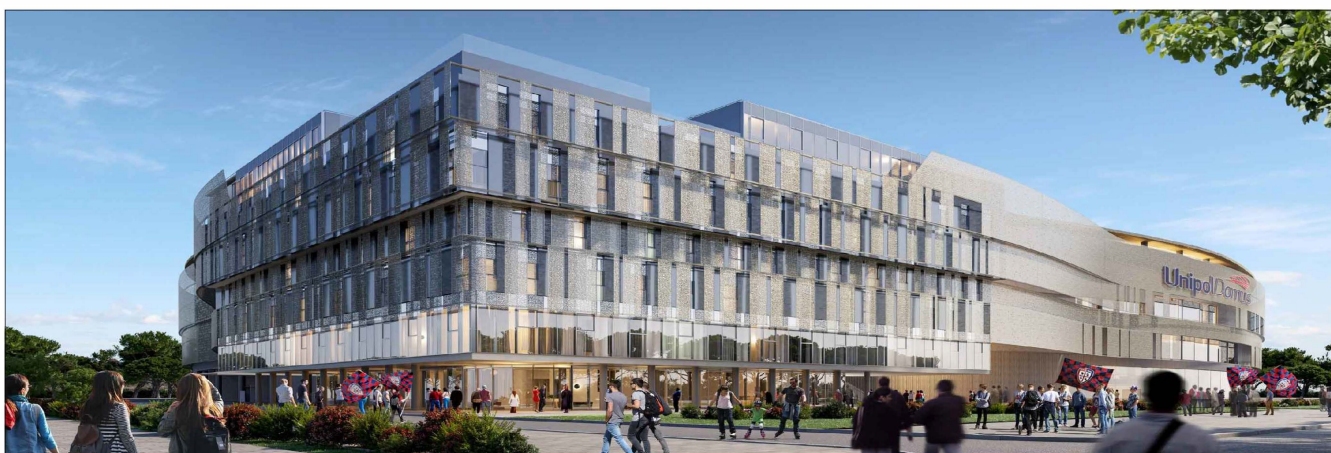


# COMUNE DI CAGLIARI

## PROGETTO:

Proposta avente ad oggetto la progettazione, costruzione e gestione, in regime di concessione ed in condizioni di equilibrio economico-finanziario del nuovo stadio da realizzare nel quartiere Nuovo Borgo Sant'Elia a Cagliari, ai sensi dell'articolo 1, comma 304, lettera b) della Legge n. 147 del 27 dicembre 2013



## PROPONENTE:

Comune di Cagliari

Responsabile Unità Progetto Nuovo Stadio Sant'Elia  
Responsabile Unico di Procedimento

Ing. Daniele Olla

## TEAM DI PROGETTAZIONE:

progettazione architettonica



PROGETTO CMR  
MASSIMO ROJ ARCHITECTS

progettazione strutture

iDEAS  
Integrated Design & Engineering  
Architecture & Sustainability

progettazione impianti tecnologici

TRACTEBEL  
ENGIE

progettazione sicurezza antincendio

ENGINEERING L  
GOSTI  
ARCHITECTURE

integrazione prestazioni specialistiche

sportium  
shape your sport venue ideal

specialista impianti sportivi

MANICA  
architecture

opere di demolizione



urbanistica e procedura V.I.A.

DICAAR S.r.l.  
Dipartimento di Ingegneria Civile,  
Architettura e Architettura  
Università degli studi di Cagliari  
SARDARCI

consulenza acustica



consulenza paesaggistica

dsb landscape design

consulenza viabilistica



consulenza ambientale

ambiente  
consulenza & ingegneria  
ambientale per l'ambiente

FASE PROGETTUALE: **PROGETTO DEFINITIVO**

consulenza geologica



TITOLO / DESCRIPTION:

**Relazione geologica**

DISEGNATO DA : --

CONTROLLATO DA : --

DATA 20/06/2022

SCALA --

COMMESSA

FASE

EMISSIONE

LIVELLO

DISCIPLINA

TIPO

PROGRESSIVO

REVISIONE

3053

D

CMR

X

ARQ

RE

024

02

## SOMMARIO

<b>1. ASPETTI INTRODUTTIVI .....</b>	<b>1</b>
1.1. Premessa.....	1
1.2. Richiami normativi .....	2
1.3. Inquadramento topografico e territoriale .....	3
<b>2. QUADRO CONOSCITIVO .....</b>	<b>9</b>
2.1. Indagini geologiche pregresse .....	9
2.1.1. [A] Sistemazione dell'officina navale della Guardia di Finanza di Su Siccu .....	11
2.1.2. [B] Sistemazione degli argini del canale Terramaini, zona ponte La Palma – Su Siccu....	11
2.1.3. [C] Intervento di edilizia sperimentale sul complesso Del Favero - Comparti 4 e 5 .....	11
2.1.4. [D] Sistemazione della fascia lungomare con integrazione delle infrastrutture connesse - Strada di servizio al nuovo lungomare e ai fabbricati annessi .....	12
2.1.5. [E] Realizzazione di un campo di calcio ed infrastrutture connesse.....	12
2.1.6. [I] Intervento di riqualificazione del Capannone Nervi - Corpi B e C.....	12
2.2. Dati geologici e geotecnici di nuova acquisizione .....	13
<b>3. MODELLO GEOLOGICO .....</b>	<b>16</b>
3.1. Inquadramento geologico dell'area vasta .....	16
3.2. Assetto strutturale e tettonico .....	21
3.3. Sismicità storica dell'area .....	22
3.4. Classificazione sismica .....	23
3.5. Assetto geomorfologico ed idrografico .....	24
3.6. Stratigrafia dei terreni costituenti il sottosuolo locale .....	30
3.7. Assetto idrogeologico .....	40
<b>4. PERICOLOSITÀ GEOLOGICA.....</b>	<b>42</b>
4.1. Pericolosità sismica.....	42
4.2. Pericolosità da inondazione.....	42
4.3. Pericolosità da frana .....	42
4.4. Pericolosità idrogeologica.....	42
<b>5. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO.....</b>	<b>43</b>
5.1. Successione litostratigrafica locale .....	43
5.2. Prove penetrometriche SPT in foro di sondaggio .....	46
5.3. Prove penetrometriche statiche continue con piezocono CPTU.....	48
5.3.1. Resistenza alla punta, resistenza laterale e pressioni neutre .....	48
5.3.2. Prove di dissipazione .....	50
5.4. Prove geotecniche di laboratorio .....	51
5.4.1. Caratteristiche fisiche generali .....	51
5.4.2. Caratteristiche di consistenza .....	52
5.4.3. Analisi granulometrica.....	54
5.4.4. Caratteristiche di resistenza al taglio .....	55
5.4.5. Prova di compressibilità edometrica.....	55
5.4.6. Prova di compressione monoassiale su provini di roccia.....	56

<b>6. AGGRESSIVITÀ AL CALCESTRUZZO .....</b>	<b>57</b>
<b>7. CONCLUSIONI .....</b>	<b>58</b>

## **APPENDICI**

- RAPPORTI DI LABORATORIO CHIMICO (ACQUE)

## **TAVOLE FUORI FASCICOLO**

- I.** UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE SU PLANIMETRIA DI PROGETTO
- II.** CARTA GEOLOGICA
- III.** SEZIONI GEOLOGICHE
- IV.** SEZIONI DI TOMOGRAFIA ELETTRICA
- V.** SEZIONI DI TOMOGRAFIA SISMICA

## 1. ASPETTI INTRODUTTIVI

### 1.1. Premessa

Nell'ambito delle attività per la progettazione definitiva del «**Nuovo Stadio Sant'Elia di Cagliari**», è stata affidata alla Società **GEOTECHNA S.r.l. di Cagliari**<sup>(1)</sup> l'incarico per l'esecuzione di una campagna di indagini geologiche, geotecniche e geofisiche secondo il programma e le relative specifiche tecniche<sup>(2)</sup> predisposte dal gruppo di progettazione **IDEAS S.r.l.**

Sulla scorta del suddetto programma e per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, lo scrivente geologo **Dott. MAURO POMPEI**<sup>(3)</sup> in qualità di Direttore Tecnico della **GEOTECHNA S.R.L.** – dopo aver concordato con la medesima **IDEAS S.r.l.** di implementare le prospezioni geofisiche stante la prevedibile quanto variegata configurazione geologica del sedime riscontrata direttamente dal medesimo nel corso di numerose campagne di indagini condotte nell'intorno per altre iniziative edilizie compresa la l'adiacente "Arena Stadium" – ha curato la stesura degli elaborati specialistici al termine delle attività di acquisizione in campo e di laboratorio secondo le prescrizioni delle succitate specifiche<sup>(4)</sup>.

Nel presente elaborato, sulla base dei risultati scaturiti dalla campagna investigativa svolta in questa sede e di quelli di pregressa acquisizione sopra richiamati, sono illustrati i risultati dello studio geologico, svolto nel rispetto della normativa tecnica vigente e secondo le seguenti finalità:

- ⇒ caratterizzazione geologica dell'area vasta con riferimenti ad un idoneo contorno del sito di intervento;
- ⇒ ricostruzione dei caratteri litostratigrafici, idrogeologici, geomorfologici nonché degli aspetti legati alla pericolosità geologico-idraulica territoriale (cfr. N.T.C. §6.2.1);
- ⇒ ricostruzione del modello geologico del sito di intervento, coerentemente con le informazioni litostratigrafiche, idrogeologiche e litotecniche relative al contorno;
- ⇒ definizione del modello geotecnico del previsto volume significativo di terreno interessato dalle opere in progetto.

Si rimanda ai report specifici a corredo, la descrizione dei principi teorici ed i criteri tecnici e metodologici delle indagini geognostiche e delle prove geotecniche in situ, delle prove geotecniche di laboratorio e delle prospezioni sismiche con individuazione per questi ultimi aspetti, delle criticità inerenti la vulnerabilità sismica e la risposta sismica locale di base.

---

<sup>(1)</sup> Società operante nel campo della GEOLOGIA APPLICATA e nella GEOTECNICA.

<sup>(2)</sup> «**Programma delle indagini per la determinazione del modello geotecnico di sottosuolo da utilizzare nel progetto strutturale di un disciplinare e al collaudo tecnico**», revisione del 16.06.2020.

<sup>(3)</sup> Ordine dei Geologi della Regione Sardegna N. 211 – Sezione A.

<sup>(4)</sup> Lavoro citato, Cap. 7 «**Prescrizioni per la redazione del rapporto finale sulle indagini da parte dell'impresa esecutrice – Rappresentazione dei risultati**».



## 1.2. Richiami normativi

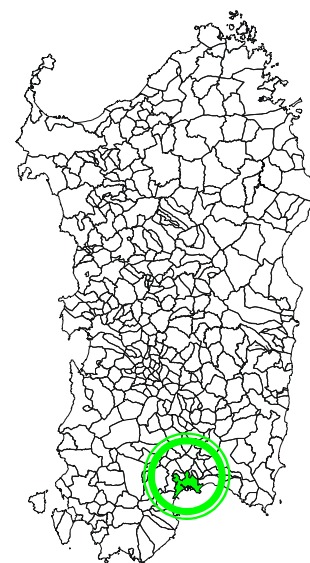
- **Circolare C.S. LL.PP. n. 7 del 21.01.2019** «Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni» di cui al D.M. 17.01.2018»;
- **D.M. 17.01.2018** «Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni»;
- **Circolare C.S. LL.PP. n. 617 del 02.02.2009** «Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008»;
- **D.M. 14.01.2008** «Norme Tecniche per le Costruzioni»;
- **Ordinanza P.C.M. n. 3519 del 28.04.2006** «Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone»;
- **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316 del 02.10.2003** «Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri»;
- **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20.03.2003** «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica»;
- **Circ. Min. LL.PP. n. 30483 del 24.09.1988** che prevede l'obbligo di sottoporre tutte le opere civili pubbliche e private da realizzare nel territorio della Repubblica, alle verifiche per garantire la sicurezza e la funzionalità del complesso opere-terreni ed assicurare la stabilità complessiva del territorio nel quale si inseriscono;
- **D.M. LL.PP. n. 11.03.1988** «Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione»;
- **Legge n. 464 del 04.08.1984** «Norme per agevolare l'acquisizione da parte del servizio geologico della direzione generale delle miniere del Ministero dell'Industria, del commercio e dell'artigianato di elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale»;
- **Legge n. 64 del 02.02.1974** «Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche» che prevede l'obbligatorietà dell'applicazione per tutte le opere, pubbliche e private, delle norme tecniche che saranno fissate con successivi decreti del Ministero per il Lavori Pubblici»;
- **Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.)** adottato dalla Giunta Regionale con D.G.R. n. 54/33 del 30.12.2004 e reso esecutivo con Decreto Assessoriale n. 3 del 21.02.2005 con pubblicazione nel BURAS n. 8 dell'11.03.2005, e relative **Norme di Attuazione** (aggiornamento del giugno 2020 - Allegato B alla Delib. G.R. n. 43/2 del 27.8.2020 – Testo Coordinato);
- **Decreto del Presidente della R.A.S. n. 35 del 21.03.2008** «Norme di Attuazione del P.A.I.».
- **Piano Stralcio delle Fasce Fluviali della Sardegna (PSFF)** adottato in via definitiva con Delibera n.1 del 20.06.2013.

