali indagini sono stati espressi mediante tabelle, grafici, deformate spaziali e diagrammi polari. Tuttavia, in questo documento non verranno riportate le misure più datate, ma saranno analizzate le letture più recenti eseguite nello stesso arco temporale di quelle piezometriche citate nel paragrafo 4.2.1. Le specifiche tecniche dello strumento utilizzato sono riportate in Figura 4.6. I dati disponibili [22] riguardano l'inclinometro T1, situato in posizione centrale rispetto alla paratia, come mostrato in Figura 4.7. I risultati del monitoraggio inclinometrico sono riportati sia in forma grafica (Figura 4.8), sia tramite un diagramma polare (Figura 4.9). Nel grafico viene riportato l'andamento degli spostamenti registrati in funzione della profondità, mentre nel diagramma polare gli spostamenti sono rappresentati in funzione della direzione (conoscendo il Nord e leggendo gli scostamenti angolari rispetto ad esso).

Caratteristiche tecniche		
Modello	IN 910 - SV	IN 910 - PN
Sensore	Servoaccelerometro	Pendolo
Fondo scala	$\pm 15, \pm 30$	$\pm 10, \pm 30$
Alimentazione	$\pm 15V_{cc}$	$5V_{cc}$
Uscita	$\pm 5V$	$\pm 173.6mV$
Linearità	0.02% FS	0.5% FS
Ripetibilità	0.005%	0.1%
Allineamento	0.2°	0.3°
Variazione di zero in T.	0.005% FS/°C	0.05% FS/°C
Sensibilità in Temp.	0.0005 V/°C	0.1 %
Temperatura di funz.	$-10 \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$
Diametro (mm)	26	26
Lunghezza (mm)	690	690
Passo sonda (mm)	500	500
Peso	2.8 Kg	2.8 Kg
Precisione sonda (20mt.)	2 mm	5 mm
Materiale	INOX	INOX

Figura 4.6 Specifiche tecniche inclinometro

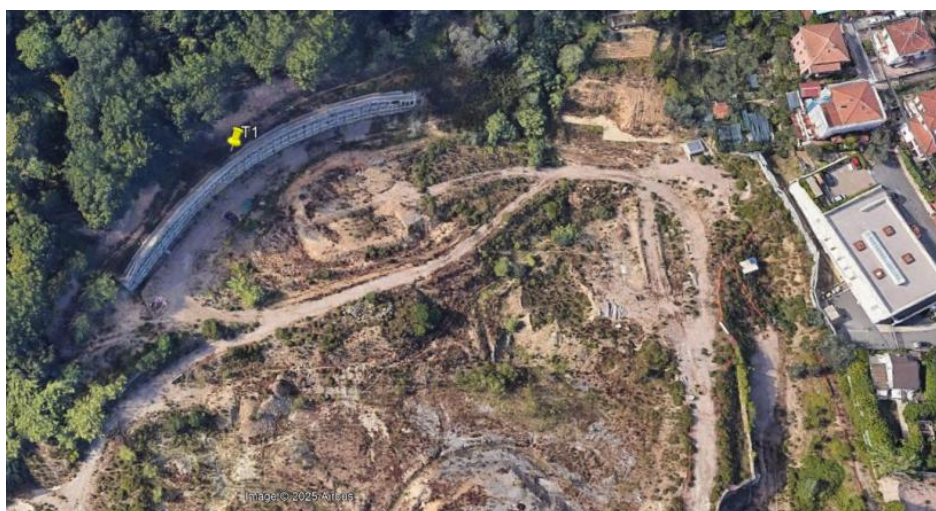


Figura 4.7 Posizione inclinometro T1

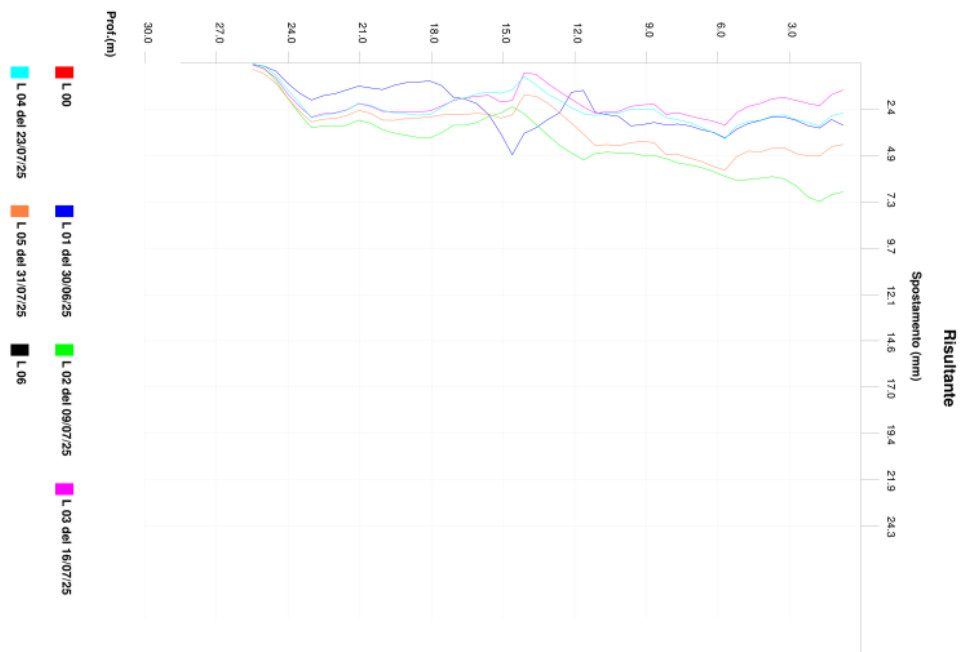


Figura 4.8 Grafico letture inclinometriche

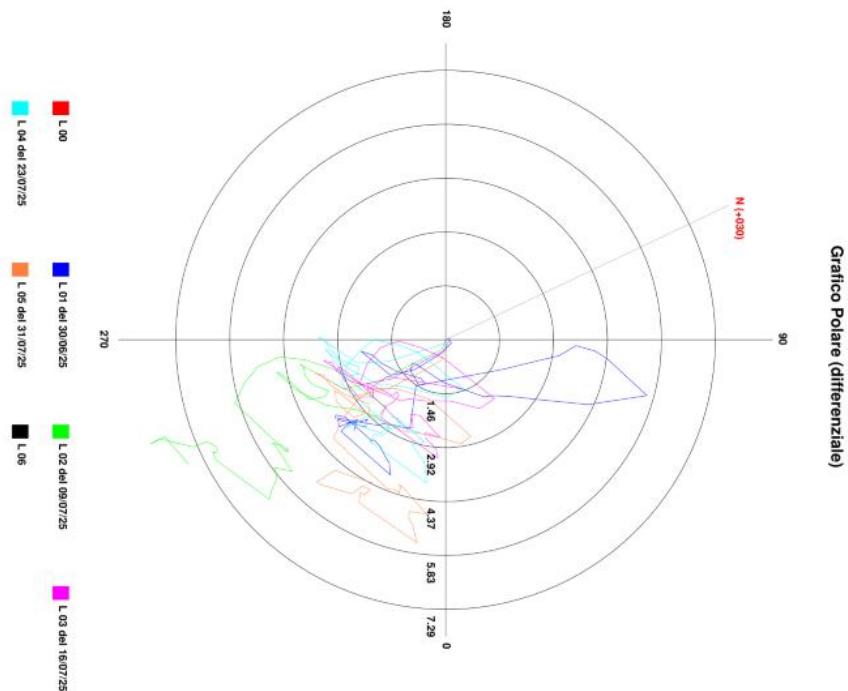


Fig. 4.9 diagramma polare letture inclinometriche

Le due modalità rappresentative confermano che i valori di spostamento registrati rientrano nel range atteso in fase progettuale. Le deformazioni maggiori si hanno in testa al palo fino ad un valore massimo di 7,3 mm, mentre dal diagramma polare si evince un movimento in direzione sud-est.

4.2.3 Misure Celle di carico

Le 9 celle di carico costituiscono una strumentazione integrativa sui tiranti che permette di monitorare il loro comportamento nei confronti di variazioni di tensione o movimenti del terreno.

La misurazione è ottenuta con celle del tipo DE-S applicate su tiranti definitivi dotati di protezione elementari di tipo lungo e CAP di protezione lungo [23]. Si segnala che l'ancoraggio è ritesabile, pertanto se necessario va operata una periodica rimessa in tiro così da mantenere una forza residua di ancoraggio congruente con le ipotesi progettuali.

Il funzionamento si basa sulla generazione di un segnale elettrico proporzionale al carico applicato, rilevato dagli estensimetri in relazione alla deformazione subita. Nelle letture dei valori risultanti inoltre occorre tenere in considerazione possibili perdite dovute al sistema stesso.

I dati disponibili sono stati raccolti in forma tabulare e grafica [24]. L'evoluzione temporale delle letture effettuate dalle celle di carico è qui di seguito riportata esclusivamente tramite grafici. Le misure relative ai tiranti del I ordine sono riportate in Figura 4.10, quelle relative ai tiranti del II ordine in Figura 4.11 e le restanti relative ai tiranti del terzo ordine in Figura 4.12.

Nel complesso l'interpretazione dei dati ottenuti mostra una certa conformità con quelle che erano le ipotesi progettuali. Non si segnalano discontinuità evidenti ed eccessive nel tiro dei tiranti, con valori che si mantengono pressoché uniformi e in range accettabili.

L'unica eccezione riguarda il tirante 5, che tra il 08/08/18 e il 10/08/18 subisce un incremento di tensione stabilizzatosi poi con l'evolversi delle misure. Tuttavia, in quei giorni si registra l'inizio dei lavori di perforazione ed iniezione dei tiranti del secondo ordine, fattore che probabilmente ha influito a tale proposito.

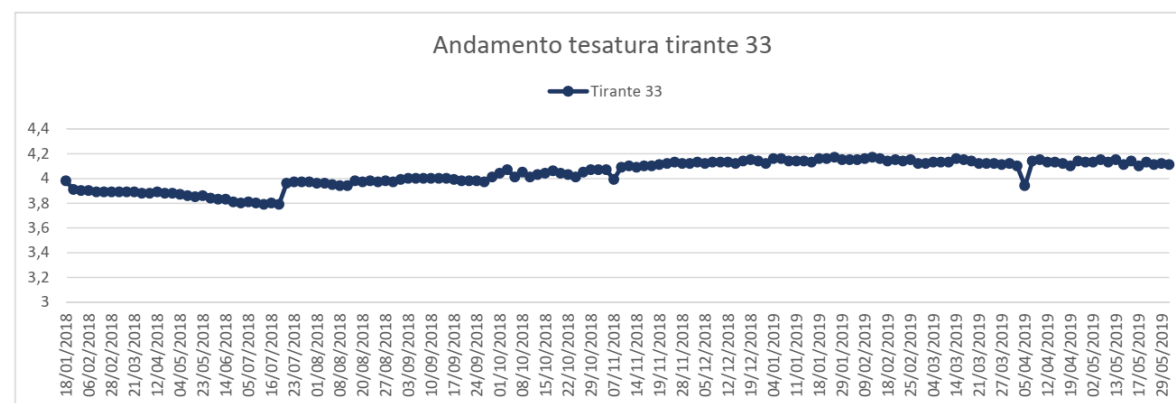
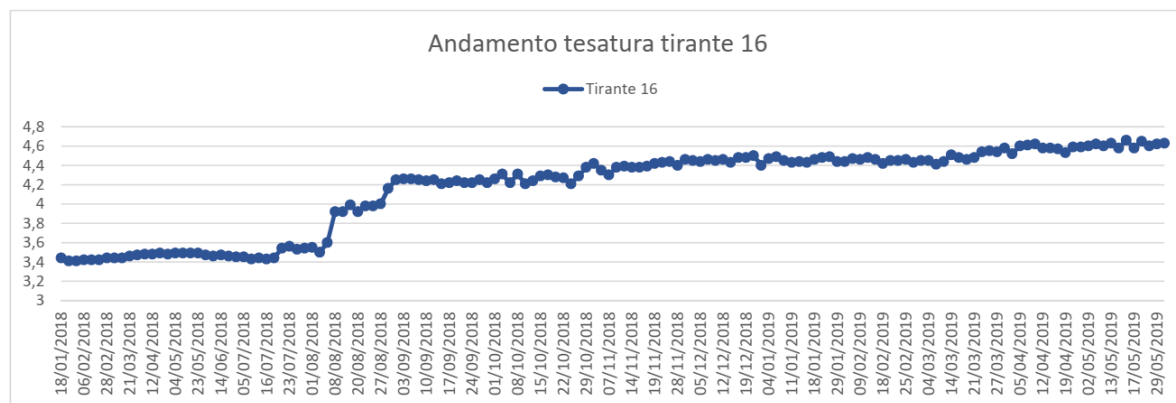
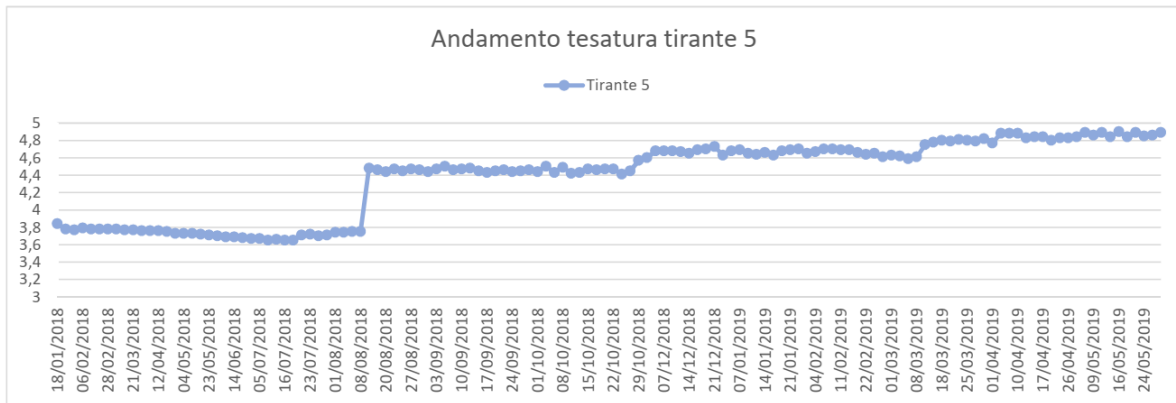


Figura 4.10 Grafici letture celle di carico tiranti I ordine

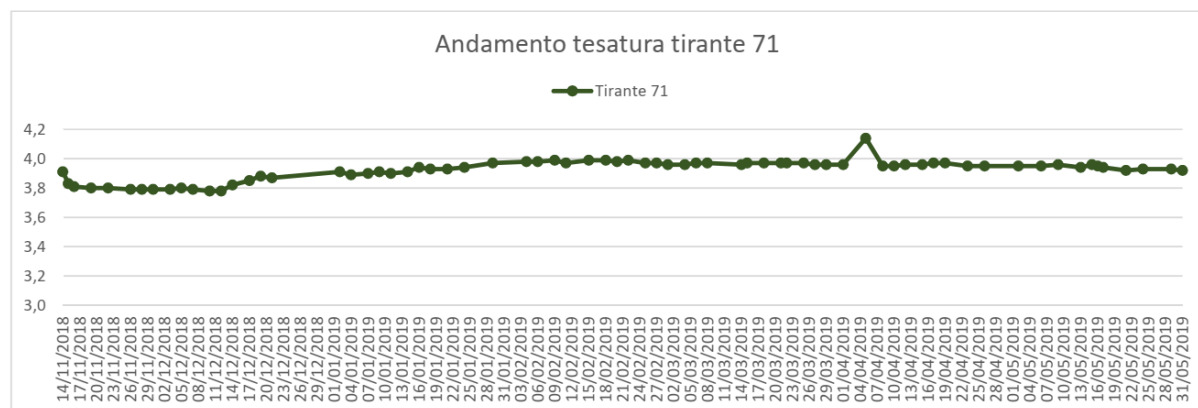
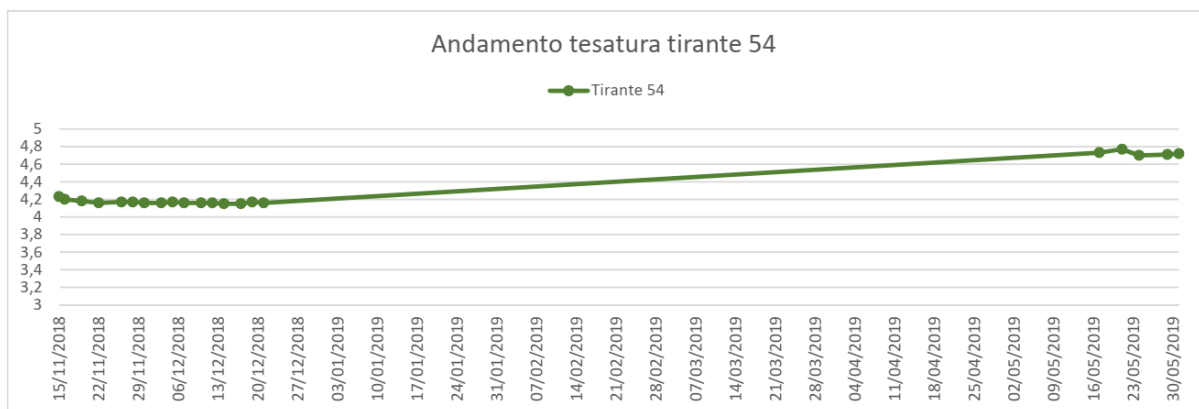
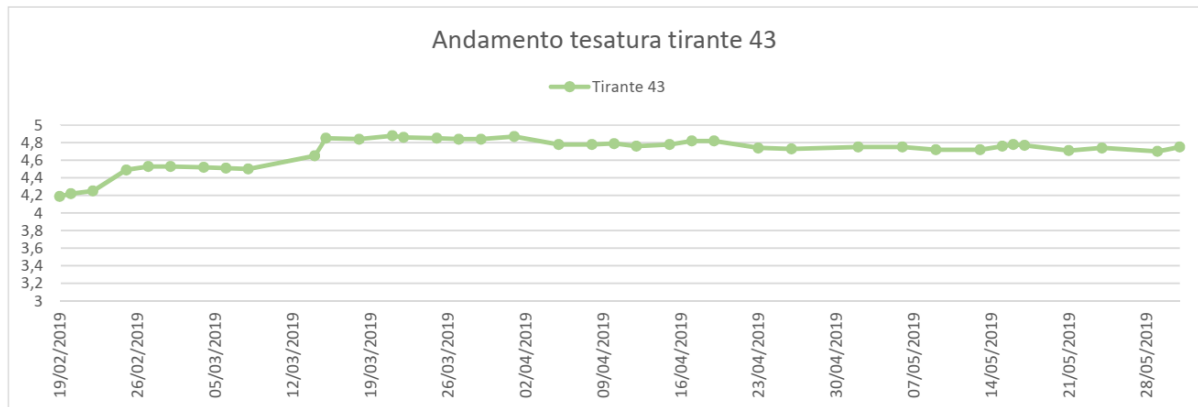


Figura 4.11 Grafici letture celle di carico tiranti II ordine

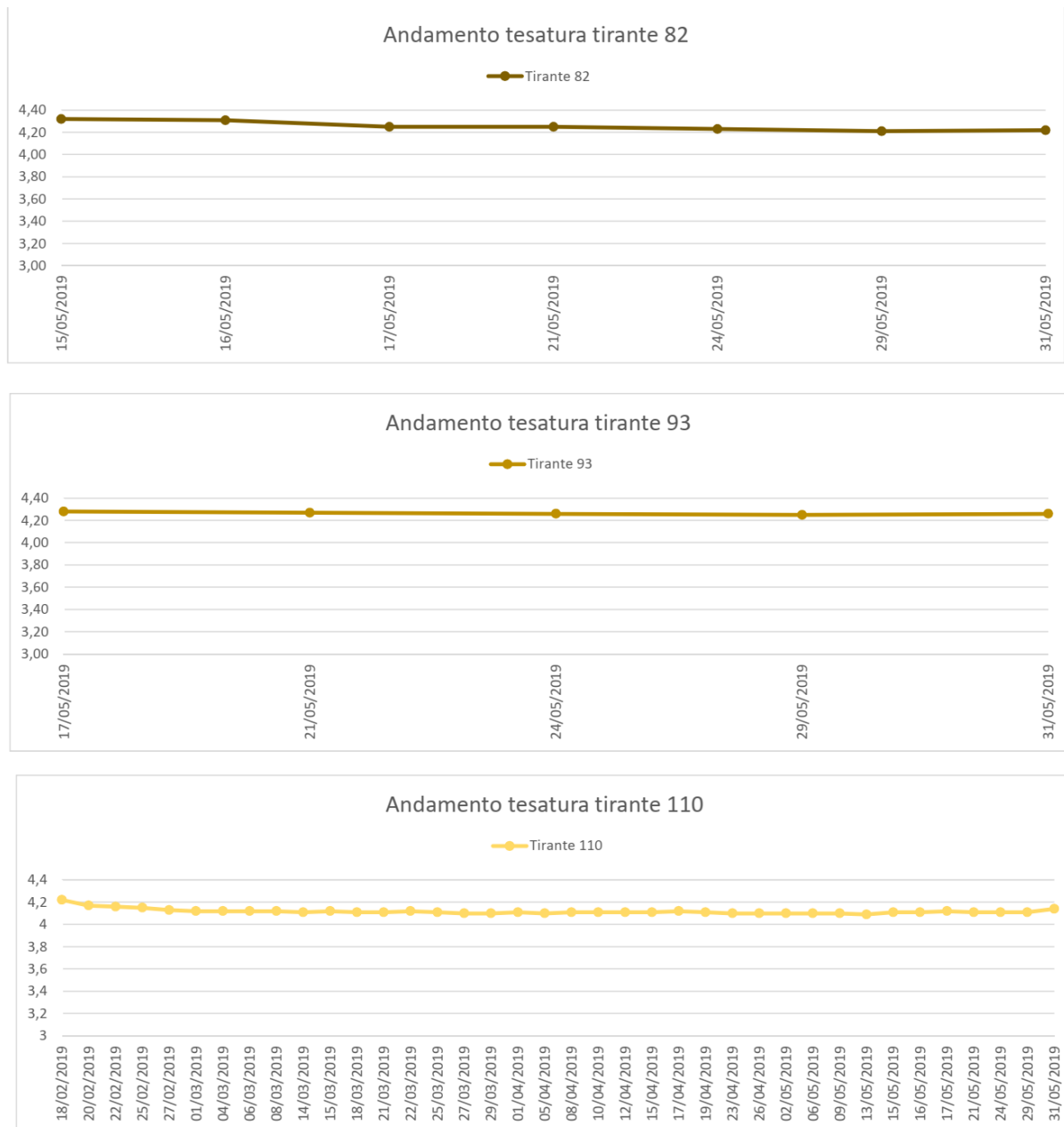


Figura 4.12 Grafici letture celle di carico tiranti III ordine

4.2.4 Misure Mire Topografiche

Nel presente documento si è scelto di riportare esclusivamente le letture delle mire topografiche più recenti, effettuate a partire da inizio 2025. Si tratta infatti di un monitoraggio effettuato sull'opera completamente realizzata e inoltre si dispone di una quantità di materiale maggiormente completa e significativa. Il monitoraggio della paratia è stato effettuato ad opera dello "Studio Azimuth Geometri associati Bertucci e Pedemonte" e qui in particolare viene analizzato un periodo di misure compreso tra il 27/02/25 e il 06/01/25 [25]. Come già accennato in precedenza, le modalità esecutive prevedevano un teodolite con distanziometro integrato installato su una postazione fissa. In particolare, si tratta di una stazione totale robotica Geomax Zoom70 avente precisione angolare dell'ordine di 1", la cui scheda tecnica è riportata in Figura 4.13 [26].

Misure angolari

Precisione	1" (0,3 mgon), 2" (0,6 mgon), 5" (1,5 mgon)
Risoluzione del display	0,1" (0,1 mgon)
Metodo	Assoluto, continuo, diametrale
Compensazione	Quadri-assiale

Cannocchiale

Ingrandimento	30x
---------------	-----

Misure della distanza (prisma)

Portata / precisione / tempo	Modalità standard: 3500 m/1 mm + 1.5 ppm/tip. 0,8 s* Modalità lunga portata: >10,000 m / 5 mm+2 ppm / tip. 2,5 s
------------------------------	---

Misure della distanza (senza riflettore)

Portata	accXess5 / accXess10 500 m / 1000 m
Precisione	2 mm + 2 ppm**
Tempo di misura	Tip. 3 s
Acquisizione precisa	8x20 mm a 50 m

Motorizzazione

Tecnologia	Servomotori ibridi
GeoTRail: ricerca del prisma basata su GNSS	
Velocità	50 g/s
TRack: registrazione automatica del prisma	
Portata	800 m con prisma rotondo
Velocità max	90 km/h a 100 m
AiM: puntamento automatico di precisione del prisma	
Portata	1.000 m con prisma rotondo
Precisione Hz/V	1"
Tecnica	Elaborazione immagine



Distanziometro (modalità riflettore): laser classe 1 conforme a IEC 60825-1 resp. EN 60825-1; **piombo laser:** laser classe 2 conforme a IEC 60825-1 resp. EN 60825-1; **distanziometro (modalità senza riflettore):** laser classe 3R conforme a IEC 60825-1 resp. EN 60825-1.

GEOMAX

Per maggiori informazioni:
geomax-positioning.it

NavLight™: ausilio di allineamento

Portata	da 5 m a 150 m
Precisione	5 cm a 100 m

Interfaccia

Tastiera	Completamente alfanumerica; 35 tasti; illuminata (2ª opzionale)
Display	Full VGA 640 x 480 a colori e touchscreen con retroilluminazione a LED
Registrazione dati	1 GB di memoria interna; scheda SD rimovibile e chiavetta USB
Porte	Seriale, USB, Bluetooth® interna; maniglia Bluetooth® a lunga portata e alimentazione esterna
Sistema operativo	Microsoft® Windows® CE 6.0

Specifiche fisiche

Peso	5 - 5,3 kg (senza batteria e basamento)
Temperatura di esercizio/stoccaggio	Da -20° C a 50° C / Da -40° C a 70° C
Classe di protezione	IP55, resistente a polvere e acqua
Umidità	95%, senza condensa

Alimentazione

Batteria interna	Li-Ion 4.4 Ah / 7.4 V rimovibile
Tempo di esercizio	7-10 h***

Piombo

Tipo	Punto laser, luminosità regolabile
Precisione	1,5 mm a 1,5 m di altezza dello strumento

* Modalità veloce;
** > 500 m: 4 mm + 2 ppm;
*** Singola misurazione ogni 30 secondi a 25 °C. In base alle condizioni, la durata della batteria potrebbe essere inferiore.



0818 - 874713 it Copyright GeoMax AG.

Le illustrazioni, i colori, le offerte di prodotti, le descrizioni e le specifiche tecniche non sono vincolanti e potrebbero variare senza preavviso.

Tutti i marchi e i nomi appartengono ai rispettivi proprietari.

PARTNER DI DISTRIBUZIONE AUTORIZZATO GEOMAX

Figura 4.13 Scheda tecnica GeoMax ZOOM70

La stazione di misura si trova sul lastrico dell'edificio destinato a radioterapia, collocato ad est rispetto all'area ospedaliera. Qui lo strumento è tenuto in posizione fissa e centrata su di una basetta in acciaio inox, costituita da un'asta metallica e da una piastra. (Figura 4.14).



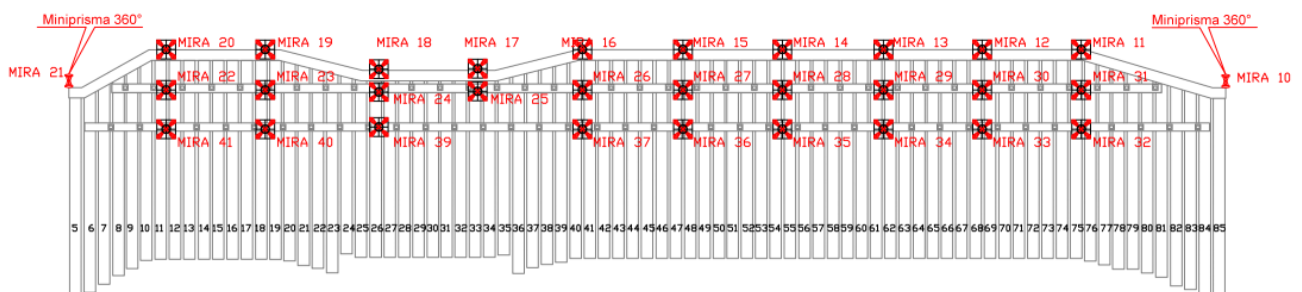
Figura 4.14 Stazione totale di misura situata in cima all'edificio di radioterapia

Il teodolite rileva la propria posizione con un software X-PAD ULTIMATE sulla base di tre prismi opportunamente posizionati nell'area di cantiere come si può vedere in Figura 4.15. I primi due, denominati con A e B, si trovano su due edifici esistenti, mentre il prisma C è posizionato in cima ad un muro in cemento armato a sud-ovest della paratia.