### 1.3. Inquadramento topografico e territoriale

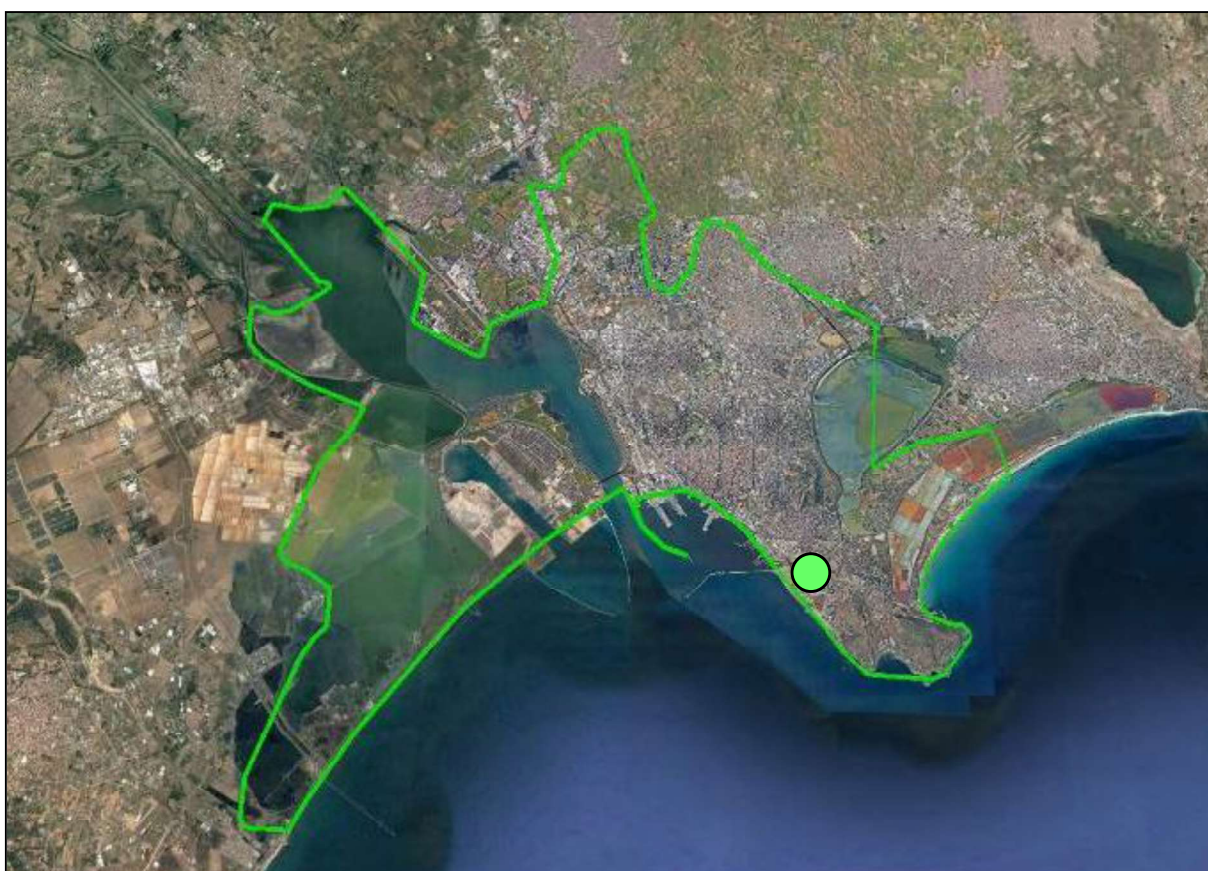
L'areale previsto per ospitare il nuovo stadio, in parziale sovrapposizione con quello preesistente, ricade nelle pertinenze del comunale di Cagliari (Sardegna meridionale) ed esattamente nel settore sud-orientale della città in prossimità dell'attuale linea di costa rettificata artificialmente già nella prima metà del 1900 a seguito della graduale colmata di un tratto di mare basso compreso tra il promontorio di *Sant'Elia* e il *porto di Cagliari* ai fini della sua bonifica ().

I riferimenti cartografici del sito sono rappresentati da:

- Foglio 557 "CAGLIARI" dell'I.G.M.I. [scala 1:50.000]
- Sezione 557- III "CAGLIARI" dell'I.G.M.I. [scala 1:25.000]
- Sezione 557-140 "CAGLIARI" della C.T.R. [scala 1:10.000]



**FIGURA 1.1**  
Comune di Cagliari  
Inquadramento geografico.



**FIGURA 1.2** – Ubicazione del sito su immagine satellitare estratta da Google Earth).





**FIGURA 1.3** – Sito di intervento rispetto su Cartografia Tecnica Regionale (Foglio 566, Sezioni 020 e 030; Foglio 557, Sezioni 140 e 150) appoggiato su DTM passo 10 m della R.A.S. con rappresentazione del settore costiero più meridionale dell'abitato di Cagliari compreso tra Sant'Elia, Le Saline di Stato, i colli di Monte Urpinu e di Bonaria e la costa occidentale (fuori scala).





**FIGURA 1.4** – Area di ubicazione dello stadio Sant'Elia (estratta da Google Earth, 2021).





FIGURA 1.5 – Stralcio cartografia I.G.M.I. in scala 1:25.000 con indicazione dell'area di intervento.



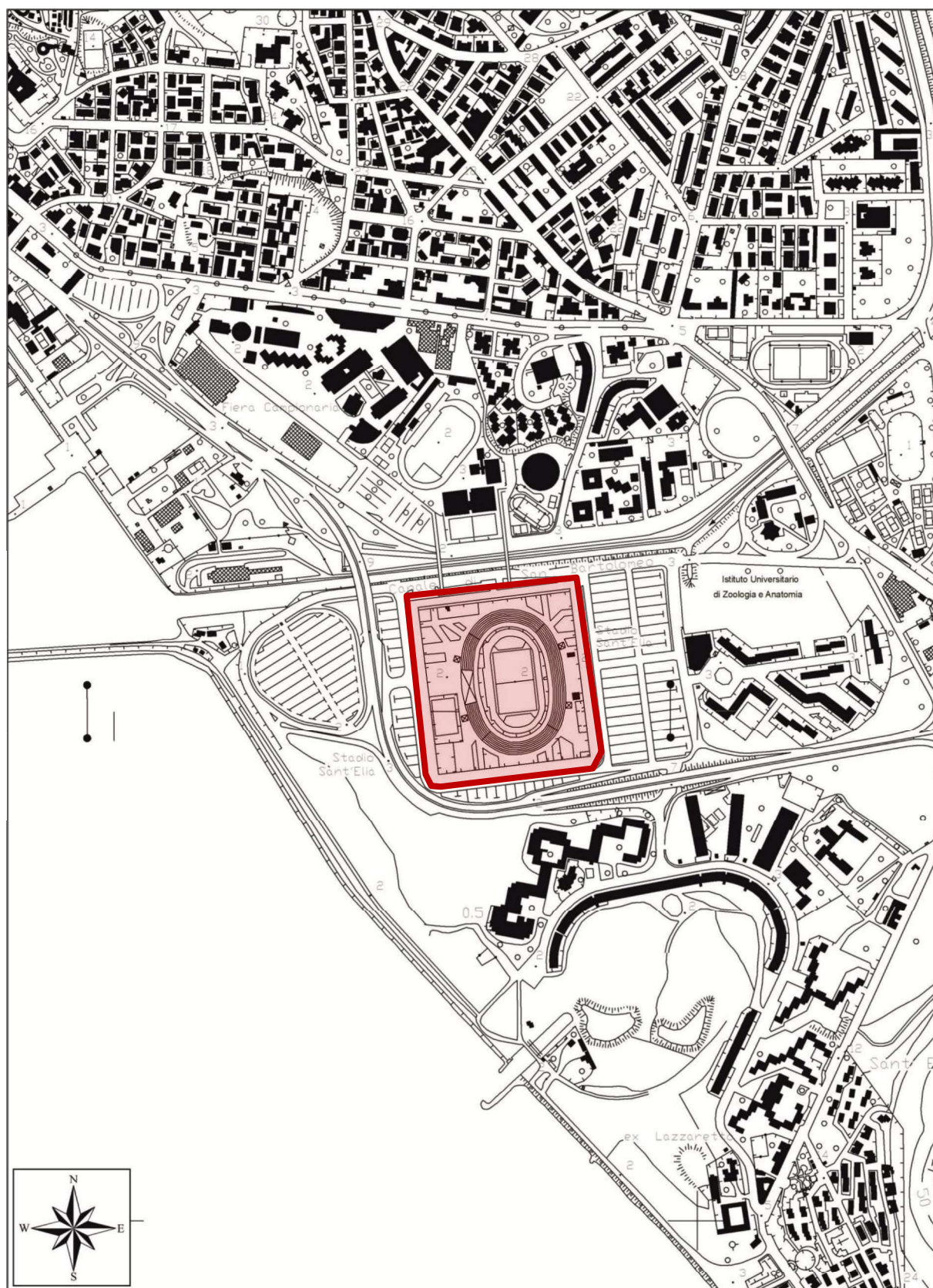


FIGURA 1.6 – Stralcio cartografia C.T.R. in scala 1:10.000 con indicazione dell'area di intervento.





FIGURA 1.7 – Inquadramento ortofotogrammetrico in scala 1:10.000 con indicazione dell'area di intervento.

## 2. QUADRO CONOSCITIVO

### 2.1. Indagini geologiche pregresse

Si restituisce di seguito la sintesi delle conoscenze a carattere litostratigrafico, idrogeologico e geotecnico dell'area al contorno del sito in argomento, entro un raggio massimo di circa 800 m: tali informazioni sono state acquisite dallo scrivente tra gli anni 1996÷2015 nel corso di numerose campagne geognostiche mediante sondaggi, prospezioni geofisiche, prove geotecniche sia in situ sia di laboratorio eseguite nel corso della propria attività professionale a supporto di altri interventi ingegneristici<sup>(5)</sup>. La loro analisi critica ha fornito una indispensabile chiave interpretativa delle risultanze della campagna indagini dell'ottobre 2020 specificatamente eseguita nel sedime di intervento a supporto della progettazione definitiva delle opere.

Ulteriori riferimenti editi relativi all'assetto litostratigrafico, tettonico strutturale e geotecnico sono rappresentati da:

- Carta Geologica d'Italia Foglio 557 "Cagliari" in scala 1:50.000 dell'ISPRA
- Carta Geologico-Tecnica di Cagliari in scala 1:10.000, a cura di G.BARROCCU e T. CRESPELLANI

In **FIGURA 2.1** è riportata la localizzazione delle aree indagate nel corso delle campagne di indagine suddette e ritenute utili per l'analisi litostratigrafica del locale sottosuolo nonché per la definizione degli aspetti legati sia alla potenziale variabilità delle facies sedimentarie entro i primi 40 m dal p.c. sia alla circolazione idrica sotterranea.

Si riportano di seguito le sintesi delle principali informazioni acquisite e utilizzate a supporto del modello geologico e geotecnico del sito di intervento.

- 
- (5) A] «Sistemazione dell'Officina Navale della Guardia di Finanza di Su Siccu», Relazione Geologico-Geotecnica per progetto definitivo 1997;
- B] «Lavori di sistemazione degli argini del Canale di Terramaini, zona Ponte La Palma – Su Siccu», Relazione Geologica e Geotecnica per progetto definitivo ed esecutivo 2001;
- C] «Intervento di edilizia sperimentale sul Complesso edilizio Del Favero presso il quartiere Sant'Elia - Comparti 4 e 5», Relazione Geologica e Relazione Geotecnica per progetto esecutivo opere edili 2003;
- D] «Sistemazione della fascia lungomare con integrazione delle infrastrutture connesse - Strada di servizio al nuovo lungomare e ai fabbricati annessi. Oasi del Mediterraneo, Sistema I - Sant'Elia: Ex Capannone "Nervi" - Lazzaretto», Relazione Geologica e Geotecnica, Relazione idrogeologica e Programma delle Indagini per progetto definitivo 2004 e Relazione Geologica e Relazione Geotecnica per progetto esecutivo 2005;
- E] «Lavori di realizzazione di un campo di calcio ed infrastrutture connesse nel quartiere di Sant'Elia», Relazione Geotecnica per progetto esecutivo 2004;
- F] «Lavori di sistemazione della fascia lungomare dal parcheggio dello Stadio Sant'Elia al Lazzaretto con integrazione delle infrastrutture connesse - Primo stralcio funzionale», Relazione Geognostica sulle prove penetrometriche DPSH per progetto esecutivo 2008;
- G] «Realizzazione di una intersezione a rotatoria in Piazza Amsicora e Via San Bartolomeo», Relazione Geologica e Relazione Geotecnica per progetto definitivo-esecutivo 2012;
- H] «Stazione dei Carabinieri di San Bartolomeo - Caserma generale Antonio Cascino. Lavori di risanamento conservativo e adeguamento a norma di alcuni fabbricati», Relazione Geologica e Geotecnica per progetto esecutivo 2015;
- I] «Intervento di riqualificazione del Capannone Nervi in località Su Siccu - Corpi B e C», Relazione Geologica e Geotecnica per progetto esecutivo 2015;





FIGURA 2.1 – Ubicazione delle indagini geognostiche eseguite al contorno dell'area di intervento

### 2.1.1. [A] Sistemazione dell'officina navale della Guardia di Finanza di Su Siccu

#### Ubicazione NW rispetto allo stadio Sant'Elia.

Sono stati realizzati n. 2 sondaggi a carotaggio continuo mediante i quali sono stati indagati i primi 16,50 m dal p.c., eseguite prove SPT In corso di avanzamento e prelevati campioni indisturbati di terreno.

La ricostruzione stratigrafica ha evidenziato – sotto i primi 2,00 m di terre di riporto prevalentemente sabbioso-limose – circa 7,00 m di limi sabbioso-argillosi più o meno ricchi in resti di apparati fogliari di *Posidonia oceanica* decomposti ("paglia marina"), di colore bruno-nerastro, fetidi, molli e saturi ascrivibili al Versiliano, a loro volta poggianti su depositi marino-litorali sabbioso-arenacei, talora conglomeratici, a forte componente carbonatica, fossiliferi, con buone proprietà meccaniche e sede di falda freatica.

### 2.1.2. [B] Sistemazione degli argini del canale Terramaini, zona ponte La Palma – Su Siccu

#### Ubicazione NW, N e NE rispetto allo stadio Sant'Elia.

L'indagine superficiale, effettuata mediante escavatore tra gli impianti sportivi dell'Esperia ed il porticciolo de Su Siccu, ha fatto emergere la presenza diffusa di terreno di riporto eterogeneo di spessore metrico ricoprente un deposito di origine lagunare-palustre, costituito da terreni limo-argillosi localmente più sabbiosi, spesso con presenza di resti fogliari di *Posidonia oceanica* in decomposizione ("paglia marina"), fetidi, saturi, praticamente inconsistenti.

I sondaggi, spinti sino a profondità comprese tra 5,00 e 10,00 m, perlomeno nel tratto più prossimo all'area di interesse hanno consentito di intercettare il basamento roccioso appartenente alla *F.ne dei Calcarei di Cagliari in facies "Pietra Forte"* e *"Tramezzario"* in posizione piuttosto superficiale (tra 1,80 m e 5,20 m dal p.c.) che poi si approfondisce repentinamente in prossimità della linea di costa superando la profondità dei 10 m.

Nel tratto più interno del canale di San Bartolomeo (ad esempio la zona Ponte Vittorio), il basamento è invece costituito da sabbie fini e medie di colore verdastro, riferibili alla *F.ne delle Arenarie di Pirri*, situazione che prevede la presenza di dislocazioni tettoniche importanti.

### 2.1.3. [C] Intervento di edilizia sperimentale sul complesso Del Favero - Comparti 4 e 5

#### Ubicazione SE rispetto allo stadio Sant'Elia.

I tre sondaggi a carotaggio continuo, integrati da prove penetrometriche SPT e prove di taglio diretto in laboratorio, hanno consentito di accertare una situazione geologico-stratigrafica sostanzialmente omogenea e conforme a quanto acquisito in altre zone al contorno dello stadio contraddistinta da una coltre plurimetrica di terreno di riporto (mediamente 1,50 m) ricoprente circa 8 m di depositi olocenici marino litorali limo-sabbiosi e limo-argillosi di colore bruno-nerastro, a ricco contenuto vegetale di ambiente marino ("paglia marina") fetidi, saturi privi di consistenza poggianti su qualche metro di depositi sabbioso-arenacei sempre litorali, fossiliferi, talora molto carbonatici e sede di falda freatica in leggera pressione.

La suddetta sequenza poggia su depositi prevalentemente limo-argillosi intercalati da lenti sabbiose e sabbioso argillose, debolmente ossidati, molto compatti, sovraconsolidati, conglomeratici alla base, di probabile ambiente fluvio-deltizio che testimoniano prolungati periodi di continentalità a cui si intercalano episodi di sommersione da parte di acque sia dolci sia salmastre, riferibili verosimilmente al Pleistocene.