Figura 4.15 Disposizione planimetrica stazione totale e prismi

Lo strumento effettua le letture di trentuno prismi posizionati sulla berlinese, al livello della trave di testa di coronamento e dei primi due ordini di tiranti. Le mire sono numerate dalla 10 alla 41, secondo il prospetto di Figura 4.16. Le mire 10 e 21 sono le più esterne e sono due prismi a 360°.



MONITORAGGIO BERLINESE
IDENTIFICAZIONE MIRE

Figura 4.16 Prospetto disposizione mire ottiche

Il monitoraggio viene effettuato tramite 6 letture per ogni prisma inquadrato, considerando ai fini delle analisi il corrispondente valore medio. Ogni giornata prevede infatti tre cicli di misure, sia dritta che capovolta. Il piano prevede una frequenza di misure inizialmente con cadenza settimanale, ma con l'obbligo di intensificazione in caso di valori riscontrati prossimi alle soglie di allarme prefissate. I valori finali sono restituiti sotto forma di scostamento rispetto al centro dell'arco della berlinese e i calcoli sono stati effettuati dallo studio tecnico responsabile del monitoraggio citato in precedenza, utilizzando fogli Excel e formule di interpolazione lineare. In particolare, si è scelto un sistema di riferimento xy per le mire ottiche, con l'asse x che si sviluppa lungo la direzione longitudinale della paratia e direzione positiva verso est, mentre l'asse y è trasversale all'opera e diretto positivamente verso monte. Ogni mira pertanto è caratterizzata dalle proprie coordinate spaziali X e Y, che permettono di ricavare le variazioni ($\Delta x, \Delta y$) della loro posizione nel tempo rispetto alla lettura di zero, effettuata nel giorno 27/02/25. La rappresentazione dei risultati fornita dallo studio viene mostrata in Figura 4.17.

MONITORAGGIO BERLINESE

Data rilevamento:

28/02/2025

Temperatura:

13 pioggia

MIRA 20

N° punto

20

Coord. X

-70,765

Coord. Y

331,934

(mm.)

3

MIRA 19

N° punto

19

Coord. X

-64,887

Coord. Y

335,905

(mm.)

4

MIRA 18

N° punto

18

Coord. X

-59,294

Coord. Y

347,134

(mm.)

5

MIRA 17

N° punto

17

Coord. X

-53,824

Coord. Y

353,804

(mm.)

5

MIRA 16

N° punto

16

Coord. X

-46,134

Coord. Y

359,714

(mm.)

5

MIRA 15

N° punto

15

Coord. X

-38,963

Coord. Y

365,375

(mm.)

5

MIRA 14

N° punto

14

Coord. X

-31,264

Coord. Y

369,824

(mm.)

5

MIRA 13

N° punto

13

Coord. X

-22,812

Coord. Y

373,455

(mm.)

6

MIRA 12

N° punto

12

Coord. X

-14,381

Coord. Y

376,484

(mm.)

5

MIRA 11

N° punto

11

Coord. X

-5,543

Coord. Y

378,378

(mm.)

6

Movimento verso il centro dell'arco della berlinese

MIRA 21

N° punto

21

Coord. X

-25,882

Coord. Y

324,119

(mm.)

1

MIRA 22

N° punto

22

Coord. X

-30,498

Coord. Y

321,690

(mm.)

4

MIRA 23

N° punto

23

Coord. X

-34,718

Coord. Y

319,809

(mm.)

1

MIRA 24

N° punto

24

Coord. X

-38,124

Coord. Y

317,024

(mm.)

3

MIRA 25

N° punto

25

Coord. X

-41,249

Coord. Y

313,809

(mm.)

4

MIRA 26

N° punto

26

Coord. X

-44,519

Coord. Y

310,374

(mm.)

5

MIRA 27

N° punto

27

Coord. X

-48,487

Coord. Y

306,507

(mm.)

7

MIRA 28

N° punto

28

Coord. X

-50,843

Coord. Y

302,348

(mm.)

4

MIRA 29

N° punto

29

Coord. X

-52,479

Coord. Y

297,864

(mm.)

4

MIRA 30

N° punto

30

Coord. X

-54,298

Coord. Y

293,152

(mm.)

5

MIRA 31

N° punto

31

Coord. X

-56,478

Coord. Y

288,196

(mm.)

7

MIRA 32

N° punto

32

Coord. X

-58,114

Coord. Y

283,144

(mm.)

1

Movimento verso il centro dell'arco della berlinese

MIRA 41

N° punto

41

Coord. X

-70,480

Coord. Y

331,719

(mm.)

3

MIRA 40

N° punto

40

Coord. X

-

Coord. Y

-

(mm.)

non mis.

MIRA 39

N° punto

39

Coord. X

-59,237

Coord. Y

347,024

(mm.)

4

MIRA 37

N° punto

37

Coord. X

-46,540

Coord. Y

359,996

(mm.)

4

MIRA 36

N° punto

36

Coord. X

-

Coord. Y

-

(mm.)

non mis.

MIRA 35

N° punto

35

Coord. X

-30,847

Coord. Y

369,770

(mm.)

4

MIRA 34

N° punto

34

Coord. X

-

Coord. Y

-

(mm.)

non mis.

MIRA 33

N° punto

33

Coord. X

-

Coord. Y

-

(mm.)

non mis.

MIRA 32

N° punto

32

Coord. X

-

Coord. Y

-

(mm.)

non mis.

Movimento verso il centro dell'arco della berlinese

Figura 4.17 Rappresentazione risultati monitoraggio topografico studio “Azimuth”

Come si può vedere dall'immagine, ogni giornata di misura è rappresentata con la data, la temperatura e le condizioni atmosferiche. Le mire sono riportate con piccole tabelle disposte secondo la loro reale collocazione come nel prospetto. Per ogni mira sono riportate le coordinate X, Y misurate dallo strumento e lo scostamento rispetto al centro dell'arco della berlinese. Questo parametro, espresso in mm, diventa il valore di riferimento da analizzare in fase di interpretazione dei risultati. Come detto nel paragrafo 4.1 infatti, la soglia di allerta per gli spostamenti è stata fissata intorno ai 12 mm, mentre il valore atteso per questo tipo di opere rigide è inferiore a 8 mm. A scopo esemplificativo, in Figura 4.18 viene mostrata la modalità di esecuzione dei calcoli del valore di spostamento rispetto al centro dell'arco della berlinese, per una mira casuale (in questo caso la 11).

Calcolo scostamenti mira 11																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
-----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Figura 4.18 Calcoli Excel per ricavare valore scostamento rispetto a centro berlinese

Le due rette AB e AC sono calcolate con semplici formule aritmetiche conoscendo le coordinate dei due punti per i quali passano. Il punto A rappresenta le coordinate della mira 11 nel giorno di lettura di zero, mentre il punto B le coordinate della mira 11 relative alla giornata in cui è stata effettuata la misurazione. Il punto C invece è caratterizzato dalle coordinate inerenti alla posizione del centro dell'arco della berlinese. Viene poi ricavata la funzione della retta perpendicolare alla retta passante per AC e calcolato il loro punto d'intersezione I mettendo a sistema le due equazioni. A questo punto si ricava il valore cercato dello scostamento con la formula della lunghezza di un segmento, note le coordinate dei suoi punti estremi (I e A).

Nel complesso in questo documento verranno analizzate ed interpretate diverse giornate di misurazioni, per un periodo compreso tra il 27/02/25 (lettura di zero) e il 05/01/26, di circa un anno. La cadenza delle misure varia da settimanale (come da piano iniziale) fino a giornaliera, nel caso in cui siano stati registrati valori allarmanti. Il valore significativo da tenere in considerazione è lo scostamento rispetto al centro dell'arco della berlinese. Tale parametro è stato rappresentato analizzando sia la sua evoluzione nel tempo per ogni giornata di misura, sia la sua evoluzione per ogni mira, al fine di individuare periodi critici o mire specifiche dal comportamento anomalo.

Nel capitolo seguente verranno riportati i grafici ritenuti significativi e le relative considerazioni del monitoraggio nel periodo esaminato. Si specifica che sono state considerate come rilevanti, per il periodo analizzato, solamente le letture effettuate dalla stazione di misura principale, ubicata in cima all'edificio di radioterapia. Nel corso del monitoraggio, infatti, era stata prevista un'ulteriore stazione di misura secondaria localizzata a sud-est della paratia. Tale stazione è rappresentata nell'immagine di Figura 4.19, scattata in occasione del sopralluogo effettuato in data 16/10/25.



Figura 4.19 Ubicazione stazione misura secondaria

La stazione è stata ultimata proprio in quella data e dalla settimana seguente sarebbero dovute partire le misurazioni. Da questa seconda stazione sarebbero state effettuate letture su 14 mire di nuova installazione, oltre che sulle mire 10 e 21. Il prospetto con la disposizione delle mire complessive è riportato in Figura 4.20, dove le nuove mire rilevabili da doppia stazione sono contrassegnate in verde.

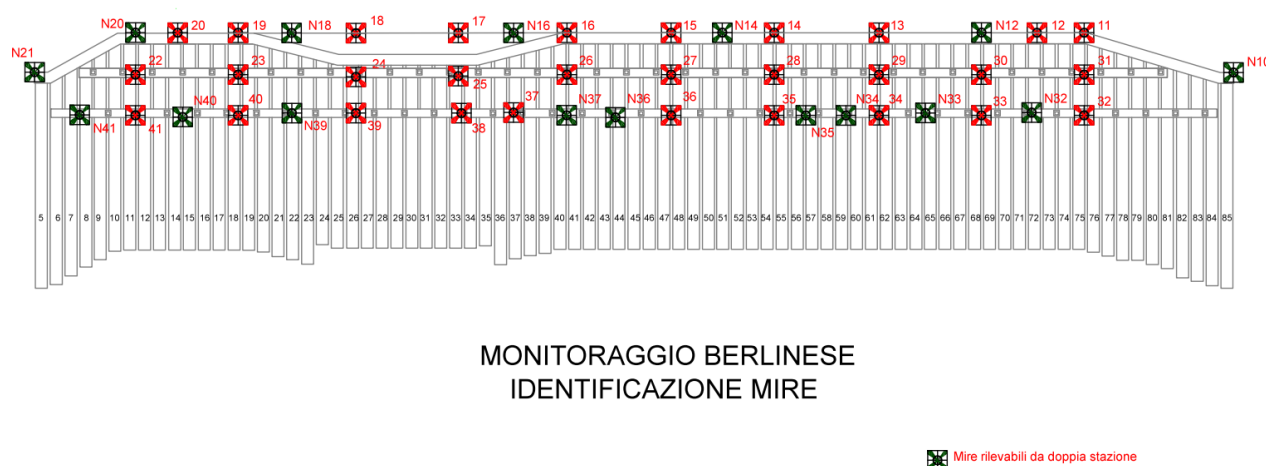


Fig. 4.20 Prospetto con aggiunta nuove mire rilevabili da doppia stazione

In data 16/10/25 è stata quindi effettuata la lettura di zero, tuttavia, dopo appena 5 giornate di misurazione (frequenza settimanale), sono stati riscontrati dei problemi. Infatti, in occasione di uno scavo per la fondazione di una gru da cantiere, si è verificato uno smottamento del terreno nei pressi della nuova stazione di monitoraggio tale da renderla inutilizzabile.

Per tale motivo è stata prontamente installata una nuova stazione di misura in posizione differente (Figura. 4.21), ultimata qualche giorno dopo il sopralluogo datato 09/12/25. La lettura di zero è stata effettuata in data 12/12/25 e le misurazioni eseguite settimanalmente.

Tuttavia, avendo analizzato un periodo di monitoraggio complessivo dal 27/02/25 al 05/01/26, la poca quantità di dati relativi alle letture effettuate da doppia stazione sulle mire vecchie e nuove, le rende meno significative.

Pertanto, si è scelto soltanto di accennarle, riportando invece i risultati del monitoraggio delle mire iniziali da parte della stazione principale riferite alla lettura di zero datata 27/02/25. In questo modo si hanno a disposizione una grande quantità di dati tra loro coerenti e maggiormente indicativi al fine di interpretare il comportamento della berlinese.