#### **2.1.4. [D] Sistemazione della fascia lungomare con integrazione delle infrastrutture connesse - Strada di servizio al nuovo lungomare e ai fabbricati annessi**

##### Ubicazione SW e S rispetto allo stadio Sant'Elia.

Lungo un percorso di 2,7 km dall'ex Capannone Nervi sino al Lazzaretto sono stati realizzati n. 9 pozzetti geognostici a mezzo escavatore meccanico ed eseguite alcune prove geotecniche di laboratorio per la caratterizzazione meccanica dei terreni.

In tutti i pozzetti, compresi quelli ricadenti in prossimità dello stadio (PZ1, PZ2 e PZ3), per le profondità direttamente investigate (3,00 m da p.c.) sono stati intercettati esclusivamente depositi di ambiente ora lagunare-palustre ora marino-litorale, costantemente sepolti sotto un'eterogenea coltre di materiali di riporto di spessore anche plurimetrico.

Tali indagini sono state poi integrate da sondaggi a carotaggio continuo, prove SPT, penetrometriche continue DPM030 e geotecniche di laboratorio.

Nel sondaggio S1, spinto sino a -40,00 m dal p.c., dopo circa 14,00 m di sedimenti olocenici rappresentati da limi sabbiosi ed argillosi, argille limose più o meno sabbiose e sabbie di ambiente marino litorale di spiaggia emersa/sommersa e lagunare spesso frammisti a fibre di *Posidonia oceanica*, è stato attraversato un potente deposito alluvio-colluviale di ambiente fluvio-deltizio (probabilmente pleistocenico) costituito da sabbie limo-argillose associate a limi sabbiosi, limi argillosi, argille più o meno limose e sabbiose, paleosuoli, sabbioni quarzoso-feldspatici, talora ossidati, senza raggiungere il substrato roccioso locale che invece affiora diffusamente alla base del vicino colle di Sant'Elia ed intercettato invece lungo il canale di San Bartolomeo.

La presenza di brecce calcaree alla base della sequenza sedimentaria olocenica fa supporre che quest'ultimo possa rinvenirsi a profondità non molto maggiori rispetto a quelle investigate.

#### **2.1.5. [E] Realizzazione di un campo di calcio ed infrastrutture connesse**

##### Ubicazione S rispetto allo stadio Sant'Elia.

L'indagine, articolata in un sondaggio geognostico spinto fino a 15,00 m dal p.c. e n. 6 prove penetrometriche con dispositivo DPM030, ha ulteriormente confermato la sequenza stratigrafica tipica dei luoghi costituita da circa 6÷8 m di depositi soffici, limoso-sabbioso-argillosi con abbondante presenza di vegetazione di ambiente marino (*Posidonia oceanica*) in vario grado di decomposizione dotati di scadenti proprietà geotecniche, seguiti da una successione sabbioso-ciottolosa addensata e semicementata da carbonato di calcio, afferente all'Olocene.

#### **2.1.6. [I] Intervento di riqualificazione del Capannone Nervi - Corpi B e C**

##### Ubicazione NW rispetto allo stadio Sant'Elia.

Sono stati eseguiti n. 5 sondaggi a carotaggio continuo, prove SPT, n. 15 pozzetti esplorativi, n. 2 prospezioni sismiche MASW, n. 6 tomografie elettriche, n. 2 prove penetrometriche continue statiche CPT ed una serie di prove geotecniche di laboratorio.

Oltre l'assetto litostratigrafico e litotecnico fino ad ora descritto, è confermato lo spessore perlomeno decametrico (10÷11 m dal p.c.) della sequenza deposizionale olocenica nella quale prevalgono i depositi limo-argillosi e limo-sabbiosi con abbondanti accumuli di fibre vegetali in decomposizione ("paglia marina") e di scadenti proprietà geotecniche.



I sondaggi ubicati in prossimità dei lati corti del Padiglione Nervi circa lungo l'asse maggiore di quest'ultimo e spinti rispettivamente a -25,00 m e -30,00 m dal p.c. hanno accertato la presenza dei depositi pleistocenici argillo-limosi con intercalazioni sabbiose, molto consistenti e poggianti sul basamento roccioso carbonatico, intercettato solo nel lato rivolto a est, a profondità di 18,00 m.

È acclarata la presenza di terreni di riporto superficiali derivanti dall'estesa bonifica effettuata nei primi decenni del 1900, di spessore mediamente metrico e localmente superiore.

Dall'insieme dei dati provenienti dalle suesposte campagne di indagine pregresse, si conferma pertanto la seguente stratigrafia informale che, sebbene abbia un diretto riferimento alla successione quaternaria e tardo-miocenica riportata nella cartografia geologica ufficiale, per semplicità viene indicata con una successione di strati omogenei individuati da lettere dell'alfabeto, a partire dalla sommità:

<b>A]</b> Superfici artificiali e terre di riporto	[Attuale]
<b>B]</b> Depositi sabbioso-limoso argillosi e ghiaiosi di ambiente marino litorale	[Olocene]
<b>C]</b> Depositi argilloso-limosi e limo-sabbiosi di ambiente fluvio-deltizio	[Pleistocene superiore]
<b>D]</b> Depositi sabbiosi e ghiaiosi di ambiente fluvio-deltizio	[Pleistocene superiore]
<b>E]</b> Basamento lapideo carbonatico	[Miocene superiore]

## 2.2. Dati geologici e geotecnici di nuova acquisizione

Ferme restando le finalità dello studio precedentemente illustrate, l'indagine geognostica e geotecnica predisposta dalla Società di Progettazione IDEAS e svoltasi dal mese di ottobre del 2020, si è articolata nell'esecuzione delle seguenti indagini e prove, la cui ubicazione su immagine satellitare è rappresentata in **FIGURA 2.2** e su planimetria di progetto in **TAVOLA I** fuori fascicolo:

### IN SITU

– sondaggi verticali a carotaggio continuo Ø 101 mm profondità 35 m	n. 1
– sondaggi verticali a carotaggio continuo Ø 101 mm profondità 30 m	n. 2
– sondaggi verticali a carotaggio continuo Ø 101 mm profondità 20 m	n. 1
– installazione di piezometri di Casagrande	n. 1
– installazione di piezometri a tubo aperto	n. 1
– strumentazione di fori di sondaggio per prova down hole	n. 1
– prove penetrometriche SPT in foro di sondaggio	n. 34
– prove penetrometriche statiche continue CPTU	n. 8
– misure speditive con pocket penetrometer	n. 36
– misure speditive con vane test	n. 20
– indisturbati con fustella metallica a pareti sottili tipo Shelby	n. 10
– semidisturbati con carotiere semplice e con carotiere Denison	n. 5
– indisturbati direttamente da cassetta (rocce)	n. 4
– prelievo di campioni di acque sotterranee	n. 1

### PROSPEZIONI GEOFISICHE

– stendimenti geoelettrici con elaborazione tomografica	n. 7
– stendimenti sismici a rifrazione con elaborazione tomografica / MASW	n. 11
– prove sismiche in foro tipo down-hole	n. 1



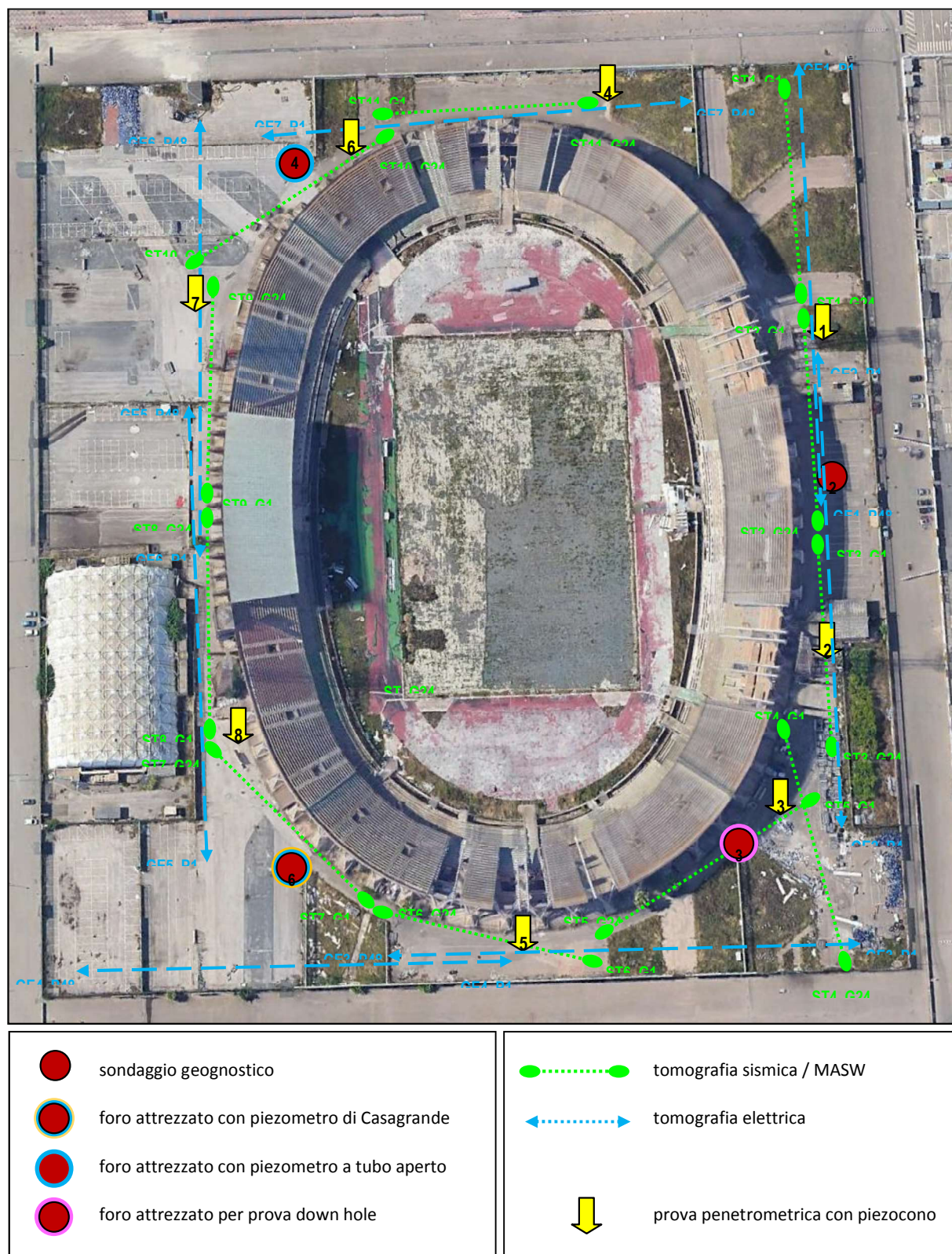


FIGURA 2.2 – Ubicazione delle indagini geologiche, geotecniche e geofisiche su immagine satellitare.

**LABORATORIO GEOTECNICO**

– Analisi granulometrica per vagliatura e sedimentazione	n.	10
– Limiti di Atterberg	n.	10
– Determinazione del peso specifico	n.	10
– Prove di compressione edometrica	n.	5
– Prova di taglio diretto C.D.	n.	5
– Prove di compressione triassiale U.U.	n.	3
– Prove di compressione monoassiale per le rocce	n.	4

**LABORATORIO CHIMICO**

- Analisi acque di falda

Per le caratteristiche tecniche e metodologiche dell'indagine geognostica, geologica e sismica si rimanda agli elaborati specifici.

### 3. MODELLO GEOLOGICO

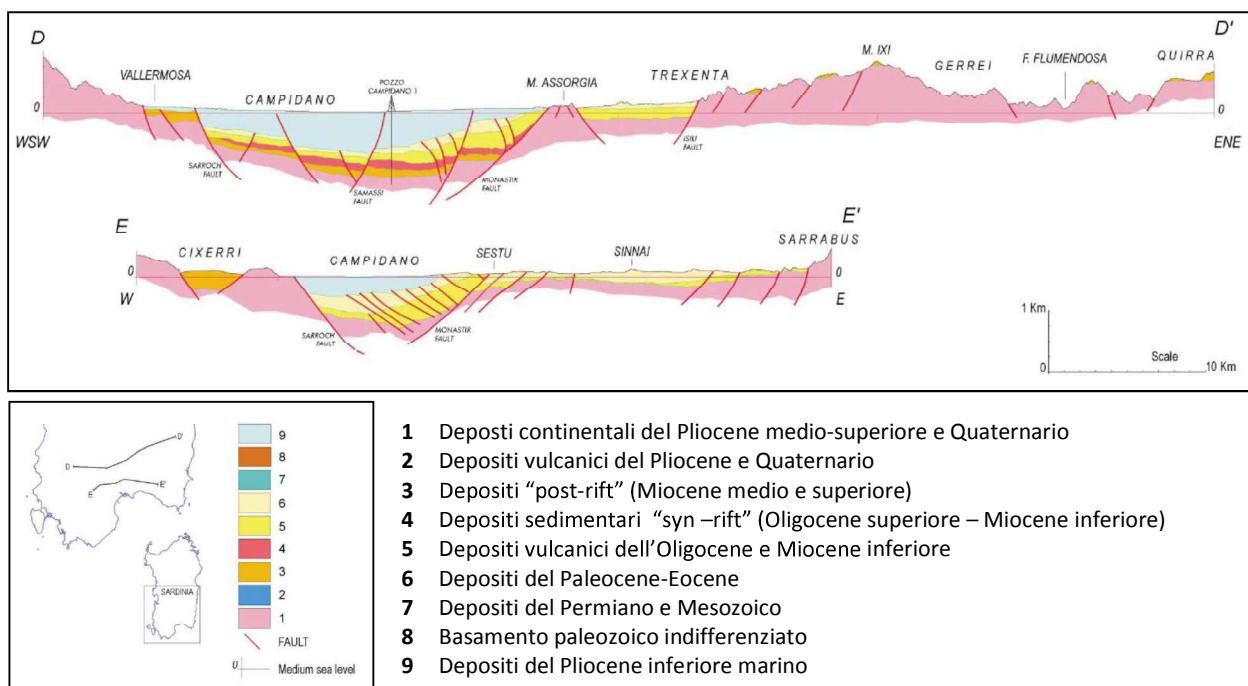
#### 3.1. Inquadramento geologico dell'area vasta

L'area in studio è localizzata nel settore meridionale della pianura del Campidano, settore particolarmente importante nel quadro dell'evoluzione geodinamica recente della Sardegna in quanto costituente la colmata di una fossa tettonica pliocenica ("Graben del Campidano") che si estende per circa 100 km con direzione NW-SE dal Golfo di Oristano al Golfo di Cagliari.

Essa si sovrappone altresì alla più vasta "Fossa sarda" (nella letteratura tecnica indicata anche come "rift oligo-miocenico sardo") che attraversa l'isola in senso longitudinale (~N-S) dal Golfo dell'Asinara a quello di Cagliari, rappresentando la manifestazione più evidente dell'intensità dei movimenti crostali avvenuti nella nostra isola tra i 27 e i 18 milioni di anni fa (Oligocene superiore - Miocene inferiore), tali da trasformare significativamente l'assetto geologico del Mediterraneo occidentale.

Nel periodo suddetto la Sardegna e la Corsica appartenevano al margine continentale sud europeo trovandosi in continuità con l'attuale settore catalano-provenzale: l'insieme di tali eventi infatti, in un contesto geodinamico molto complesso di collisione tra la placca Europea e quella Africana che portò alla formazione di un sistema arco-fossa, comportarono il distacco e successiva la rotazione in senso antiorario del blocco litosferico sardo-corso, evento che poi condusse alla formazione del bacino balearico, del Tirreno settentrionale e della catena appenninica.

Nel corso della contestuale evoluzione tettonico-sedimentaria, nella fascia corrispondente alla "Fossa Sarda" (la cui genesi è da ricondurre all'innesco di movimenti trascorrenti a carattere sia transtensivo sia transpressivo in un contesto geodinamico di arco-fossa) prima si instaura un intenso e articolato vulcanismo a chimismo calco-alcalino e successivamente (o talora contestualmente) una sedimentazione marina che ha determinato l'isolamento di tutto il settore orientale della Sardegna rispetto a quello sulcitano e dell'Arburese.



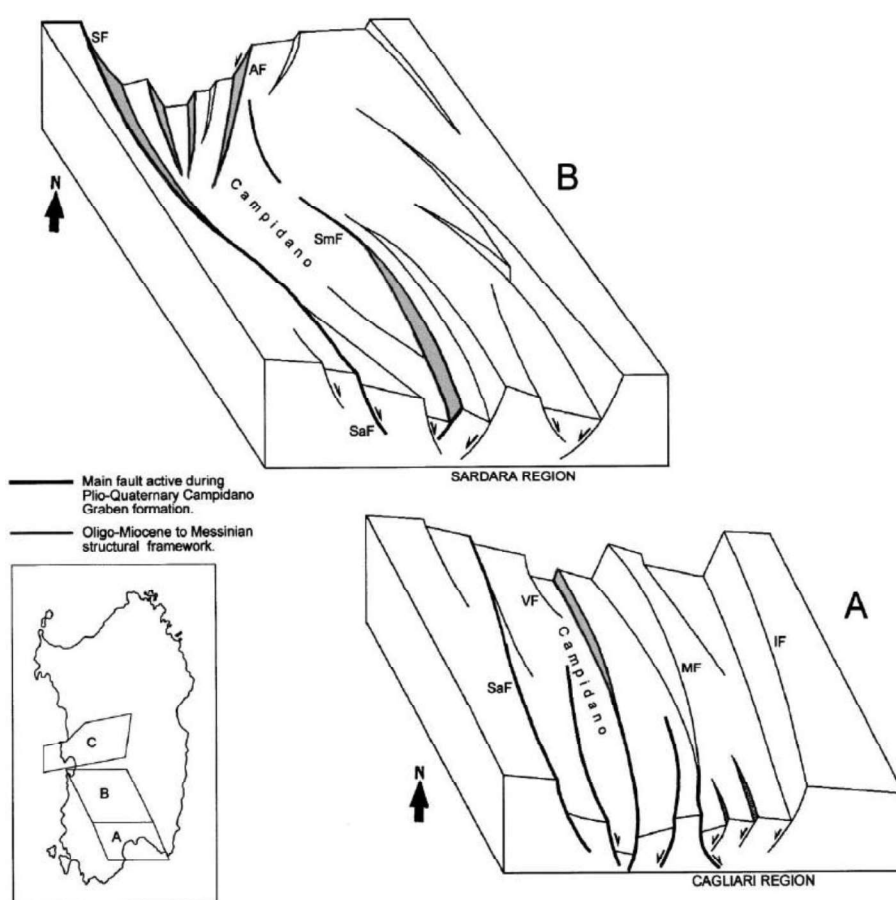
**FIGURA 3.1** – Sezioni geologiche che schematizzano la struttura del "Rift oligo-miocenico" nella Sardegna meridionale e la sovrapposizione della Fossa Campidanese (estratte da «*The Cenozoic graben system of Sardinia: geodynamic evolution from new seismic and field data*», a cura di G. Casula, A. Cherchi, L. Montadert, M. Murru, E. Sarria, 2001).



L'insieme di eventi succitati dà luogo ad una potente successione di depositi che attualmente è osservabile dalla costa del golfo dell'Asinara sino a Cagliari, culminante con i depositi detritico-carbonatici del Miocene superiore che costituiscono l'ossatura delle attuali colline del capoluogo.

Nel contesto descritto, il sottosuolo del settore geografico di cui fa parte l'ambito studiato è infatti per lo più costituito dalla successione sabbioso-arenacea del Miocene medio su cui poggia una variegata sequenza carbonatica del Miocene superiore. Il complesso litologico in questione, che copre un arco di tempo geologico che va dal Serravaliano al Messiniano inferiore, rappresenta anche l'importante testimonianza di una copertura sedimentaria molto più estesa che probabilmente interessava (almeno sino al Pliocene inferiore = circa 5÷4 M.a.) buona parte del settore meridionale dell'attuale Campidano di Cagliari, delimitata dai rilievi metamorfico-cristallini del Sarrabus-Gerrei e del Sulcis orientale.

L'intensa tettonica attivatasi in un contesto geodinamico distensivo nel corso del Pliocene connesso con l'apertura del bacino tirrenico, oltre a determinare lo sprofondamento del settore attualmente occupato dalla piana campidanese ("Fossa del Campidano" Auct.) e l'innescò di un vulcanismo di tipo fissurale anorogenico a carattere alcalino (ad esempio Giare, Monte Arci, Campeda etc.), nella sua complessità tettonico-strutturale ha di fatto favorito anche la conservazione di un limitato lembo della successione miocenica più recente (FORMAZIONE DEI CALCARI DI CAGLIARI), i cui residui profondamente intaccati dall'erosione plio-quadernaria si rinvengono nei rilievi collinari di Cagliari.



**FIGURA 3.2** – Rappresentazione schematica in blocco diagramma della strutturazione Plio-Quaternaria del Campidano centrale e meridionale (immagini estratte da «*The Cenozoic graben system of Sardinia: geodynamic evolution from new seismic and field data*», a cura di G. Casula, A. Cherchi, L. Montadert, M. Murru, E. Sarria, 2001).

La giacitura d'insieme della successione sedimentaria miocenica – immergendo di una decina di gradi verso S e SW – consente l'affioramento della sequenza riferibile al secondo ciclo sedimentario a partire dai depositi marnoso-arenacei della Formazione delle MARNE DI GESTURI [GST – Langhiano] lungo la fascia N e NE dell'hinterland cagliaritano, mentre i depositi della FORMAZIONE DELLE ARENARIE DI PIRRI [ADP – Serravalliano], diffusi soprattutto nel sottosuolo di Pirri e nel rilievo collinare di Barracca Manna – Su Planu, circondano, a N e a E sino al promontorio di Sant'Elia, il nucleo di sedimenti marini della FORMAZIONE DEL CALCARE DI CAGLIARI [CGI - Tortoniano-Messiniano inferiore] nelle le sue tre differenti litofacies [CGIa, CGIb e CGIc conosciute rispettivamente con i termini di "*Pietra Cantone*", "*Tramezzario*" e "*Pietra Forte*" trasposti dal gergo dei cavatori] di chiusura del terzo ciclo sedimentario miocenico.

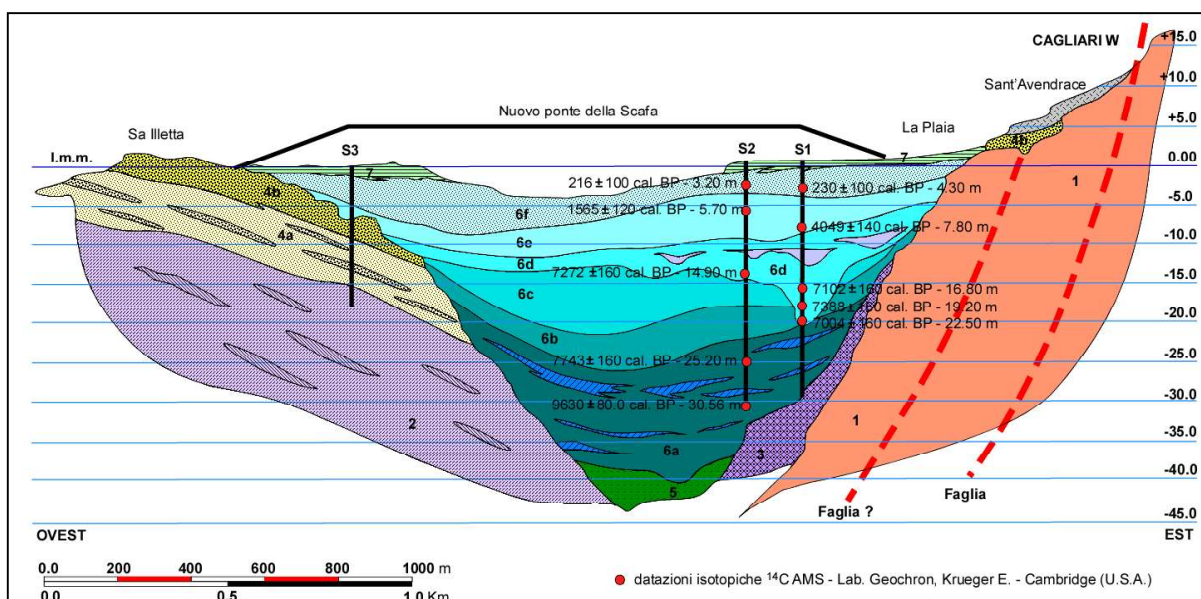
Successivamente al ritiro del mare miocenico avvenuto probabilmente nel Messiniano medio, la complessa tettonica che ha successivamente caratterizzato l'Isola sino a circa 2 M.a. fa (Pliocene), sconnettendo l'insieme di sedimenti marini litificati sino ad allora depositatisi, ha permesso l'innescio di una intensissima erosione che ha smantellato buona parte dei rilievi di neoformazione e consentito la deposizione di notevoli quantità di sedimenti clastici alluvionali e colluviali formanti una potente e discontinua coltre che, in prossimità dell'asse del Campidano di Cagliari, raggiunge diverse centinaia di metri (FORMAZIONE DI SAMASSI Auct.).

In discordanza stratigrafica sul basamento miocenico, nelle aree peristagnali ed in prossimità dell'attuale linea di costa affiora in modo discontinuo una formazione quaternaria di ambiente marino litorale (PVM1 – SUBSINTEMA DI CALAMOSCA – Pleistocene superiore) conosciuta con il nome di "Panchina tirreniana", costituita da depositi conglomeratico-arenacei a cemento carbonatico ricchi di resti conchigliari di organismi di clima caldo, legata alla trasgressione avvenuta nell'interglaciale Riss-Würm (~120.000÷60.000 anni fa): tali sedimenti risultano attualmente per lo più erosi e frammentari nonché obliterati dai depositi wurmiani e olocenici, ad esclusione di alcuni affioramenti prossimi alla linea di costa rocciosa (ad esempio in località di Calamosca).

Con il successivo raffreddamento globale (fase glaciale Würm), sempre nel Pleistocene superiore il progressivo abbassamento del livello del mare (che nella fase di culmine avvenuta tra i 18.000 e 12.000 anni fa è giunto sino a circa -120 m rispetto all'attuale) probabilmente associato a movimenti di sollevamento crostale, favorisce l'innescio di ulteriori intensi fenomeni di erosione provocando, oltre alla demolizione dei sedimenti "Tirreniani" (tale erosione talora si spinge sino ad intaccare profondamente anche il loro substrato geologico litoide lungo la costa) e il terrazzamento delle "alluvioni antiche" presenti nell'entroterra, la deposizione di sedimenti continentali di piana costiera e deltizi che si spingono ben oltre l'attuale linea di costa talora intercalati da paleosuoli e da crostoni carbonatici.

Gli episodi alluvionali più prossimi all'area di interesse che con elevata probabilità possono essere attribuiti al Würm, più o meno irregolarmente sovrapposti al basamento miocenico e in genere formanti i terrazzamenti posti alle quote maggiori nell'entroterra cagliaritano [PVM2a] si rinvencono solo nella parte sommitale del rilievo di Barracca Manna (quota: + 62 m s.l.m.m.): questi ultimi, comunemente indicati come "ALLUVIONI ANTICHE TERRAZZATE" ed appartenenti in prevalenza al SubsinTEMA di Portoscuso [PVM2a], sono costituiti da sedimenti ghiaioso-ciottolosi in matrice sabbiosa, associati a depositi sabbioso-ghiaiosi, ben addensati, con grado di ossidazione ± spinto che conferisce a queste terre il tipico colore rosso-arancio.

Il contenuto in materiale clastico di questi depositi alluvionali, solitamente ghiaioso-ciottoloso, è generalmente costituito da materiali litoidi poligenici provenienti dallo smantellamento dei rilievi metamorfico-cristallini del Sulcis-Iglesiente, del Sarrabus-Gerrei e del Sarcidano. In prossimità della costa si sintaura invece una deposizione di più bassa energia con un complesso sistema deltizio e lagunare che consente la deposizione di prevalenti sedimenti medi e fini (sabbie, limi e argille).



**Legenda:** 1) arenarie e arenarie marnose (Miocene medio); 2) complesso deltizio a limi e limi sabbiosi con argille e sabbie a ostree in lenti (Pleistocene medio); 3) ghiaie poligeniche in matrice argillosa (Pleistocene medio); 4a) sabbie debolmente cementate e sabbie limose giallastre a bioturbazioni e *Strombus bubonius* (MIS 5 - Pleistocene superiore); 4b) arenarie e conglomerati a *Cladocora coespitosa* - 149 ± 10 kyr BP (Ulzega et Hearty, 1986) (MIS 5e - Pleistocene superiore); 5) ghiaie poligeniche in matrice sabbiosa (MIS 2 Pleistocene superiore); 6a) limi deltizi e limi sabbiosi paralici (Younger Dryas - Pre Boreale); 6b) limi sabbiosi e sabbie limose litorali con intercalazioni torbose a *Posidonia oceanica* (Boreale inferiore); 6c) alternanza di sabbie fini litorali e sabbie limose lagunari (Boreale superiore); 6d) successione di reincisioni e colmate a limi sabbiosi e sabbie bioclastiche lagunari (Atlantico inferiore); 6e) sabbie fini litorali con sottili intercalazioni torbose a *Posidonia oceanica* (Atlantico superiore - Sub Boreale); 6f) sabbie orgnogene lagunari passanti a limi organici nerastri (Sub Atrantico-Storico); 7) limi organici e riporto antropico (Attuale).

**FIGURA 3.3** – Profilo geologico in corrispondenza della bocca della laguna di Santa Gilla, rappresentativo del probabile assetto litostratigrafico del settore costiero a W e S dell'abitato di Cagliari ovvero della colmata olocenica della profonda paleo valle del Flumini Mannu - Riu Cixerri (MIS 2 - Pleistocene superiore) durante la risalita eustatica post wurmiana.