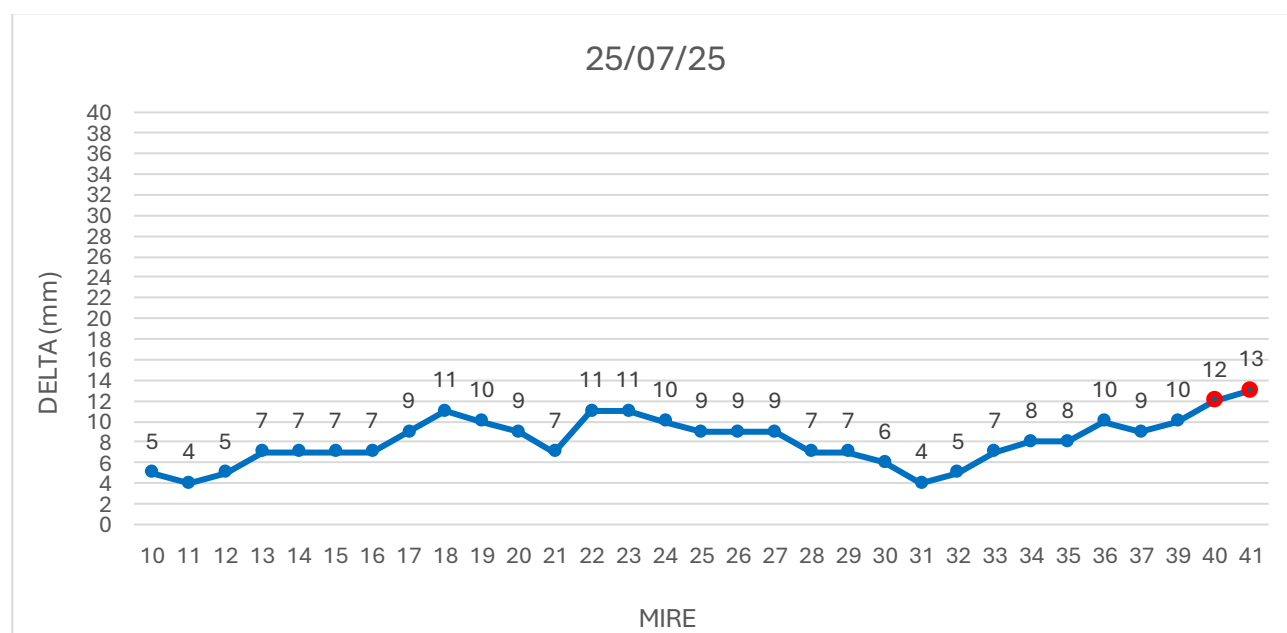
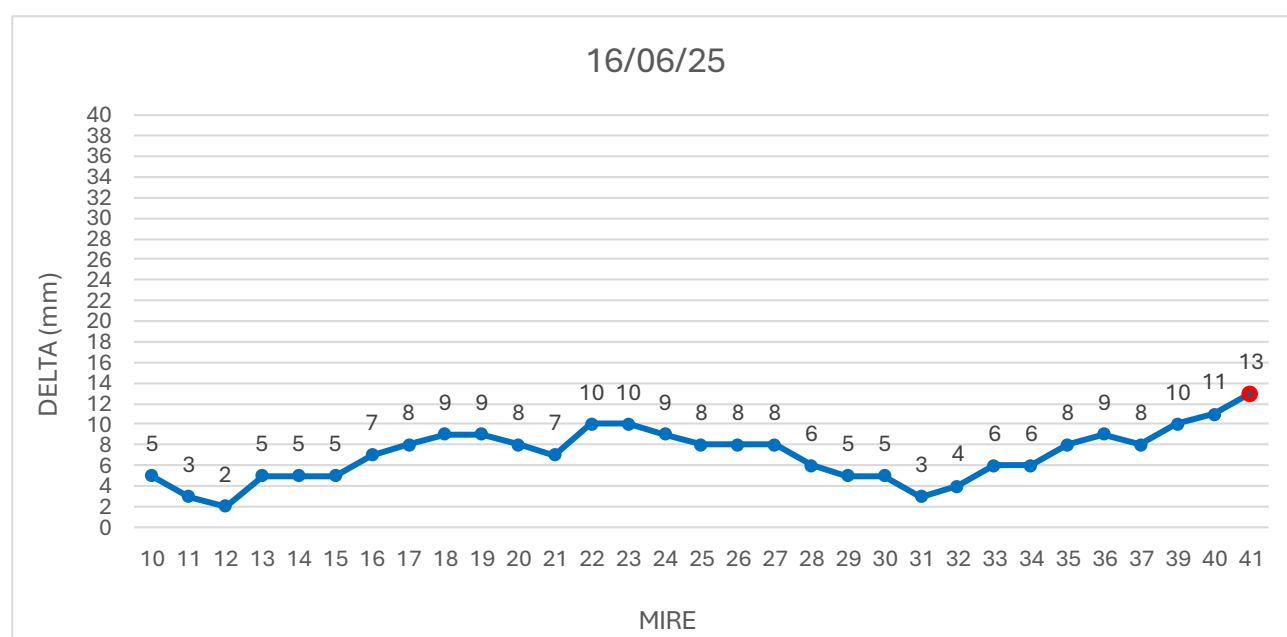


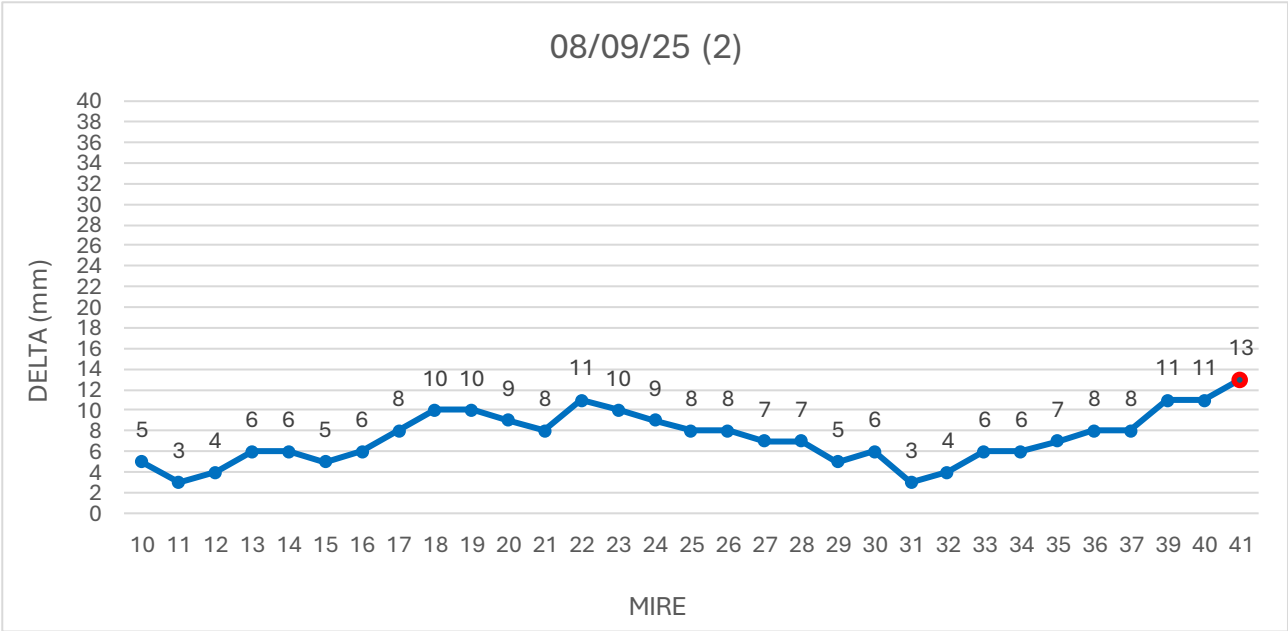
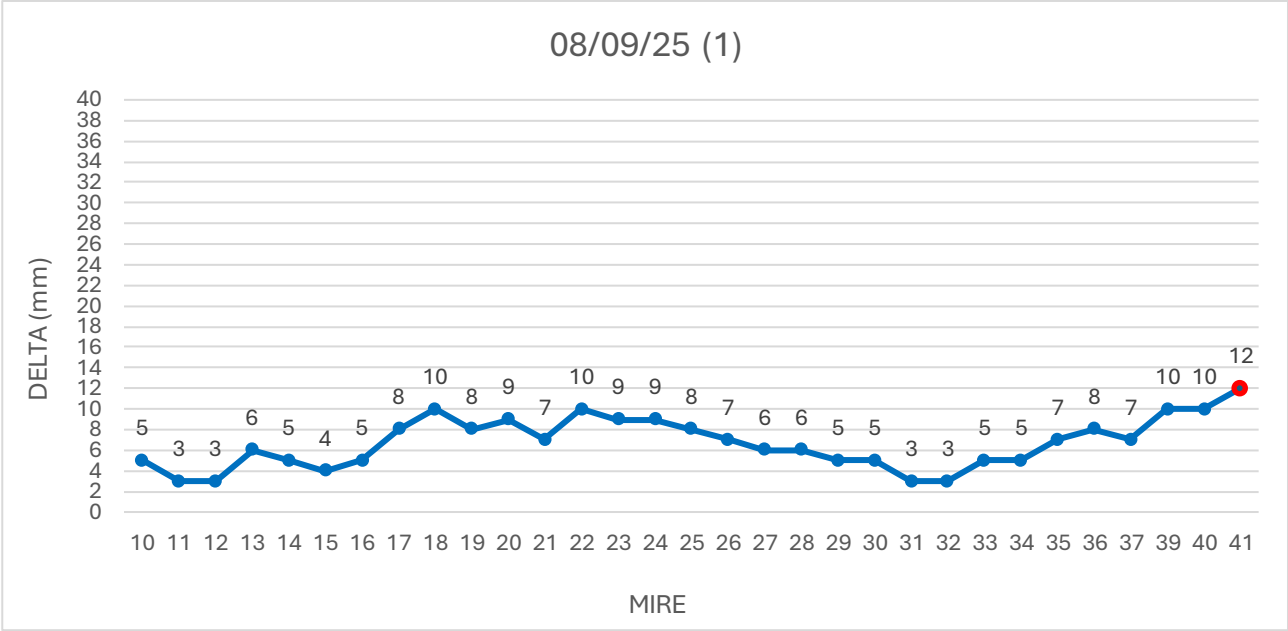
Fig.

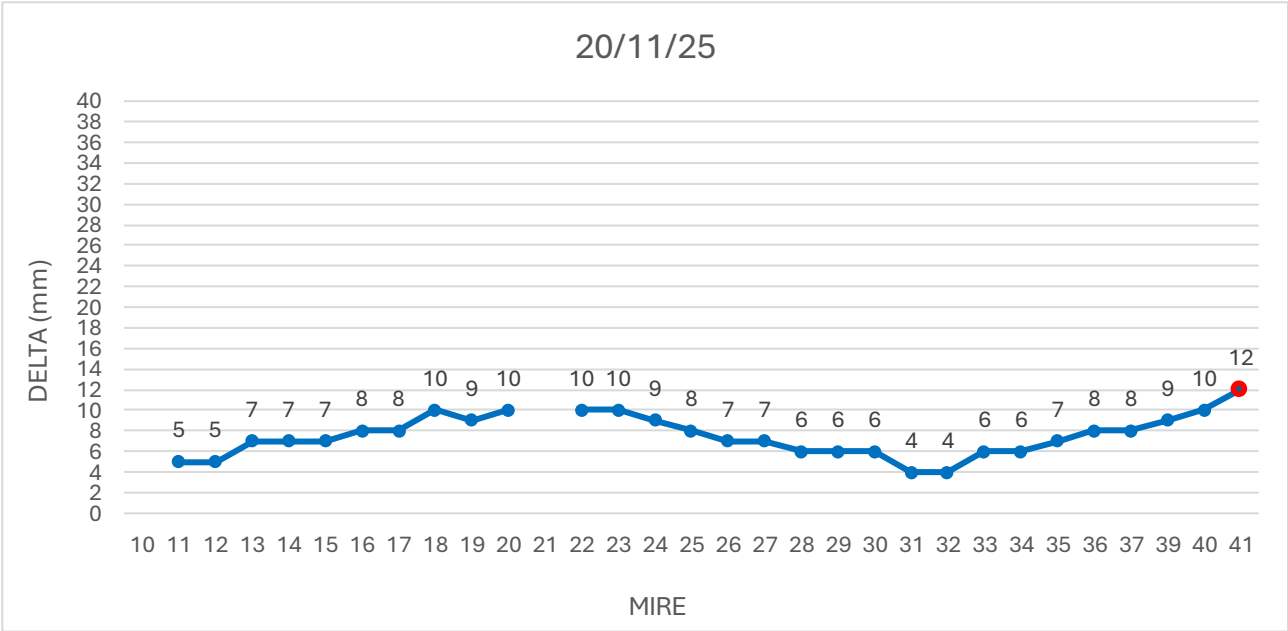
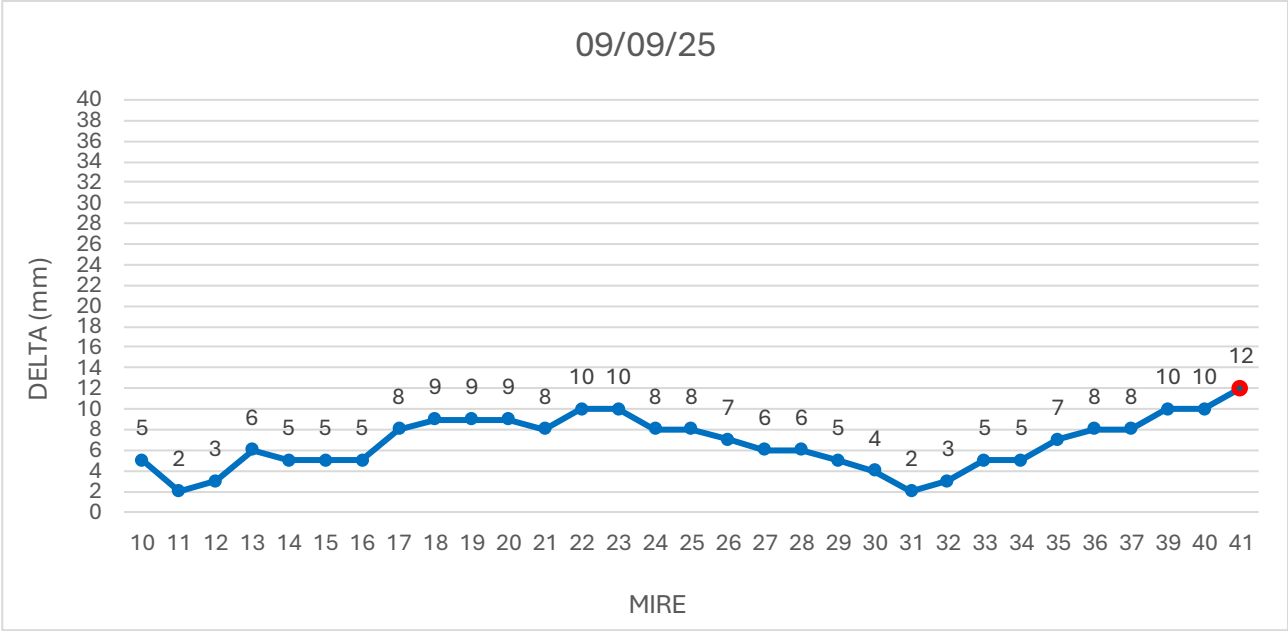
Figura 4.21 Ubicazione nuova stazione a seguito di problemi con la precedente