L'elaborazione è basata sui dati esplicitati in Orrù et alii, 2004 ed in particolare di tre sondaggi sui quali sono state effettuate delle datazioni assolute con il metodo  $^{14}\text{C}$  (Estratto da APAT «Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia»).

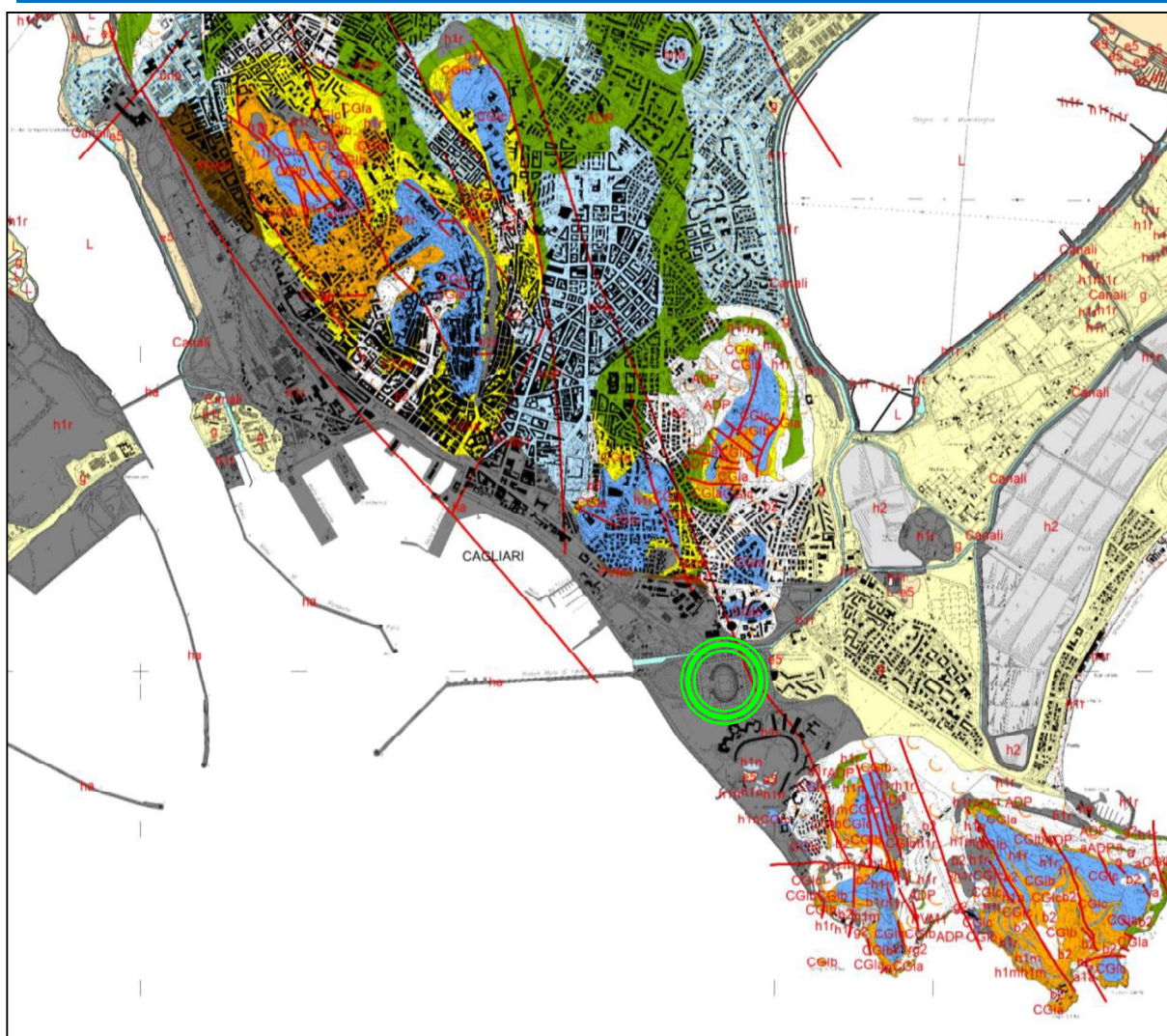
Soprattutto lungo le pendici dei rilievi collinari cagliaritari nonché lungo la costa si riconoscono anche altri depositi wurmiani: quelli di genesi gravitativa (frane di crollo legate alla evoluzione dei pendii e di antiche falesia) sono riconducibili sempre al Subsintema di Portoscuso [PVM2c], talora associati a depositi sabbioso-arenacei eolici che a suo tempo formavano campi dunari più o meno estesi di retro spiaggia [PVM2b].

Con la fine del glaciale Würm e la conseguente risalita del mare, nel corso dell'Olocene si ha il deposito di ulteriori sedimenti alluvio-colluviali [bn e b2], stagnali [e5] e marino-litorali [g e g2] che colmano le attuali aree più depresse e le valleciole, spingendosi sino alla linea di costa dove ha agito una non trascurabile subsidenza a elevata componente tettonica.

Alla successione descritta si sovrappone infine tutto l'insieme di prodotti dell'attività antropica [h1] che ha determinato numerose e importanti alterazioni dell'assetto planoaltimetrico dei luoghi con scavi e colmate, riempimenti, bonifiche, etc..

In **FIGURA 3.4** ed nella **TAVOLA II** fuori fascicolo viene riportato uno stralcio della Carta Geologica di Cagliari che inquadra l'assetto geologico e stratigrafico di un idoneo contorno dell'area di intervento.





<b>h1r</b>	Materiali di riporto e aree bonificate (Attuale)
<b>h1n</b>	Discariche per inerti (Attuale)
<b>h1m</b>	Discariche minerarie (Attuale)
<b>h2</b>	Saline e vasche di salificazione (Attuale)
<b>ha</b>	Manufatti antropici (Attuale)
<b>g2</b>	Depositi di spiaggia (Olocene)
<b>e5</b>	Depositi palustri (Olocene)
<b>b2</b>	Coltri eluvio-colluviali (Olocene)
<b>a</b>	Depositi di versante (Olocene)
<b>a1a</b>	Depositi di frana (Olocene)
<b>b</b>	Depositi alluvionali (Olocene)
<b>bn</b>	Depositi alluvionali (Olocene)
<b>bnb</b>	Depositi alluvionali terrazzati (Olocene)
<b>g</b>	Depositi di spiaggia antichi (Pleistocene superiore? – Olocene)
<b>PVM1</b>	Subsintema di Calamosca (Panchina Tirreniana” Auct. - Sintema di Portovesme – Pleistocene superiore)
<b>CGI</b>	Litofacies nella F.ne dei Calcari di Cagliari (Pietra Forte – Tortoniano – Messiniano inferiore)
<b>CGlb</b>	Litofacies nella F.ne dei Calcari di Cagliari (“ramezzario – Tortoniano – Messiniano inferiore)
<b>CGla</b>	Litofacies nella F.ne dei Calcari di Cagliari (Pietra Cantone – Tortoniano)
<b>ADP</b>	F.ne delle Arenarie di Pirri (Serravalliano)
<b>AFA</b>	F.ne delle Argille di Fangario (Langhiano medio? – Serravalliano inferiore)
<b>GST</b>	F.ne delle Marne di Gesturi (Burdigaliano superiore – Langhiano medio)

**FIGURA 3.4** – Stralcio della Carta geologica di Cagliari in scala circa 1:40.000, con ubicazione del settore di intervento (estratta da <http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=pai>).

### 3.2. Assetto strutturale e tettonico

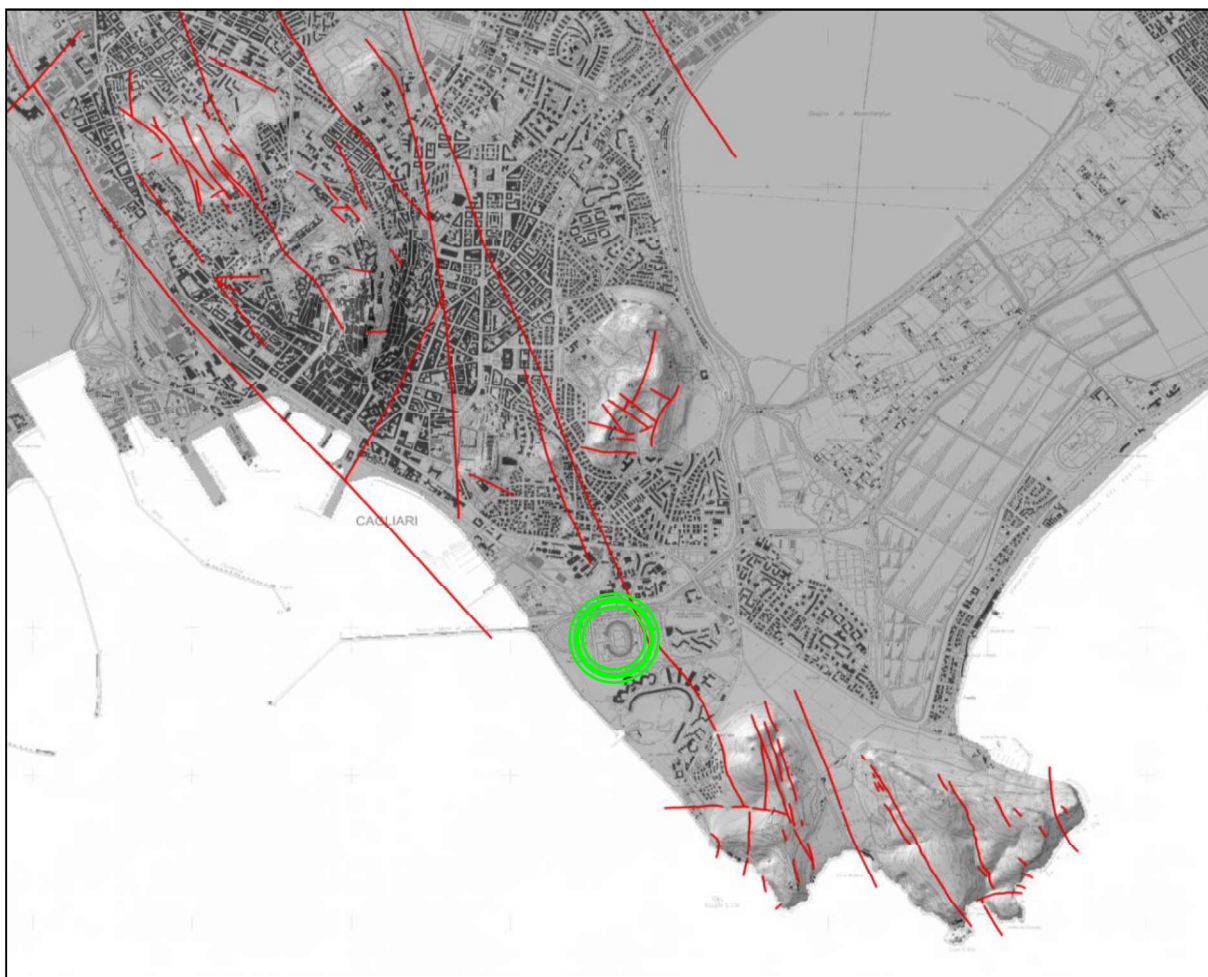
Come esposto nel paragrafo dedicato all'assetto geologico generale, l'areale cagliaritano, come del resto tutta la Sardegna, ha subito notevoli contraccolpi a carattere tettonico strutturale nel corso degli ultimi 4÷5 milioni di anni (fine Messiniano, Pliocene e Quaternario), contestualmente alle vicende geodinamiche che hanno portato alla formazione del bacino del Tirreno centrale. La maggiore ripercussione si è avuta a causa dell'innescò di una complessa tettonica a carattere anche transtensivo (direzioni di estensione circa NE-SW) che è stata responsabile dello sprofondamento pluri-ettometrico del settore ora occupato dalla piana campidanese, dell'attivazione di un intenso vulcanismo basaltico anorogenico a chimismo alcalino, dell'alterazione dell'idrografia superficiale preesistente e del ringiovanimento complessivo del rilievo al contorno.

Le faglie che hanno contribuito alla formazione della fossa campidanese, come rappresentato in **FIGURA 3.5** hanno un sostanziale andamento variabile tra NNW-SSE e N-S ben riscontrabile, oltre che sui bordi della piana, anche nel settore pericostiero del Golfo degli Angeli, da cui scaturisce la distribuzione dei rilievi collinari sui quali poggia buona parte dell'abitato di Cagliari: si tratta di discontinuità crostali di impostazione oligo-miocenica o precedente, riattivate nel tardo Miocene e nel Plio-Quaternario, non tutte direttamente osservabili ma estrapolabili dall'assetto geostrutturale dei luoghi al contorno. In virtù di tale strutturazione tutta la successione tardo miocenica è stata dislocata e frantumata in piccoli "bassi" ("graben") e "alti" ("horst") strutturali, favorendo l'azione erosivo-deposizionale delle acque di ruscellamento la cui progressiva azione ha poi "sigillato" le suddette discontinuità con la sedimentazione detritico-alluvionale quaternaria.

È sempre da mettere in relazione con la tettonica tardo-terziaria e Quaternaria la formazione delle aree depresse del Campidano meridionale interessate dagli stagni costieri e lagune con evidenti condizioni di subsidenza dei luoghi, ancora attiva seppure con movimenti molto lenti, che hanno interagito con i fenomeni erosivo-deposizionali connessi con le variazioni eustatiche del livello del mare nel corso del Pleistocene superiore-Olocene.

Le evidenze della tettonica tardo-miocenica sono invece principalmente di tipo sin-sedimentario a conferma della instabilità del bacino deposizionale Tortoniano-Messiniano rappresentato dalla *F.ne dei Calcari di Cagliari* e delle tre litofacies che la compongono; spesso si possono osservare blocchi e dislocamenti all'interno di una singola litofacies (soprattutto nella litofacies "*Tramezzario*" **CGIb**) che non proseguono in quelle sovrastanti. Gran parte delle faglie sono generalmente dirette a volte con componenti trascorrenti e rigetti di entità molto modesta; l'effetto principale che si osserva è l'evidente basculamento di alcuni settori come il blocco del Promontorio di Sant'Elia che attualmente immerge verso SW di una decina di gradi. Le faglie principali sono orientate NNW-SSE e NW-SE e alcune di queste spesso non sono osservabili direttamente perché obliterate dalle successioni stratigrafiche posteriori alla loro formazione.

Per i suddetti motivi le rocce della *F.ne dei Calcari di Cagliari* sono interessati da un intenso sistema di fratturazione dovuto probabilmente agli stress tettonici indotti anche dalla fase compressiva Messiniana che pone fine alla sedimentazione marina miocenica. La fratturazione principalmente interessa più marcatamente la litofacies del *Tramezzario* e quella della *Pietra Forte* mentre la *F.ne delle Arenarie di Pirri* pur presentando una fratturazione molto intensa essa risulta poco evidente a causa dei prodotti dell'alterazione che "chiudono" le discontinuità e le rendono meno visibili ma non per questo meno presenti. Analoga fenomenologia si osserva dei depositi della litofacies *Pietra Cantone*, in virtù della elevata componente argillosa. Lo stesso areale di previsto intervento costituisce un ambito strutturalmente complesso che oltre ad aver subito un sostanziale ribassamento tettonico per faglia rispetto al contorno, è stato oggetto anche di intensa erosione nel corso del Quaternario antico, ed in particolare nel corso del tardo Pleistocene superiore, durante il culmine della fase glaciale würmiana.