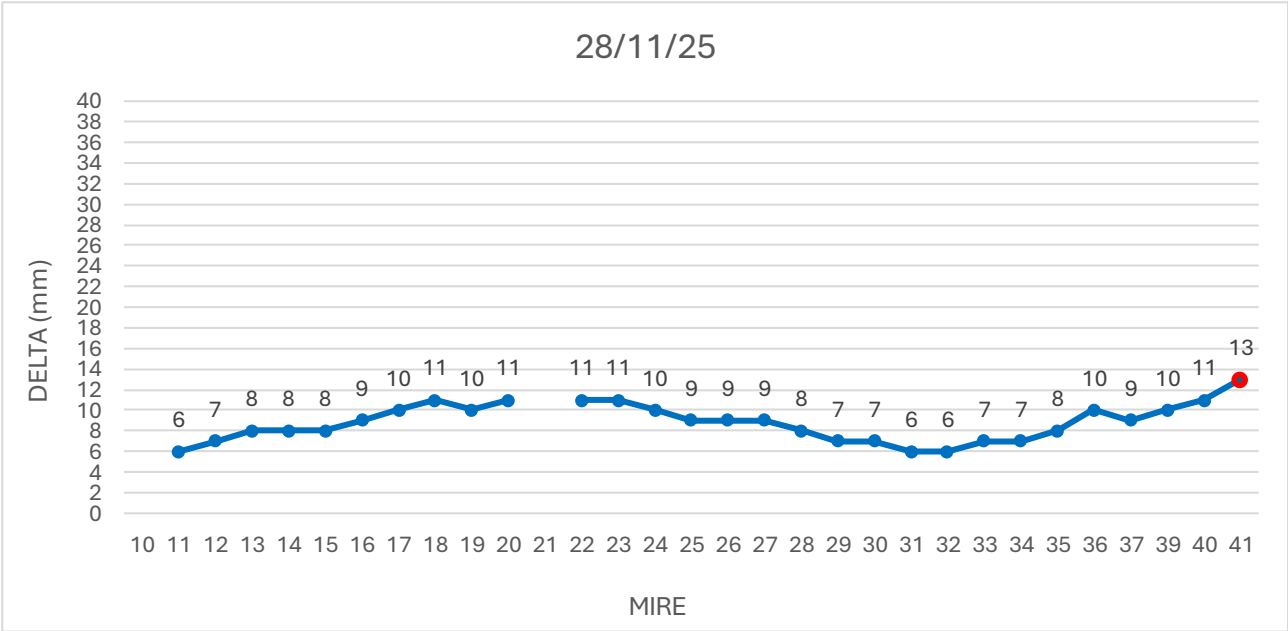
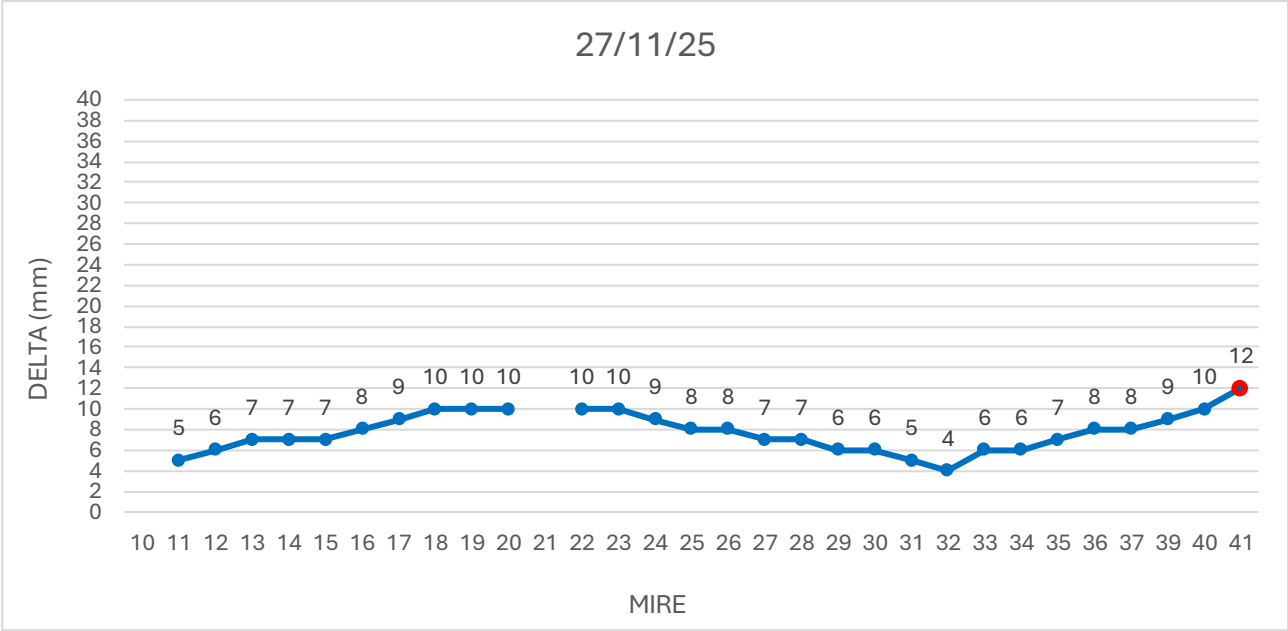
4.3 Analisi dei risultati

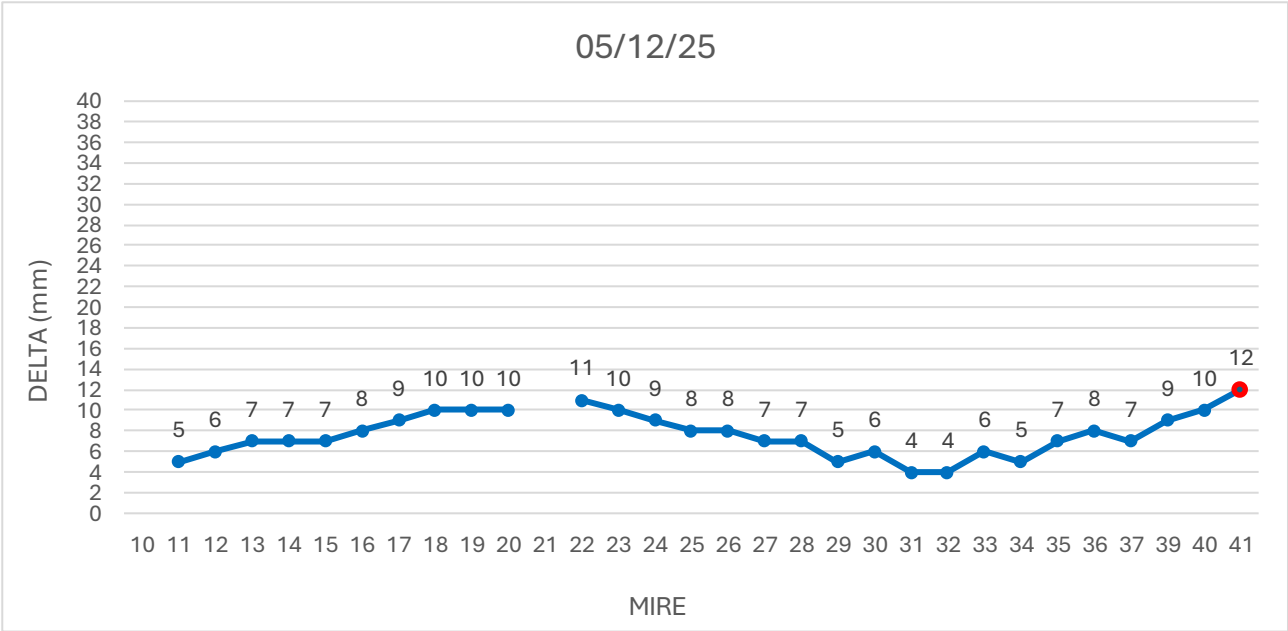
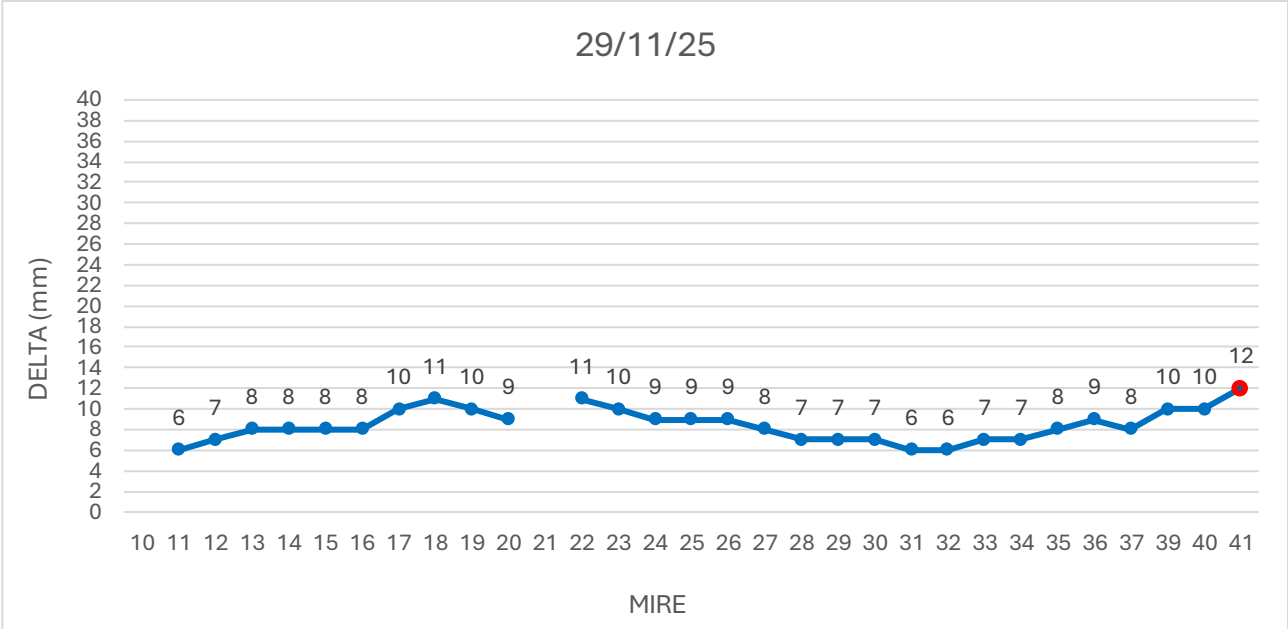
Le letture sono state interpretate nel complesso sulla base principalmente di due diverse tipologie di grafici. Sono stati generati quindi due report [27] [28]; uno relativo all'evoluzione nel tempo delle misure per giornata di misurazione, mentre l'altro dedicato ad ogni singola mira con la propria storia deformativa registrata. Come detto in precedenza, il parametro chiave considerato è stato lo scostamento di ogni singola mira rispetto al centro dell'arco della berlinese, espresso in mm. In questo modo è stato possibile interpretare le letture in funzione del comportamento sia delle singole mire o settori, sia del periodo di misurazione. Nei grafici inoltre ogni misura caratterizzata da un valore di spostamento $\Delta \geq 12 \text{ mm}$ è stata contrassegnata con un pallino rosso, ad indicare il raggiungimento del valore di allarme prefissato in sede progettuale. Di seguito sono riportati i grafici maggiormente significativi per l'interpretazione delle letture e le conseguenti considerazioni finali sottostanti. Prima sono stati inserite le misure giornaliere salienti e poi quelle relative alle singole mire dal comportamento deformativo ritenuto maggiormente anomalo.

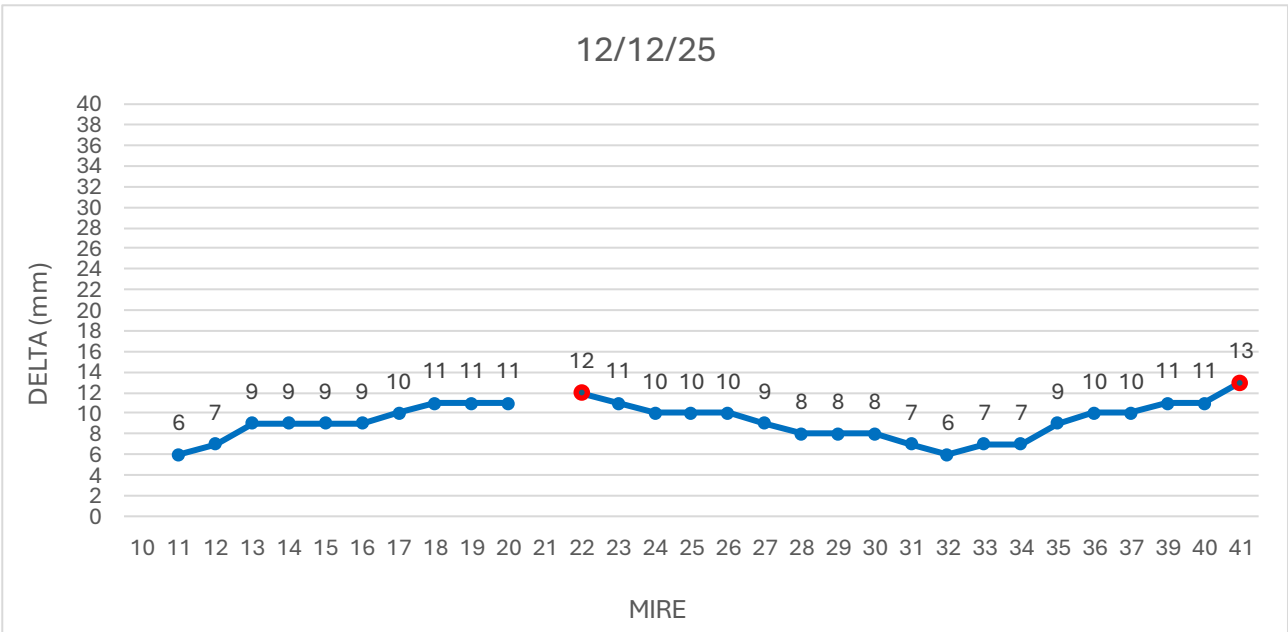
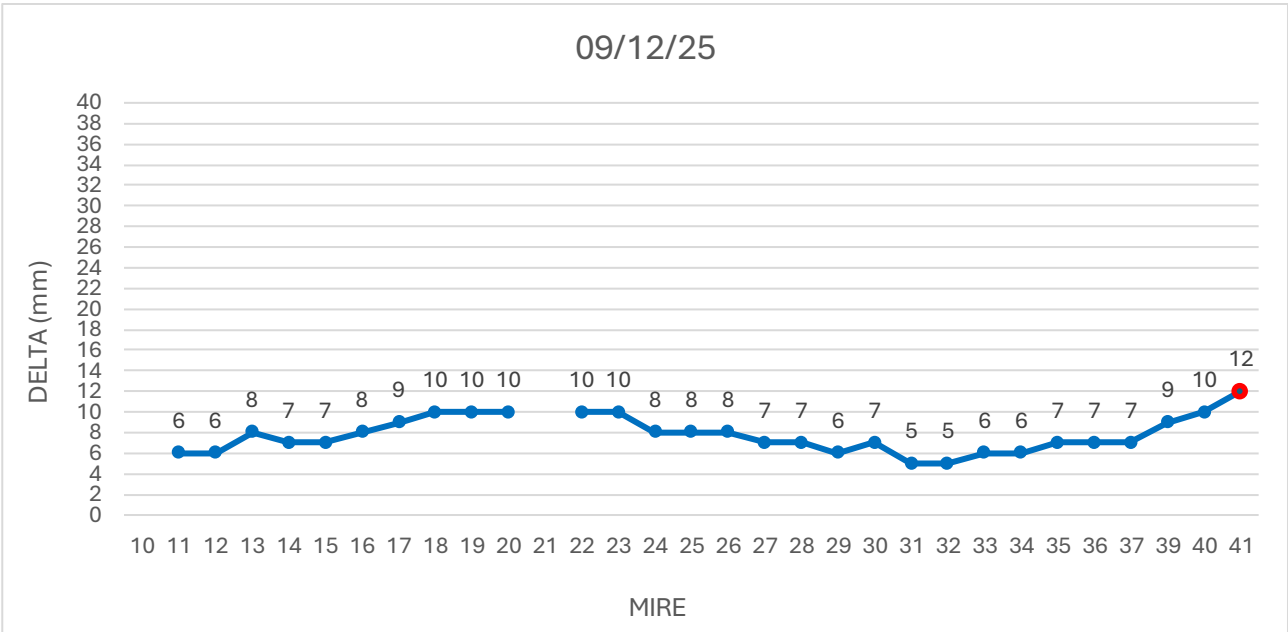


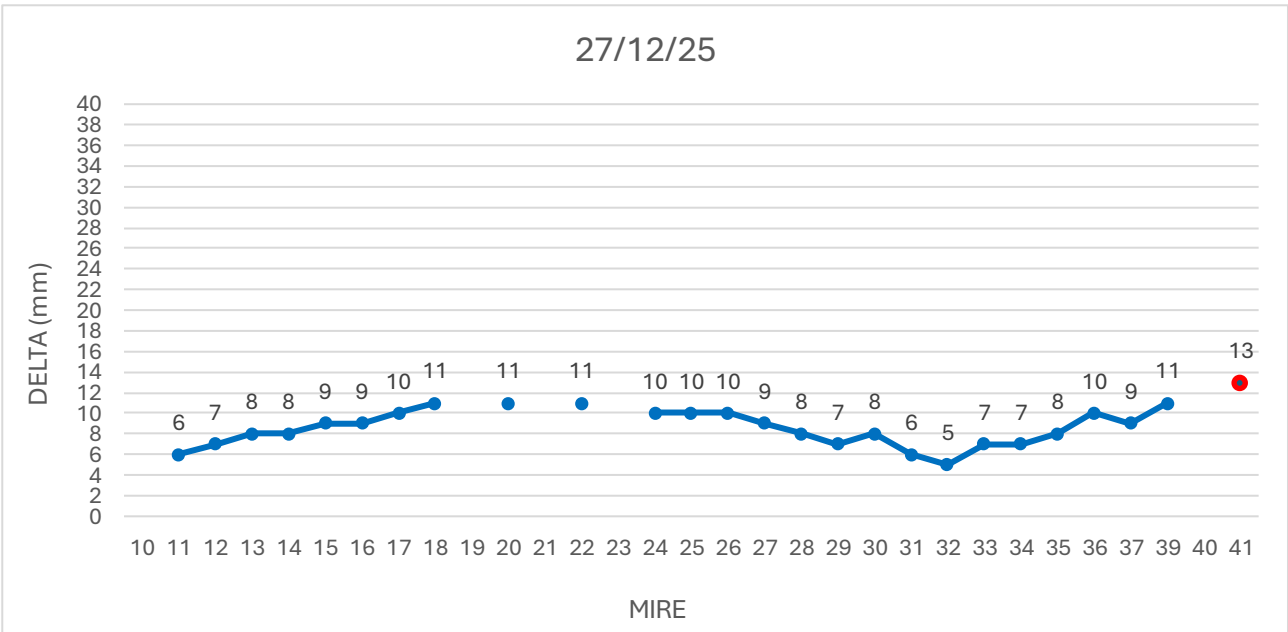
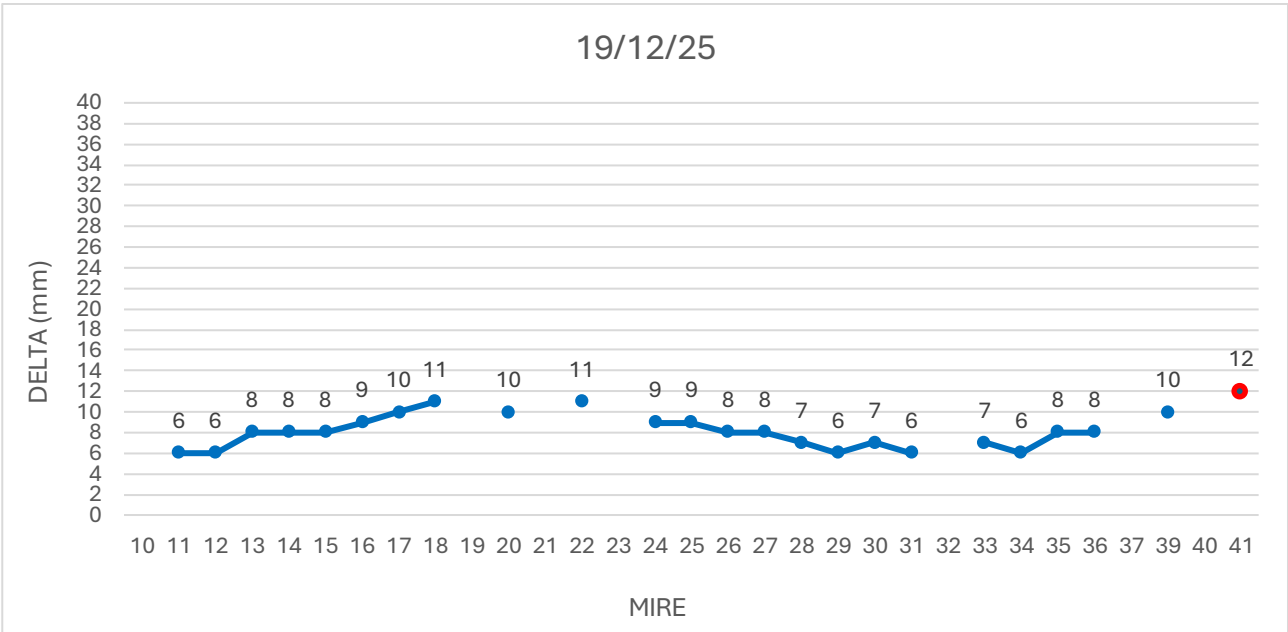


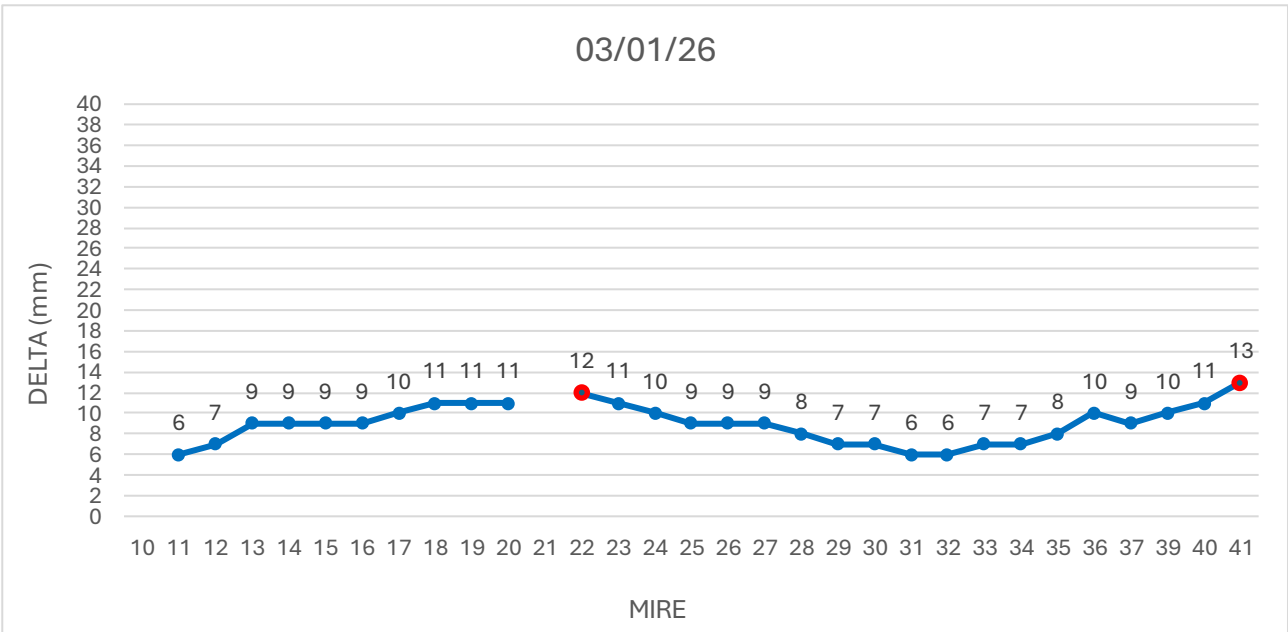
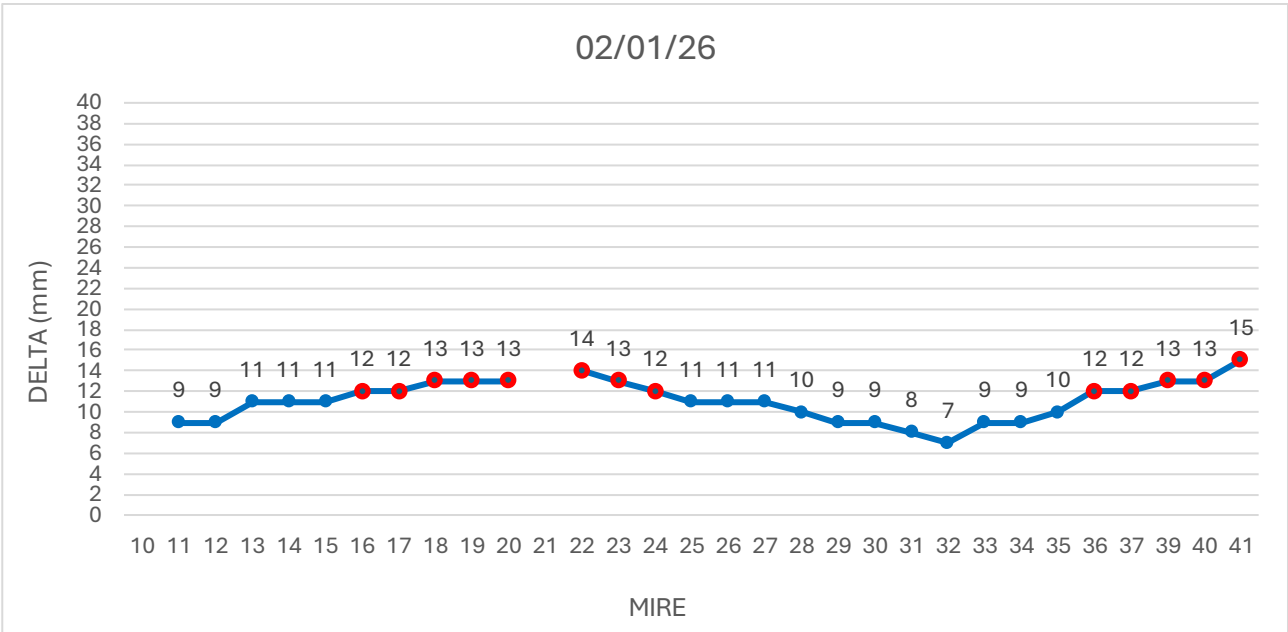