**FIGURA 3.5** – Schema della strutturazione tettonica del settore NE dell’abitato di Cagliari.  
In rosso le faglie plio-quadernarie direttamente connesse con la formazione della fossa campidanese.

### 3.3. Sismicità storica dell'area

Nonostante la nota bassa sismicità della Sardegna conseguente alla generale stabilità geologica del blocco sardo-corso (gli ultimi episodi vulcanici dell’isola vengono fatti risalire a circa 90.000 anni fa, nel Pleistocene superiore, con l’emissione di lave e scorie nel settore dell’*Anglona*), sono noti indizi di eventi sismici risalenti a 3-4000 anni fa sulla base di importanti danneggiamenti rilevati in alcuni edifici nuragici.

Dai dati macrosismici storici provenienti da studi dell’Istituto NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA (INGV) e di altri enti utilizzati per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04 (consultabili dal sito web “DBMI04”) per l’Isola sono segnalati eventi sismici con un massimo di danno valutato del VI grado della scala MERCALLI-CANCANI-SIEBERG.

Si porta ad esempio il terremoto del 04.06.1616 che determinò danneggiamenti vari a edifici della *Cagliari* di allora e ad alcune torri costiere attorno a *Villasimius*. Altri terremoti degni di nota (oltre ai primi registrati dall’ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA negli anni 1838 e 1870 rispettivamente del VI e V grado della scala Mercalli) risalgono al 1948 (epicentro nel *Canale di Sardegna*, verso la *Tunisia*, VI grado) e al 1960 (V grado), con epicentro i dintorni di *Tempio Pausania*).



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

Altri episodi, con epicentro nel settore a mare poco a ovest della Corsica e della Sardegna, sono stati registrati in Sardegna nel 2011 con magnitudo RICHTER compresa tra 2,1 e 5,3 ed ipocentro a profondità tra 11 km e circa 40 km di profondità.

Si segnalano altri terremoti tra il 2006 e il 2007 nel *Medio Campidano* seppure di magnitudo mai superiore a 2,7 (13.07.2006, magnitudo 2,7 a 10 km di profondità con epicentro *Capoterra*; 23.05.2007, magnitudo 1,4 a 10 km di profondità con epicentro *Pabillonis*; 02.10.2007, magnitudo 1,4 a 10 km di profondità con epicentro tra *Pabillonis* e *Guspini*).

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

- **CPTI15 – Catalogo Parametrico dei terremoti Italiani 2015**  
Contiene i dati parametrici omogenei, sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  o con magnitudo ( $M_w$ )  $\geq 4$  relativi a tutto il territorio italiano.
- **DBMI15 – Database macrosismico dei terremoti italiani 2015**  
Fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nel periodo 1000-2014.

L'archivio CPTI15-DBMI15 indica tra i terremoti più significativi quello localizzato nel Mar Tirreno Centrale (Latitudine 40.955 N – Longitudine 10.097 E e profondità circa 1 km) e avvenuto il 26.04.2000 alle ore 13:37 la cui magnitudo è risultata di 4,77.

Per il Comune di Cagliari gli effetti di questo terremoto sono stati molto blandi (intensità  $< 1$ ).

### 3.4. Classificazione sismica

Il panorama legislativo in materia sismica è stato rivisitato dalle recenti normative nazionali ovvero dall'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20.03.2003 «*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*» entrata in vigore dal 25.10.2005, in concomitanza con la pubblicazione della prima stesura delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" e dalla successiva O.P.C.M. n. 3519/2006.

In relazione alla pericolosità sismica - espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi - il territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone con livelli decrescenti di pericolosità in funzione di altrettanti valori di accelerazione orizzontale massima al suolo ( $a_{g475}$ ), ossia quella riferita al 50esimo percentile, ad una vita di riferimento di 50 anni e ad una probabilità di superamento del 10% attribuiti a suoli rigidi caratterizzati da  $V_{s30} > 800$  m/s alle quali si applicano norme tecniche differenti le costruzioni.

L'appartenenza ad una delle quattro zone viene stabilita rispetto alla distribuzione sul territorio dei valori di  $a_{g475}$  con una tolleranza 0,025g: a ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido ( $a_g$ ), che deve essere considerato in sede di progettazione.

Tutto il territorio regionale ricade in **Zona 4**, contraddistinto da «pericolosità sismica BASSA» a cui corrisponde la normativa antisismica meno severa ed al parametro **ag** è assegnato un valore di **0,025÷0,05 g** da adottare nella progettazione.

Pur tuttavia, con la ratifica delle Norme Tecniche per le Costruzioni avvenuta con l'aggiornamento del 17.01.2018, anche in questo ambito per le verifiche geotecniche è obbligatorio l'utilizzo del metodo delle tensioni limite.

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

Per i comuni della Sardegna, così come per quelli ove si segnalano intensità massime molto basse o non esiste alcun dato osservato, è stato assegnato un valore "ponderato" di intensità ( **$I_{max/pon}$** ), stimato per estrapolazione dai valori osservati nei comuni limitrofi oppure calcolando un risentimento massimo a partire dal catalogo NT.3 mediante opportune leggi di attenuazione. Dei 375 comuni della Sardegna, meno del 5% ha comunicato al G.N.D.T. i dati relativi all'intensità macrosismica MCS: in ogni caso, nella totalità delle rilevazioni, i valori sono risultati minori di 6.

In ogni caso non si esclude, stante appunto la scarsa documentazione relativa a terremoti avvenuti in Sardegna in epoca storica nonché di recente, che eventi sismici di eccezionale intensità localizzati in vari settori dell'area tirrenica, possano indurre in alcuni areali dell'isola, compreso l'ambito cagliaritano, vibrazioni i cui effetti sulle strutture in argomento potrebbero verosimilmente ritenersi di non trascurabile entità in funzione delle specifiche caratteristiche costruttivo/strutturali.

### 3.5. Assetto geomorfologico ed idrografico

Lo stadio di Sant'Elia ricade nell'ambito di un vasto settore pianeggiante che sino al primo ventennio del secolo scorso costituiva un'ampia rientranza acquitrinosa direttamente influenzata da mare che lambiva la stretta striscia di terra emersa che univa il settore del Promontorio di *Sant'Elia - Sella del Diavolo* con l'entroterra cagliaritano.

Tale morfologia, conseguenza diretta dell'ultima ingressione del mare conosciuta con il nome di "Trasgressione Versiliana", è stata significativamente alterata nel corso degli ultimi secoli sino alla completa bonifica datata 1920, del tratto di mare basso compreso tra i rilievi di *Monte Urpinu*, *Bonaria* e *Sant'Elia*, sulla quale ora trovano spazio lo stesso stadio, i parcheggi al suo contorno, parte del quartiere di Sant'Elia la viabilità che collega *Viale Colombo* con *San Bartolomeo*, *il Quartiere del Sole* e la zona delle ex Saline di Stato.

L'intensa antropizzazione conseguente all'espansione urbana verso sud dell'abitato di Cagliari, con la realizzazione della viabilità, delle sistemazioni idrauliche etc., ha perciò profondamente modificato l'originario assetto morfologico e morfodinamico dell'area svincolandola totalmente dalle influenze del mare, delle aree stagnali al contorno e dal reticolo idrografico naturale.

La stessa posizione distante rispetto ai versanti del *Colle di Sant'Elia*, fa sì che il sito in argomento risulti esente da problematiche legate a dissesto sia per franosità sia per eventi di esondazione fluvio-torrentizia: sono infatti significative le modificazioni, rispetto al passato anche recente, che ha subito la rete naturale di compluvi preesistente all'urbanizzazione, con interventi deviazione, regimazione e la realizzazione di diversi canali artificiali (*Canale Mortu*, il canale di *La Palma* e il canale di *San Bartolomeo*).



**FIGURA 3.6** – Stralci da cartografia IGM storica in scala 1:25.000 dai quali è possibile osservare l'evoluzione del settore costiero nel corso della prima metà del 1900.

L'area nella quale ricade attualmente lo stadio, ricade sull'ampia area bonificata nel 1920 mediante colmata, a sud del canale di San Bartolomeo. Quest'ultimo infatti, già per tutto il 1800, in funzione della attività delle saline di Stato, sfociava in mare aperto.





**FIGURA 3.8** – Immagine storica di Cagliari con il livello del mare presso l'attuale Viale Colombo.



**FIGURA 3.7** – Immagine storica di Cagliari da Su Siccu. Veduta di Viale Diaz "sul mare".



**FIGURA 3.9** – Immagine satellitare con individuazione dei siti di interesse e del contesto orografico e idrografico al contorno (fonte Google Earth, 2015).

Di seguito si espone il quadro specifico relativo alle interazioni che le opere esercitano nei confronti del sistema dei deflussi superficiali. In una prima fase si inquadrerà nella sua generalità il sistema dei deflussi esteso, successivamente si effettuerà un'analisi circoscritta all'area di intervento mentre in conclusione sarà definito il sistema normativo e vincolistico attualmente vigente.

Quanto riportato nasce dall'esame ed elaborazione delle Informazioni cartografiche rese disponibili ed in particolare:

- ♦ reticolo idrografico di riferimento per le finalità di applicazione delle Norme Tecniche di Attuazione del PAI e delle relative Direttive approvato con le varie Deliberazione.
- ♦ DTM 1m e 10m fornito dalla Regione Sardegna
- ♦ Cartografia IGM
- ♦ Carta Tecnica Regionale

Da una considerazione generale dell'area riguardante il sistema del Molentargius, emerge che lo stesso risultava storicamente quale recapito del sistema dei deflussi che facenti parte la corona che si estende dall'alto topografico di Piazza d'Armi e Buon Cammino a Cagliari nel versante occidentale, sino ai rilievi, sul versante orientale, riconducibili alle colline di Sinnai.

Il primo comparto drenante alimenta il compluvio denominato *S'Arriu*, il secondo alimenta il *Rio de Is Cungiaus*. Tra i due si inquadrano i rii *Saliu* e *Mortu* in comune di Monserrato e San Giovanni in comune di Selargius. Il sistema totale tende a defluire concentrandosi nell'area umida del *Molentargius*; alcuni alimentando il canale di *Terramaini*, altri sversando sul *Bellarosa Minore*.

L'intero sistema è reso comunicante mediante i canali circondariali del *Molentargius* nell'unico canale di consegna a mare che è il *Canale di Terramaini* o di *San Bartolomeo*.



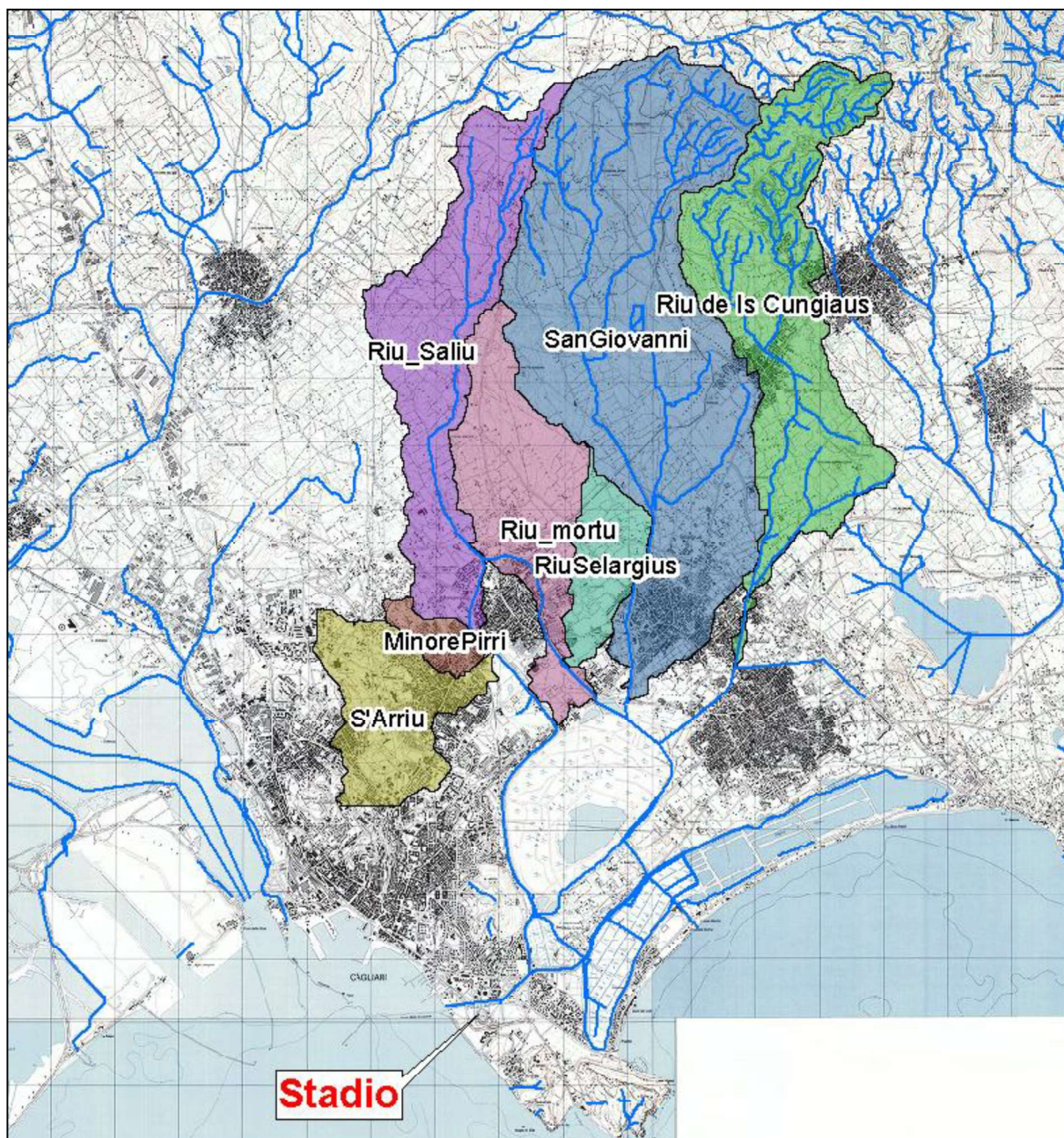


FIGURA 3.10 – Sistema drenante esteso.

I deflussi che in occasione di eventi di rilevante intensità, anche recenti, hanno interessato la zona meridionale della Sardegna si sono poi riversati nel sistema del Molentagius, mettendo in taluni casi in forte criticità il sistema drenante che successivamente ha laminato nell'area umida e successivamente nel Canale di San Bartolomeo senza mai interessare con fenomeni di esondazione la zona dello stadio.

L'informazione locale tratta dall'informazione del DTM 1m e riportata sulla successiva figura, consegna una quota dell'area su valori nell'interno di un metro rispetto al livello del mare; poco a valle, il canale sfocia in prossimità della zona di *Su Siccu*.





FIGURA 3.12 – Recapiti sullo Stagno del Molentargius.

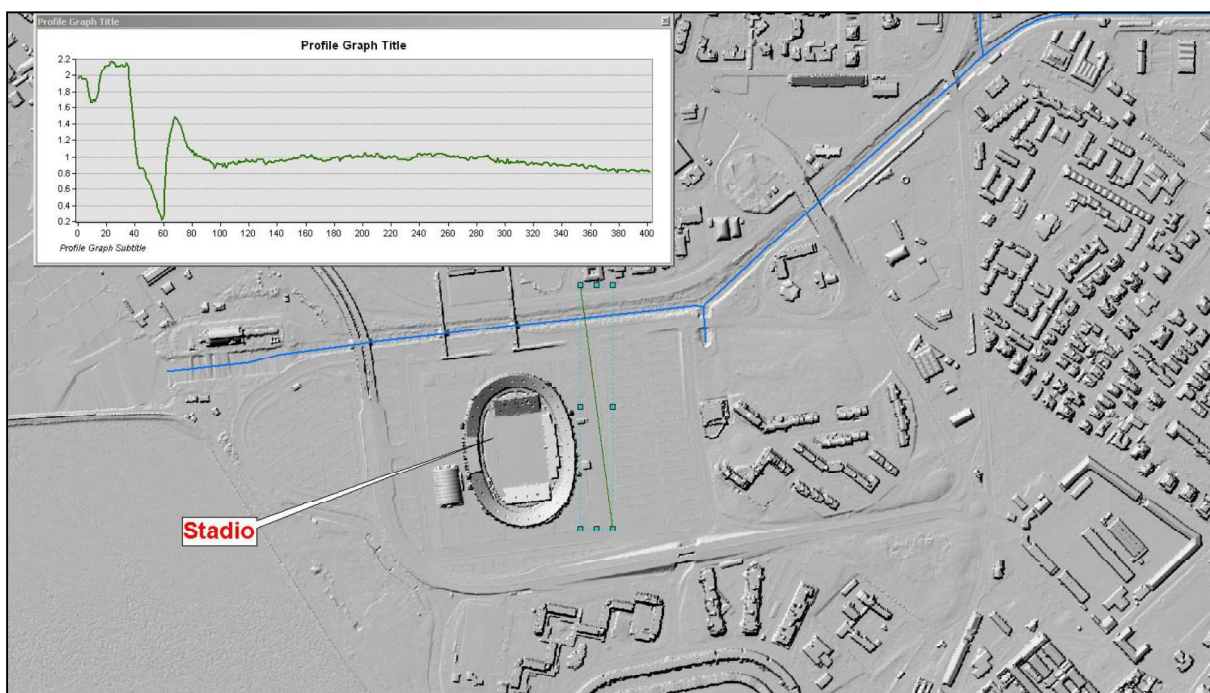


FIGURA 3.11 – Area in esame su DSM passo 1m.



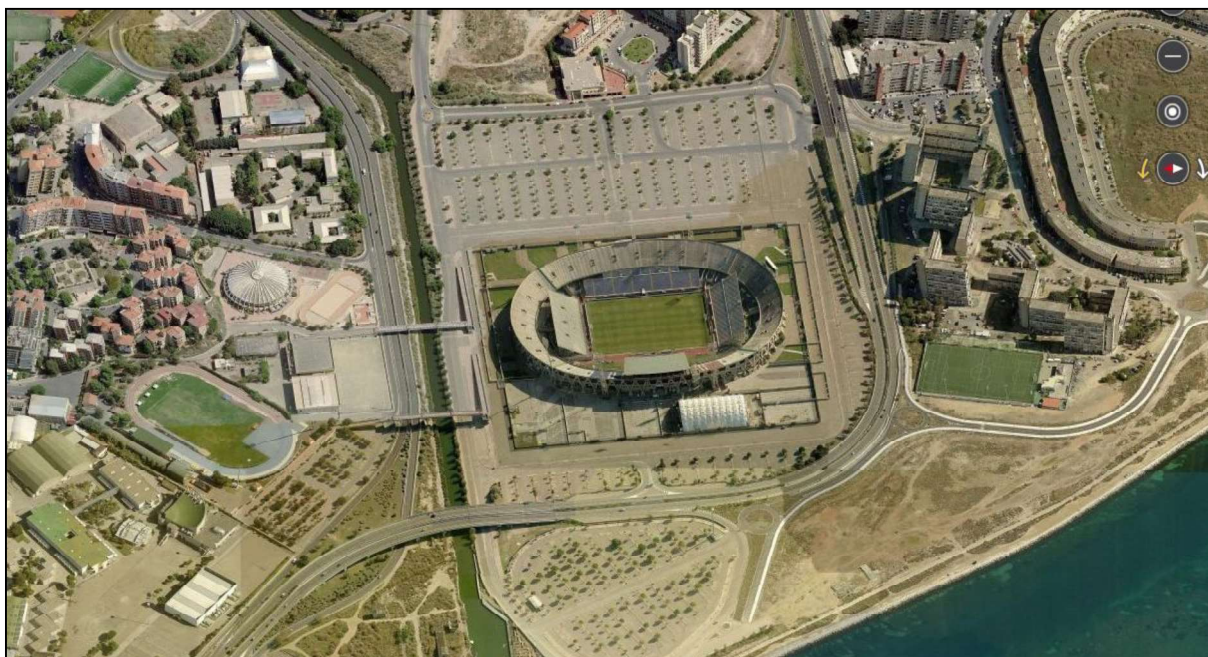
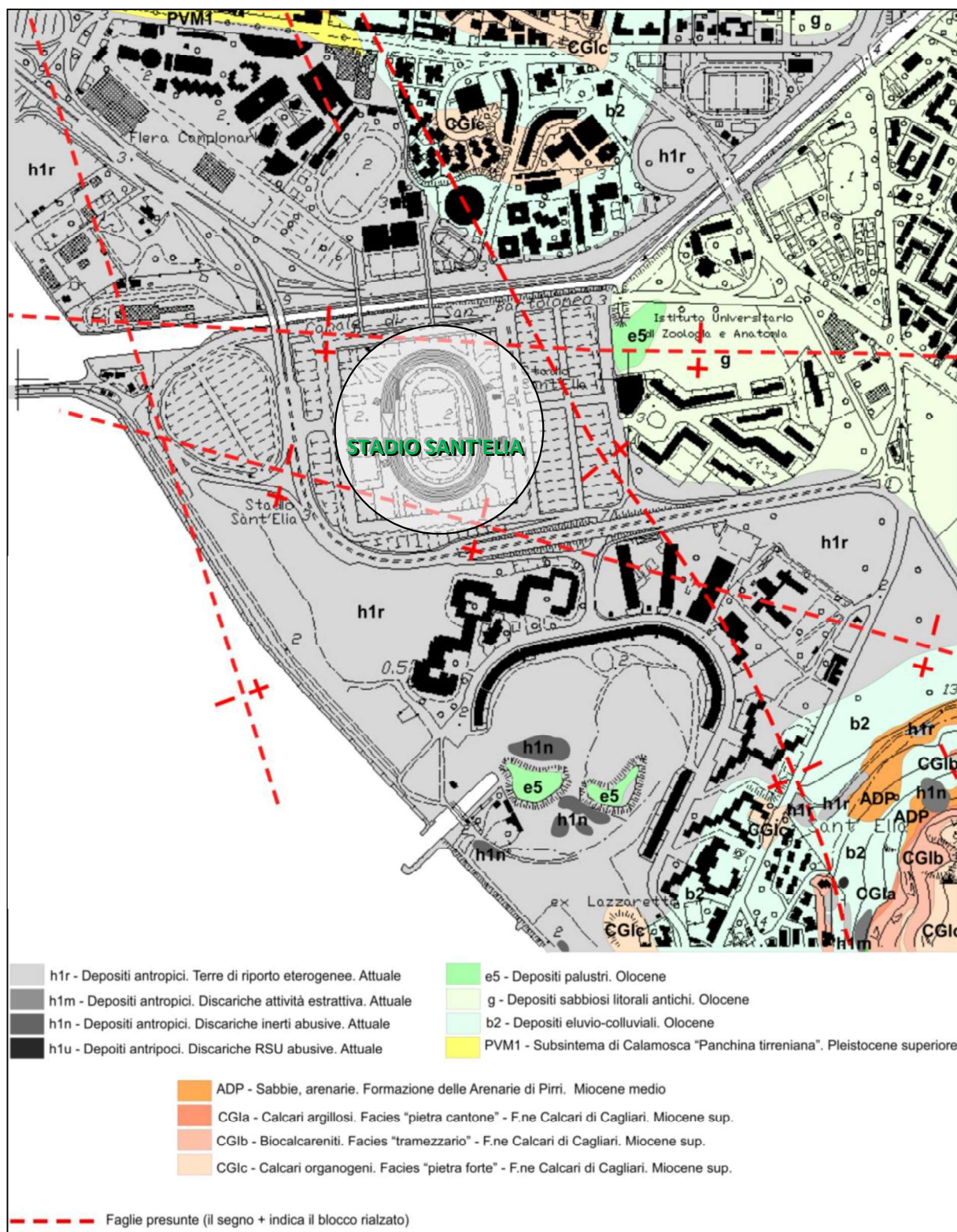


FIGURA 3.13 – Vista aerea riprendente lo stadio e il canale San Bartolomeo.

### 3.6. Stratigrafia dei terreni costituenti il sottosuolo locale

Il modello geologico del sottosuolo, ragionevolmente schematizzato per gli obiettivi del lavoro, prevede la seguente stratigrafia a partire dal p.c., distinta per singole unità e sotto unità:

- A] **Superfici artificiali e terreni di riporto eterogenei** [Attuale]
  - A1] Superfici artificiali
  - A2] Terreni di riporto eterogenei
- B] **Depositi limo sabbiosi e sabbioso ghiaiosi di ambiente litorale e transizionale** [Olocene]
  - B1] Fango limoso e limi sabbiosi, conchigliari e con fibra vegetale marina decomposta
  - B2] Sabbie fini e medie limose con abbondante fibra vegetale marina decomposta
  - B3] Sabbie e ghiaie  $\pm$  cementate da carbonato di calcio
- C] **Depositi argillo-limosi e sabbiosi di ambiente fluvio-deltizio** [Pleistocene?]
  - C1] Argille  $\pm$  limose con noduli carbonatici, sovraconsolidate
  - C2] Sabbie argillose ferrettizzate
- D] **Depositi detritici sabbiosi e conglomeratici fluvio-deltizi** [Pleistocene?]
  - D1] Sabbie grossolane addensate
  - D2] Breccie calcaree monogeniche, moltocompatte
- E] **Basamento roccioso carbonatico** [Miocene superiore]
  - E1] Calcare organogeno/detritico (Litofacies “Tramezzario” + “Pietra Forte”)
  - E2] Calcare marnoso (litofacies “Pietra Cantone”)



**FIGURA 3.14** – Stralcio della Carta geologica del settore di interesse su base planoaltimetrica CTR in scala 1:10.000, modificata (immagine estratta da <http://www.sardegna territorio.it/webgis/sardegna mappe/mappa.html>).



Viene di seguito descritta ciascuna unità costituente la sequenza stratigrafica riconosciuta, a partire dai depositi più superficiali. Gli spessori di ogni singola unità sono riferiti ai riscontri ricavati nel corso delle terebrazioni, con riferimento ai sondaggi utilizzati a supporto del presente studio.

#### **A - Superfici artificiali e terre di riporto eterogenee**

Questa unità comprende le pavimentazioni artificiali [Strato A1] e l'insieme delle terre di riporto [Strato A2] non meglio differenziate [sigla ufficiale: h1r] mediante le quali è stata effettuata la colmata e la conseguente bonifica del vasto settore costiero su cui è ubicato lo Stadio di Sant'Elia che, sino al primo ventennio del 1900 era occupato dal mare.

Ne fanno parte anche i materiali costituenti gli antichi argini del canale di San Bartolomeo (che prima della bonifica sfociava direttamente in mare aperto, a circa 700 m dalla costa di allora) nonché altri depositi e macerie di epoca storica non direttamente osservabili.

Trattandosi di terre di scavo eterogenee riversate direttamente in mare, risultano nel complesso caotiche o mal stratificate, a granulometria molto variabili con prevalenza di sabbie ± limose e argillose associate a scheletro clastico ghiaioso-ciottoloso talora prevalente e per lo più formato da clasti di rocce carbonatiche mioceniche della successione dei colli di Cagliari con possibile presenza di materiali anche artificiali provenienti da demolizioni.



**FIGURA 3.15** – Terreni di riporto **h1r** rinvenuti tra 0,00 e -4,00 m nel sondaggio S2.

Seguono fanghi limo sabbiosi e argillosi con abbondante presenza di componente organica vegetale (foglie e rizomi di Posidonia oceanica) di rappresentativi della deposizione di ambiente litorale precedente alla bonifica operata nel secolo scorso.

**FOTO 3.2**

Particolare di una tipologia di terre di riporto.

**FOTO 3.1**

Contatto tra terre di riporto e sottostanti limi argillosi con strati di "paglia marina" (accumuli di *Posidonia oceanica*).

È significativa anche la frazione fine, limo-argillosa, che localmente può divenire preponderante.

Alla base del deposito, soprattutto se costituito da clasti grossolani, è possibile rinvenire abbondanti fibre vegetali di *Posidonia oceanica* che, al momento dello sversamento in acqua, costituivano l'originario fondo marino/lagunare assieme alle sabbie ± limose di spiaggia sommersa.

La deformazione da carico delle stesse ed il conseguente rimescolamento dei sedimenti di origine naturale e antropica, è probabilmente responsabile della differenza di spessore riscontrabile nei vari punti di indagine, senza escludere anche che i luoghi possano essere stati oggetto di dragaggio o di progressiva ricarica per la realizzazione di argini. Infatti, come risulta dai 4 sondaggi eseguiti, mentre in S4\_DH, S6\_PZ e S3\_DH (rappresentativi dei settori NW, W e S del sedime dello stadio) gli spessori di questa unità variano tra 1,50÷2.00 m, in S2 (lato E) si arriva invece a 1,00 m dal p.c..

Il grado di addensamento, determinato attraverso prove penetrometriche dinamiche continue e prove SPT in foro è generalmente basso, a meno di locali anomalie dovute alla presenza di materiale grossolano. Qualsiasi ipotesi di fondazione diretta da impostarsi in questi terreni, anche per piccoli manufatti, è sconsigliata salvo particolari accorgimenti e l'ammissione di cedimenti non trascurabili.

## **B] Depositi limo sabbiosi e sabbioso limosi di ambiente litorale e transizionale**

In questa unità è stato raggruppato l'insieme delle facies [B1 + B2 + B3] di ambiente marino-litorale protetto, connesse con la risalita del mare olocenico sino al suo massimo valore raggiunto circa 6.000 anni fa ("Trasgressione Versiliana") ed il successivo assestamento sino alle quote attuali.

Si tratta di un complesso di depositi detritici a granulometria variabile dai limi argillosi ricchi di componente vegetale in vario grado di decomposizione alle sabbie fini limo-argillose sino alle sabbie ghiaioso-ciottolose con diverso grado di elaborazione da parte del moto ondoso e talora ricche in frammenti conchigliari e semicementate da carbonato di calcio, direttamente ricoperte dai terreni di riporto e suddivisibili in tre distinte sub-unità le cui caratteristiche vengono esplicitate di seguito.



Lo spessore complessivo di questa unità sotto lo stadio di Sant'Elia varia tra i 10,00÷11,00 m circa dei sondaggi S2 e S4\_DH ai circa 12,00 m del sondaggio S3\_DH, sino ad un massimo di 13,50 m raggiunto nel sondaggio S6\_PZ.

Si descrivono di seguito le principali caratteristiche delle tre sottounità.

#### **B1 - Fango limoso e limi sabbiosi conchigliari e con fibra vegetale marina decomposta**

Intercettata in tutte le verticali d'indagine, questa unità rappresenta solitamente la parte più recente del deposito marino litorale olocenico in quanto, sino ai primi decenni del secolo scorso costituiva il fondo del basso mare protetto che lambiva la costa compresa tra il colle di *Sant'Elia - Sella del Diavolo* e quello di *Monte Urpinu - Bonaria- Monte Mixi*.

È formata per lo più da limi sabbiosi e argillosi, sabbie fini limose e argille torbose caratterizzate da presenza di materiale organico vegetale a fibre di apparati fogliari e radicali di *Posidonia oceanica* accumulata dal moto ondoso di mareggiata. Quest'ultimo, in vario stadio di decomposizione in ambiente sostanzialmente anossico, in funzione della sua presenza percentuale più o meno rilevante determina una colorazione del sedimento variabile dal grigio al nerastro nonché un forte odore di uova marce per sviluppo di idrogeno solforato e ammoniaca. In alcune verticali di indagine effettuate al contorno lo spessore degli accumuli vegetali è risultato plurimetrico tale da rendere il substrato soffice e particolarmente compressibile.

Nelle facies prevalentemente fini non mancano comunque anche livelli arricchiti in sabbie medie e grossolane sino a microghiaiose a composizione sia silicoclastica sia carbonatica ed un contenuto in bioclasti (lamellibranchi, gasteropodi, coralli, briozoi, etc.) talora concentrato in orizzonti di spessore centimetrico piuttosto che disperso più o meno uniformemente nel deposito. L'insieme è dotato di elevata porosità e compressibilità derivante dalla fibra vegetale intrecciata che localmente contribuisce alla discreta resistenza al taglio riscontrabile in alcuni test penetrometrici.

Indagini effettuate nelle aree viciniori per varie iniziative edilizie hanno evidenziato una graduale diminuzione dello spessore (e conseguentemente degli accumuli vegetali) man mano ci si sposta da NW verso SE nonché da SW verso NE analogamente a quanto avviene per gli spessori totali della copertura quaternaria a causa della risalita del basamento lapideo carbonatico miocenico.



**FOTO 3.3** – Aspetto dei depositi sabbioso-limosi ricchi in "paglia marina" in decomposizione estratti da S2.



Dalla ricostruzione litostratigrafica effettuata si ritiene che lo spessore di questi depositi nel sottosuolo dello stadio possa variare tra i 3,00 m e i 7,00 m, dato sostanzialmente confermato dalle risultanze dei sondaggi effettuati a supporto del progetto definitivo.

### **B2 – Sabbie fini e medie limose con abbondante fibra vegetale marina decomposta**

Questa facies si rinviene in modo discontinuo e con spessori variabili da circa 0,80 m a circa 3,00 m, sino a mancare del tutto.

Trattasi di sabbie fini limose, quarzose, talvolta con intercalazioni di sabbie medie e grossolane, di colore grigiastro con presenza di accumuli  $\pm$  abbondanti di *Posidonia oceanica* in via di decomposizione, incoerenti. In S2 entro sono stati rinvenuti frammenti di laterizi, probabilmente inglobati dal sedimento molle all'atto dello sversamento dei terreni utilizzati per la bonifica.

### **B3 - Sabbie e ghiaie $\pm$ cementate da carbonato di calcio**

Questa sub-unità, costituente in modo regolare la base dello **Strato B**, è formata da sedimenti sabbiosi, da fini a grossolani, talora con discreta componente limosa talaltro associati a scheletro clastico ghiaioso-ciottoloso di composizione carbonatica più o meno elaborato dal moto ondoso. In alcuni sondaggi, associato alla parte basale di questo deposito, è presente un sedimento clastico grossolano prevalentemente calcareo (litofacies "*Tramezzario*" e/o "*Pietra Forte*"), ad elementi spigolosi, di dimensioni anche pluricentriche in matrice sabbioso-carbonatica che denota un'alimentazione detritica prossima alla linea di costa (falesia impostata su calcari miocenici).



**FOTO 3.4** – Cassetta catalogatrice del sondaggio S6\_PZ ove è stato riscontrato lo spessore massimo dello Strato B3. Nello specifico le carote riguardano l'intervallo di **profondità 10,00÷15,00 m**. Gli aspetti più distintivi rispetto agli strati B1 e B2 riguardano l'assenza di fibra di *Posidonia oceanica* e la presenza di livelli semincementati da carbonato di calcio.

Quasi dappertutto tali sedimenti mostrano un ricco contenuto bioclastico a ostreidi e altri molluschi di ambiente ad media energia con talora dei livelli semicementati da carbonato di calcio.

Non mancano anche elementi di rocce paleozoiche, provenienti da paleo corsi d'acqua con bacino drenante esteso ai rilievi metamorfici del Sarrabus.

Sono del tutto assenti i residui vegetali rinvenuti nelle sovrastanti facies **B1 e B2**, ad indicare un moto delle correnti sostanzialmente differente, non adatto alla deposizione lungo costa della *Posidonia oceanica* morta oppure la mancanza di condizioni favorevoli alla crescita della prateria sommersa.

Dalla ricostruzione litostratigrafica si è constatato che lo spessore di questi depositi nel sottosuolo dello stadio varia tra i circa 3,00 m del sondaggio S4\_DH ai circa 7,50 m in S6\_PZ.

### **C - Depositi argillo-limosi e sabbiosi di ambiente fluvio-deltizio**

Questo deposito, riconducibile all'unità **PVM2a** della cartografia ufficiale, consta di argille, argille limose e limi argillosi con subordinata presenza sabbiosa, molto consistenti, di colore variabile da brunastro-nocciola a grigio-verdastro con plaghe di ossidazione arancio e nerastre nonché screziature di colore biancastro per presenza di carbonati, disposte in corpi deposizionali lentiformi intercalati o interdigitati con i depositi clastici dell'**Unità D** alla loro base.

Spesso è stata osservata la presenza di noduli carbonatici, friabili, di dimensioni subcentimetriche e distribuiti in modo irregolare nel sedimento. Talora è presente anche uno scheletro clastico formato da litici calcarei e in subordine silicoclastici di dimensioni variabili tra qualche millimetro e il centimetro immersi nella matrice argillosa o limo-argillosa.



**FOTO 3.5** – Casseta n. 5 del sondaggio S6\_PZ che mostra il passaggio, a partire da quota -24,40 da p.c., tra la facies prevalentemente argillosa dello Strato C con quella contenente una progressiva componente sabbiosa.



Sono stati rilevati organismi fossili se non in deboli tracce di probabili apparati radicali totalmente decomposti o di bioturbazioni.

Questo deposito, piuttosto omogeneo granulometricamente e composizionalmente, è stato intercettato in tutti i pregressi sondaggi nel lato mare rispetto allo stadio, utilizzati come riferimento per il presente studio, una volta superati i circa 12,00÷-15,00 m di profondità dal p.c..

Anche nei 4 sondaggi effettuati in detta sede è stato costantemente intercettato con spessori variabili tra i circa 3,00 m del sondaggio S4\_DH ai circa 18,00 m di S6\_PZ. Risultando interdigitato con i depositi clastici dell'**Unità D**, costituisce una facies deposizionale controllata prevalentemente dalla dinamica fluvio-deltizia precedente all'ingressione marina olocenica, che localmente ha consentito l'instaurarsi di ambienti a bassa energia (stagni costieri) favorevoli alla decantazione dei fini. La facies più diffusa è rappresentata dallo **Strato C1** argillo-limoso con intercalazioni sabbiose, mentre lo **Strato C2**, perlopiù sabbioso con matrice argillosa ferrettizzata è limitato a circa 1 m in S6\_PZ.

L'elevata percentuale di argilla del sedimento rende difficoltosa la trasmissione di flussi idrici al suo interno tanto da rappresentare un limite di tamponamento inferiore alla falda freatica che interessa diffusamente l'**Unità B** sovrastante e, allo stesso tempo, isolare, perlomeno localmente, l'acquifero talora contenuto nella coeva **Unità D**.

#### **D - Depositi detritici sabbiosi e conglomeratici fluvio-deltizi**

Questo deposito, intercettato in particolare nei sondaggi realizzati nel lato mare rispetto al sedime di intervento e spinti oltre i 25 m di profondità dal p.c. (sondaggi S6\_PZ e S3\_DH), costituisce l'evento sedimentario quaternario più antico direttamente verificato nel sottosuolo dello stadio.



**FOTO 3.6** – Casseta catalogatrice del sondaggio S3\_DH che mostra la parte terminale della perforazione (intervallo 30,00÷35,00 m) essenzialmente entro lo Strato D. La litofacies D2, costituita dalla breccia calcarea, è stata rinvenuta tra -27,7÷-29,50 m e -31,00÷33,30 m.



Rappresenta il risultato di una deposizione in ambiente probabilmente di piana alluvionale costiera con presenza di rilievi carbonatici in arretramento capaci di alimentare una deposizione fluvio-deltizia molto più ampia che nel tempo evolve poi alle litofacies prevalentemente argillose dello **Strato C** sovrastante, riferibili ad un generico Pleistocene, ma probabilmente più antico dell'ultima glaciazione.

Si tratta di sedimenti quasi essenzialmente silicocastici, privi di resti conchigliari, costituiti da prevalenti sabbie, talora limose, a volte ghiaiose, con contenuto in argilla che aumenta gradualmente verso l'alto stratigrafico man mano che si predispongono le condizioni paleogeografiche favorevoli all'instaurarsi di condizioni più prossime alla linea di costa [**Strato D1**].

Nel sondaggio S3\_DH, a partire da circa -27,00 m sono stati rinvenuti intercalari di 2,00÷3,00 m di breccie monogeniche a elementi di calcare miocenico in facies "Tramezzario" e "Pietra Forte", immerse in matrice limo argillosa di colore biancastro-avana [**Strato D2**].

Il grado di addensamento è in genere elevato sebbene nelle frazioni povere in limo e argilla sia presente una elevata porosità sede di una falda idrica in pressione.

Poiché questa unità è stata rinvenuta sino a -40 m dal p.c. (zona prossima all'attuale lungomare di Sant'Elia) si ritiene che lo spessore di questi depositi nel sottosuolo dello stadio possa essere valutato in non meno di 15,00 m.

#### **E - Basamento roccioso carbonatico**

Questo strato costituisce il locale basamento litificato, non affiorante nel sedime di intervento ma direttamente osservabile nella parte mediana e sommitale dei rilievi collinari che contornano il sito.

Si tratta in prevalenza delle litofacies note come "Tramezzario", "Pietra Forte" e "Pietra Cantone" della *Formazione dei Calcari di Cagliari* [CGI], formate rispettivamente da biocalcareni, calcari bioclastici di colore biancastro, spesso friabili e farinosi, interessati da fenomeni di decalcificazione anche importanti in prossimità della loro parte superficiale a diretto contatto con gli agenti atmosferici, con intercalati calcari massivi, di scogliera, di colore biancastro, nonché da calcari marnosi giallastri. Il rinvenimento di questa unità in diversi settori al contorno del sedime di intervento a profondità variabili tra qualche metro e più di 40,00 m rispetto al p.c. è da mettere in relazione sia con il complesso assetto tettonico del settore che ha dislocato la successione miocenica sia con l'intensa erosione subita nel corso del Pleistocene che ha favorito la formazione di un'irregolare morfologia attualmente sotto copertura detritica.

Gli affioramenti più prossimi al sito di interesse sono quelli del colle di *Monte Mixi* (quasi completamente asportati attraverso attività estrattiva pregressa) e quelli rinvenibili alla base del colle di *Sant'Elia*. Nel sito specifico la roccia carbonatica del tardo miocene è stata rinvenuta solo nel sondaggio S4\_DH (lato NW dello stadio) a partire da circa 15 m di profondità a conferma della complessa distribuzione nel sottosuolo del basamento roccioso locale. Infatti, come anticipato nei paragrafi precedenti, dalle informazioni ricavate nel corso dell'analisi della documentazione geognostica in possesso dello scrivente, la presenza di questo substrato è stata verificata lungo la sponda in destra idraulica del Canale di San Bartolomeo a profondità variabili tra 1,80 m e 5,20 m dal p.c. al di sotto dei sedimenti limo-sabbiosi olocenici [**Unità B1**] e dei terreni di riporto [**Unità A**].

É altresì verosimile ipotizzare che, a causa della complessa strutturazione tettonica del tratto costiero in esame, allo stato attuale non ben conosciuta, il basamento locale possa essere rappresentato, sebbene localmente, anche dai terreni sabbioso arenacei della *Formazione delle Arenarie di Pirri* in quanto queste ultime si rinvencono diffusamente, anche in affioramento, in tutto il settore a est dello stadio, dall'istituto di Zoologia e Anatomia sino al Quartiere del Sole e alle pendici del colle di San Bartolomeo.

Alla luce dei riscontri pervenuti dagli altri sondaggi nonché da informazioni sull'assetto geologico al contorno del sito, si ritiene in ogni caso che, ad esclusione dell'intorno del sondaggio S4\_DH (settore N e NW dello stadio), in corrispondenza del sito che ospiterà lo stadio il basamento lapideo, carbonatico o sabbioso-arenaceo, possa essere rinvenuto a profondità >35 m dal p.c..



**FOTO 3.8** – Carote del sondaggio S4\_DH nell'intervallo di profondità 25,00÷30,00 m, che mostrano la litofacies “Tramezzario” con i giunti ossidati variamente orientati. L'ultimo metro (da –29,00 m) rappresenta un calcare marnoso molto simile alla litofacies “Pietra Cantone”.



**FOTO 3.7** – Spezzone di roccia “Tramezzario” con giunti obliqui estratto dal sondaggio S4\_DH.



### 3.7. Assetto idrogeologico

Come emerso dalla ricostruzione geologico-stratigrafica, nell'ambito in studio, entro i primi 30÷40 m di profondità dal p.c. sono presenti esclusivamente terreni di origine sedimentaria, prevalentemente sabbiosi e sabbioso ciottoloso-ghiaiosi interessati nei primi 8÷9 m dal p.c. da presenza di resti fibrosi di *