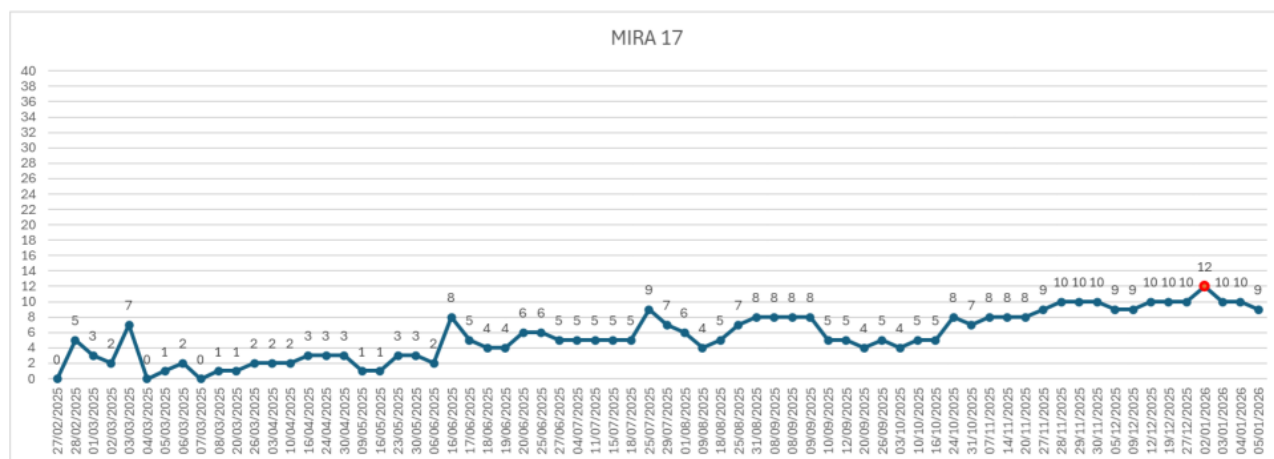


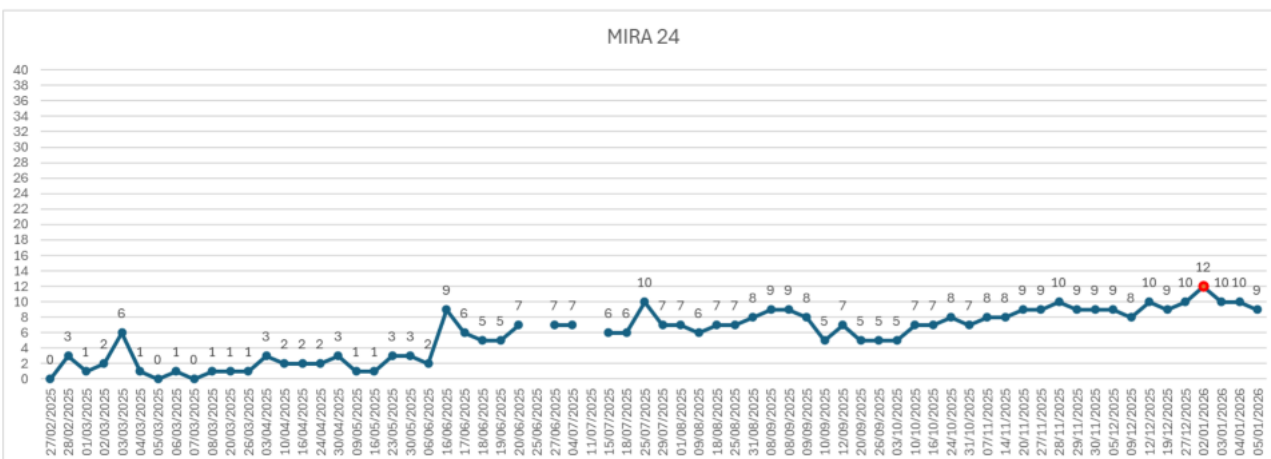
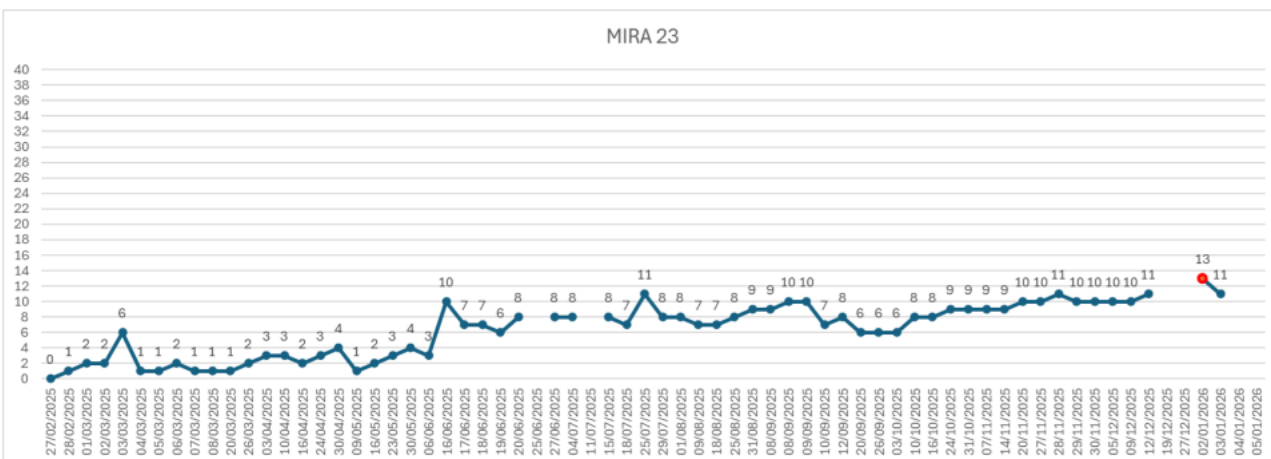


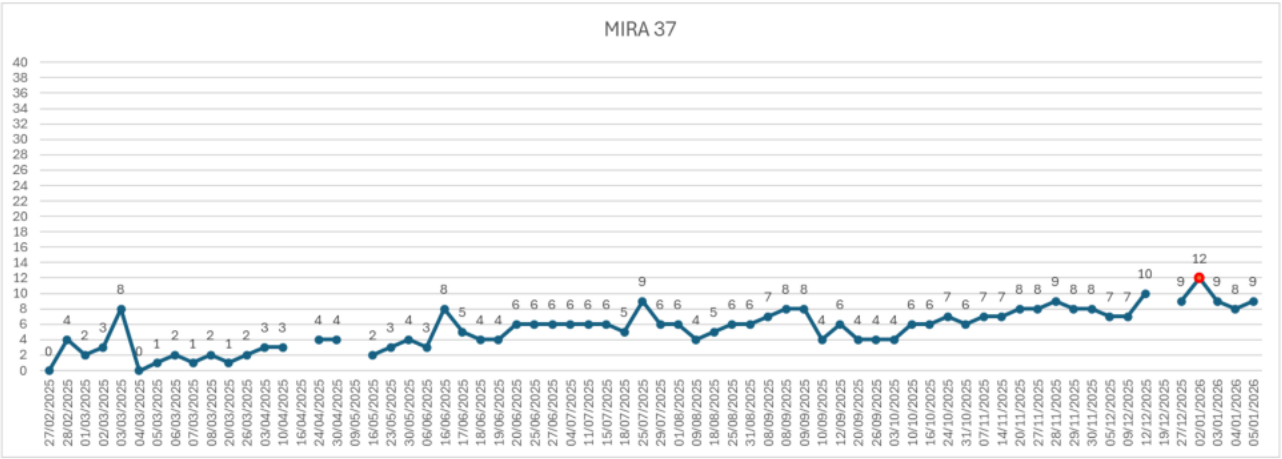
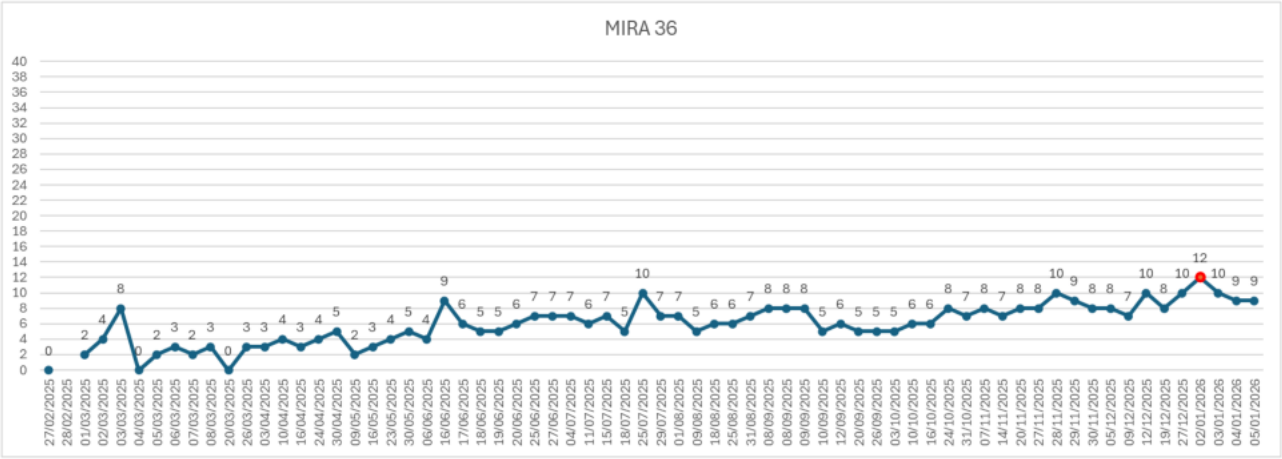


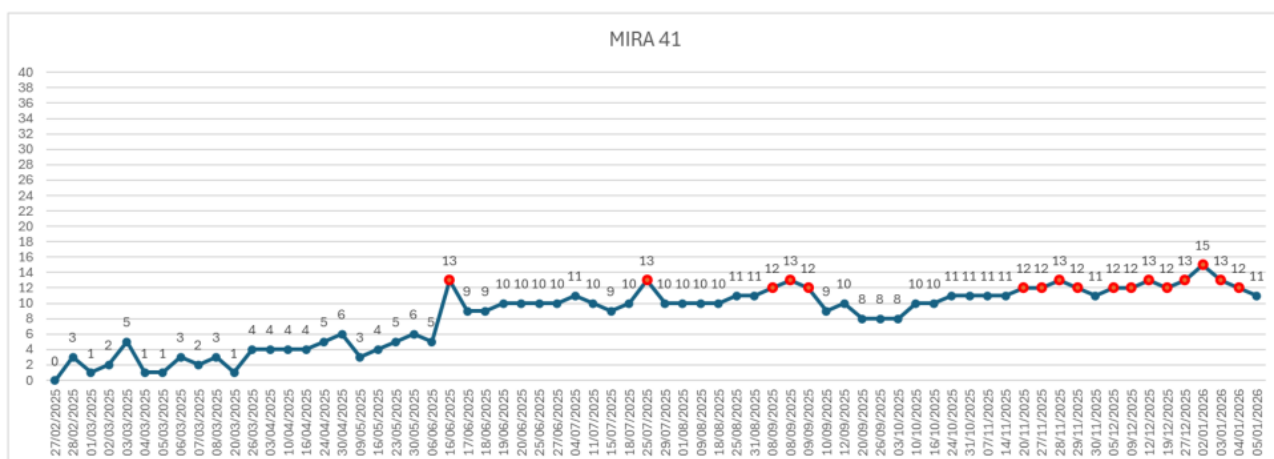
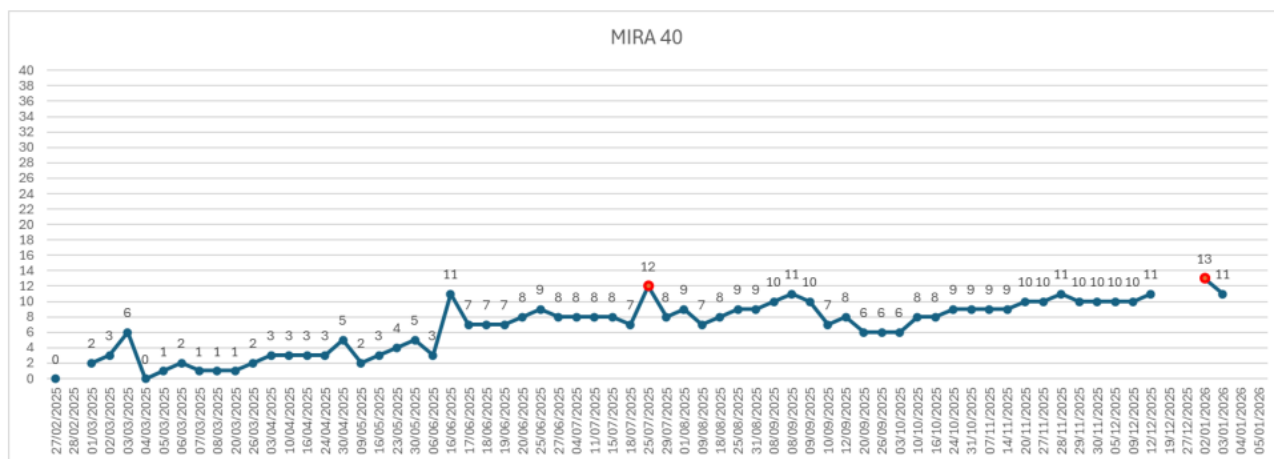












Osservando i dati ottenuti, si nota come per il primo periodo di misure gli spostamenti rimangano entro limiti accettabili e siano abbastanza contenuti. In data 16/06/25 è stato registrato il primo valore di allarme pari a 13 mm relativo alla mira 41, ma in generale tale giornata è stata indicativa di un incremento degli spostamenti complessivo rispetto ai periodi precedenti. Si riporta che in quella data la temperatura era di 27 °C e le condizioni atmosferiche caratterizzate da cielo coperto. Le misure seguenti hanno evidenziato un sostanziale rientro dei valori all'interno dei limiti, così come la maggior parte di quelle effettuate nel periodo estivo, ad eccezione del giorno 25/07/25. Le mire 40 e 41 infatti hanno fatto registrare spostamenti rispettivamente di 12 e 13 mm, con un incremento complessivo delle altre, in particolare quelle situate nel settore ovest della paratia. Tale andamento trova riscontro in alcune delle giornate di misurazione appartenenti al periodo settembre-inizio dicembre. Tra queste rientrano la doppia lettura in data 08/09/25 e quella del giorno seguente, le letture effettuate nella terza metà di novembre e quelle di inizio dicembre. Ottobre è stato caratterizzato invece da misure relativamente basse e simili a quelle del periodo estivo, dove nessuna mira ha raggiunto uno spostamento pari al valore di allerta. Si segnala che tale valore nel periodo appena citato è stato registrato esclusivamente dalla mira 41, anche se altre mire si sono avvicinate molto con spostamenti di 10-11 mm. Le ultime misure analizzate relative al periodo di monitoraggio considerato sembrano proseguire con questa tendenza. Va segnalato che in data 12/12/25, anche la mira 22 oltre alla 41 ha raggiunto il valore di allarme pari a 12 mm.

Le letture maggiormente critiche sono state registrate in data 02/01/26, giornata caratterizzata da una temperatura di 15° C e tempo variabile. In tale giornata ben 13 mire (tutte situate nella zona centro-ovest della berlinese) hanno fatto registrare spostamenti $\Delta \geq 12$ mm, con le mire 22 e 41 che hanno raggiunto i loro valori massimi pari rispettivamente a 14 e 15 mm. Le rimanenti letture a disposizione fino al 05/01/26 mostrano un parziale rientro dei valori, i quali si mantengono comunque molto prossimi alla soglia di allarme.

Quanto detto viene confermato dalla seconda tipologia di grafici sopra riportati, nei quali sono diagrammate le misure nel tempo delle mire dal comportamento anomalo. Si nota come vengano riportate esclusivamente letture di mire appartenenti al settore centro-ovest della paratia. In particolare, le mire situate all'estremità sinistra della struttura (osservando l'opera da valle) si distinguono per i valori maggiori. Infatti, se già la mira 22 è caratterizzata da 4 misure uguali o superiori alla soglia di allerta, la mira dal comportamento maggiormente anomalo è sicuramente la 41. Situata lungo la trave di collegamento del secondo ordine di tiranti, ha fatto registrare spostamenti critici per ben 17 volte. In generale, dalla lettura del 16/06/25 (primo valore di allarme rilevato dell'intero piano di monitoraggio) in poi, i suoi spostamenti sono sempre stati superiori al valore atteso (8 mm) e prossimi o superiori a quello di allarme, raggiungendo un picco massimo di 15 mm.

Alla luce delle considerazioni effettuate, il comportamento della struttura così come rilevato dalla strumentazione all'interno dell'attività di monitoraggio, risulta non allarmante ma comunque da continuare ad attenzionare. C'è da segnalare che i valori di soglia attesi e di allarme erano stati ipotizzati sulla base di strutture analoghe ed esperienze di cantiere pregresse. Sebbene le letture riportino valori di spostamento in alcuni casi elevati, l'evoluzione delle misure nel suo complesso mostra un comportamento quasi oscillatorio ed elastico della paratia, in un moto di assestamento normale per opere di questa tipologia. Questo perché i valori non aumentano o diminuiscono progressivamente nel tempo in maniera uniforme, ma si alternano nel corso delle varie giornate di misura. Al contrario, sarebbe stato sicuramente allarmante un aumento o decremento progressivo dello spostamento delle mire, indice di un movimento di potenziale collasso verso valle o monte. Tuttavia, la presenza di tre ordini di tiranti, posti ad un interasse verticale anche abbastanza fitto considerata la profondità dei pali e l'altezza fuori terra, garantisce alla struttura una rigidità intrinseca.

In sede di analisi dei valori critici registrati, si era pensato tra le potenziali cause ad ipotetiche spinte dell'acqua a monte nel settore ovest oppure a modalità esecutive dei tiranti non perfettamente conformi alle ipotesi progettuali. La numerosità delle indagini geognostiche effettuate anche nei pressi della paratia aveva evidenziato una falda abbastanza superficiale e in effetti, in occasione dei sopralluoghi effettuati in data 16/10/25, 09/12/25 e 15/01/26, non è stata rilevata presenza di acqua significativa nei pressi della paratia tale da provocare spostamenti eccessivi e i dreni erano asciutti. In questo documento di tesi ci si limita pertanto esclusivamente a segnalare tali spostamenti emersi dal report di tutte le letture intercorse tra il 27/02/25 e il 05/01/26.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha affrontato lo studio di una paratia tirantata di pali di grande diametro realizzata nell'ambito dei lavori di costruzione del nuovo ospedale "Felettino" a La Spezia, con l'obiettivo di analizzarne criticamente la progettazione, verificarne il comportamento attraverso una modellazione geotecnica revisionata e confrontare i risultati teorici con quelli ottenuti dal monitoraggio dell'opera.

Nei primi due capitoli è stato descritto il contesto progettuale all'interno del quale si inserisce la berlinese, evidenziandone il ruolo fondamentale nel garantire la stabilità del fronte di scavo e la sicurezza delle opere strutturali previste nel nuovo complesso ospedaliero. Dopo aver fornito una descrizione generale delle caratteristiche e componenti strutturali dell'opera, sono state approfondite le caratteristiche geologiche, idrauliche e geotecniche del sito attraverso l'analisi delle numerose campagne di indagine eseguite nel corso degli anni, che hanno permesso di definire un modello del sottosuolo sufficientemente dettagliato e rappresentativo delle reali condizioni del terreno. Particolare attenzione è stata inoltre dedicata all'evoluzione progettuale dell'opera, ricostruendo le motivazioni tecniche che hanno portato al passaggio dalla configurazione originaria con due ordini di tiranti alla successiva variante caratterizzata dall'introduzione di un terzo ordine di ancoraggi. L'analisi della documentazione progettuale ha consentito di mettere in evidenza le criticità emerse durante l'esecuzione dei lavori e le valutazioni che hanno portato alla revisione del progetto iniziale. La scelta di introdurre un terzo ordine di tiranti, implementata con un ulteriore sistema di dreni sub orizzontali, ha rappresentato una soluzione progettuale finalizzata ad incrementare la rigidezza complessiva della struttura e garantire un maggiore grado di sicurezza nei confronti delle diverse combinazioni di carico previste dalla normativa.

Il terzo capitolo della tesi è stato dedicato alla revisione critica del progetto. Attraverso la realizzazione di un nuovo modello geotecnico, aggiornato sulla base della documentazione disponibile e delle effettive condizioni riscontrate in sito, è stato possibile rivalutare il comportamento della paratia durante le varie fasi realizzative e nelle diverse condizioni di carico previste dalla normativa vigente. Il modello è stato revisionato sulla base di alcune ipotesi di modifica progettuale finalizzate all'ottimizzazione del sistema di sostegno e ad una più fedele rappresentazione delle reali condizioni del sito in esame, considerando diverse condizioni idrogeologiche e stratigrafiche del sottosuolo. Eseguite tramite il software di calcolo "Paratie Plus 25", le verifiche agli stati limite ultimi, agli stati limite di esercizio e nelle condizioni sismiche hanno evidenziato come la configurazione con tre ordini di tiranti rappresenti una soluzione adeguata dal punto di vista della sicurezza e stabilità dell'opera. I risultati ottenuti hanno infatti confermato il soddisfacimento di tutte le verifiche, con spostamenti orizzontali contenuti entro i limiti progettuali, verifiche strutturali a flessione e taglio pienamente soddisfatte, corretto funzionamento del sistema di ancoraggio e valori del fattore di sicurezza superiori ai minimi richiesti per la stabilità globale dell'insieme terreno-opera. Il nuovo modello risulta così caratterizzato da un alto grado di affidabilità delle valutazioni progettuali, avendo introdotto ipotesi maggiormente cautelative dal punto di vista geotecnico e adottando condizioni idrogeologiche più rappresentative delle effettive condizioni del sito.

Un aspetto particolarmente significativo emerso dal seguente documento, inoltre, riguarda il ruolo chiave del monitoraggio come metodo di controllo dell'opera. L'analisi dei dati provenienti dalla strumentazione installata in sito ha permesso di seguire l'evoluzione del comportamento della berlinese nel tempo mediante misure piezometriche, inclinometriche, celle di carico sui tiranti e rilevamento topografico effettuato sulle mire ottiche. L'integrazione delle diverse tecniche di monitoraggio ha permesso di ottenere un quadro completo dello stato deformativo della struttura e del sito esaminato.

I risultati ottenuti mostrano nel complesso un comportamento della paratia coerente con le ipotesi progettuali. Le misure piezometriche non hanno riportato incrementi significativi della pressione interstiziale tali da compromettere la stabilità dell'opera, mentre le letture inclinometriche hanno confermato l'assenza di movimenti profondi incompatibili con quelli previsti in fase progettuale. Anche le celle di carico hanno mostrato valori di perdita di tensione generalmente in linea con quelli attesi, confermando il corretto funzionamento del sistema di ancoraggio.

Particolare interesse hanno assunto le misure relative al rilevamento topografico delle mire ottiche, analizzate su un periodo di circa un anno, compreso tra il 27/02/25 e il 06/01/26. Il monitoraggio è stato eseguito mediante rilievi periodici con teodolite elettronico dotato di distanziometro per la misura di angoli e distanze, basato sull'osservazione di trenta mire ottiche installate sulla trave di coronamento e sulle due travi di ripartizione dei tiranti. La disponibilità di misure ripetute nelle diverse giornate di rilievo ha reso possibile non solo la valutazione dell'entità degli spostamenti, ma anche l'interpretazione della loro evoluzione temporale. Le letture effettuate sono state interpretate sulla base del valore dello scostamento di ogni mira rispetto al centro dell'arco della berlinese, ritenuto il parametro maggiormente significativo del comportamento deformativo della struttura. Nel complesso hanno evidenziato alcuni spostamenti superiori ai valori attesi in corrispondenza di specifiche mire, in particolare nel settore occidentale della paratia. L'analisi dell'evoluzione temporale delle misure ha tuttavia permesso di osservare come tali spostamenti non presentino un incremento progressivo nel tempo, ma piuttosto siano indicativi di un comportamento oscillatorio riconducibile ai normali fenomeni di assestamento dell'opera. L'assenza di una tendenza evolutiva verso condizioni di instabilità, unita alla mancanza di evidenze in sito riconducibili a significative spinte idrauliche e alla sostanziale efficacia del sistema drenante, porta quindi a ritenere che il comportamento della berlinese sia compatibile con quello atteso per opere di analoga tipologia. Rimane comunque opportuno proseguire il monitoraggio nel tempo, attenzionando in particolar modo le zone che hanno registrato gli spostamenti maggiori, al fine di verificare il mantenimento delle attuali condizioni di equilibrio.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2024). *Relazione di calcolo opere strutturali – Ospedale*. Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato OS_1S_AL_RC_002, rev. 02, 16 giugno 2024.
- [2] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2024). *Relazione di calcolo opere strutturali – Polo Tecnico*. Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato CT_1S_AL_RC_004, rev. 01, 16 giugno 2024.
- [3] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2024). *Relazione generale opere strutturali*. Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato XX_1S_AL_RT_001, rev. 02, 29 novembre 2024.
- [4] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2025). *Relazione di calcolo opere strutturali – Tiranti aggiuntivi berlinese esistente*. Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato AE_1S_AL_RT_011, 14 marzo 2025.
- [5] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2024). *Indagini geofisiche e sondaggi*. Elaborati Generali – Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato XX_0G_AL_PI_021, 17 febbraio 2024.
- [6] Federici, V. (2016). *Relazione geologica*. Progetto Esecutivo – Studi e Indagini – Geologia e Geotecnica – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato I0001.ESE.2.STI.0.00.GEO.RT.II.01, rev. 1.00, 25 gennaio 2016.
- [7] Coletta, L. (2016). *Relazione geotecnica*. Progetto Esecutivo – Studi e Indagini – Geologia e Geotecnica – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato I0001.ESE.2.STI.0.00.GEO.RT.II.02, rev. 1.00, 25 gennaio 2016.
- [8] Pontoni, F. (2017). *Aggiornamento dati geologici zona paratia locali tecnici – Relazione geologica*. Geoequipe Studio Tecnico Associato Geologia-Ingegneria, per Iconia S.r.l./Pessina Costruzioni S.p.A. Elaborato RT.1 (ID elaborato 17_066_T_B_RT.1), aggiornamento del 29 settembre 2017.
- [9] RTP Mythos Consorzio Stabile S.c.a.r.l., Sintecna S.r.l., Anthemis Environment (2024). *Relazione geologica*. Elaborati Generali – Progetto Esecutivo – Nuovo Ospedale della Spezia. Elaborato XX_0G_AL_RT_014, rev. 02, 16 giugno 2024.
- [10] Campilongo, G. (2023). *Il piezometro*. GeoStru Blog. Pubblicato il 21 gennaio 2023.
- [11] Nirta, A. (2019). *Le prove di permeabilità*. IntraGeo. Pubblicato il 22 dicembre 2019.
- [12] Ribacchi, R. (2018). *Meccanica delle rocce. Teoria e applicazioni nell'ingegneria*. Roma: Edizioni Efestò – Hevelius Edizioni.
- [13] Cosciotti, L. (2016). *Relazione geotecnica e di calcolo paratia*. Progetto Esecutivo – Progetto Strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Elaborati Generali. Elaborato I0001.ESE.1.STR.0.00.GEN.RT.II.02, rev. 1.00, 25 gennaio 2016.
- [14] D'Anza, D. (2019). *Relazione tecnica integrativa per i tiranti a 8 trefoli n. 39, 43, 52, 78, 82 e 91*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Integrazione al progetto strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Scavi ed opere di sostegno – Opera 1. Elaborato I0001.VNV.3.STR.B.01.INT.RT.00.01, rev. 0.00, 8 gennaio 2019.

- [15] D'Anza, D. (2017). *Relazione geotecnica e di calcolo Opera 1*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Parte Generale – Elaborati Generali. Elaborato I0001.VNV.3.STR.0.00.SOS.RT.II.03, rev. 0.00, 17 novembre 2017.
- [16] Fusato, C. (2018). *Planimetria scavi e ubicazione opere di sostegno*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Progetto Strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Scavi ed opere di sostegno. Elaborato I0001.VNV.3.STR.B.01.SOS.PL.II.01, rev. 0.00, 5 gennaio 2018.
- [17] Fusato, C. (2018). *Opera 1 – Profilo e sezioni (fase con due ordini di tiranti)*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Progetto Strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Scavi ed opere di sostegno. Elaborato I0001.VNV.3.STR.B.01.SOS.PL.II.02, rev. 0.00, 5 gennaio 2018.
- [18] Fusato, C. (2018). *Opera 1 – Armatura travi di ripartizione 3° ordine di tiranti*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Progetto Strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Scavi ed opere di sostegno. Elaborato I0001.VNV.3.STR.B.01.SOS.DT.II.03, rev. 0.00, 5 gennaio 2018.
- [19] Pontoni, F. (2017). *Opera 1 – Paratia. Stralcio planimetria indagini, sezioni geologiche 2-4-6 e profilo geologico A-A'*. Progetto di Variazione Tecnica VNV.003 – Progetto Strutturale – B-01 Lotto B – Stralcio 1 – Scavi ed opere di sostegno. Elaborato I0001.VNV.3.GEO.B.01.SOS.PL.00.01, rev. 0.01, 22 dicembre 2017.
- [20] Iconia Ingegneria Civile S.r.l. (2017). *Piano di monitoraggio Opera 1*. Nuovo Ospedale della Spezia – Progetto Costruttivo – Strutture – B-01 Lotto B – Stralcio 01. Documento *Monitoraggio opera1_01.doc*, emissione dicembre 2017.
- [21] Angiolini, M. (2025). *Monitoraggio inclinometrico e piezometrico all'interno del cantiere del Nuovo Ospedale della Spezia in località Felettino. Report letture al 31/07/2025 – Relazione tecnica*. Per Guerrato S.p.A., 1 agosto 2025.
- [22] Angiolini, M. (2025). *Monitoraggio inclinometrico e piezometrico all'interno del cantiere del Nuovo Ospedale della Spezia in località Felettino. Allegati – Report letture inclinometriche*. Per Guerrato S.p.A., 1 agosto 2025.
- [23] TTM Tension Technology S.r.l. (2015). *Celle di carico DE-S – Monitoraggio con celle di carico*. Scheda tecnica, rev. A.
- [24] Arte La Spezia. (2019). *Opera n. 1 – Paratia. Relazione strutture ultimate al 02/12/2019 – Fascicolo documentazione allegata – Letture celle di carico*. Convenzione tra IRE Liguria S.p.A. e Arte La Spezia per la Direzione Lavori del Nuovo Ospedale Felettino.
- [25] Studio Azimuth Bertucci e Pedemonte geometri associati (2025). *Piano di monitoraggio*. Progetto Costruttivo – Elaborati Generali – Nuovo Ospedale della Spezia. Per Guerrato S.p.A, data di consegna: 13 marzo 2025.
- [26] GeoMax. (2018). *Zoom70 – Stazione totale robotica*. Manuale/Brochure tecnica.
- [27] Tomassini, L. (2026). *Report monitoraggio topografico berlinese – Misure giornaliere dal 27/02/2025 al 05/01/2026*. Progetto Costruttivo – Elaborati Generali – Nuovo Ospedale della Spezia. Data di consegna: 14 gennaio 2026.
- [28] Tomassini, L. (2026). *Report monitoraggio topografico berlinese – Misure singole mire dal 27/02/2025 al 05/01/2026*. Progetto Costruttivo – Elaborati Generali – Nuovo Ospedale della Spezia. Data di consegna: 14 gennaio 2026.

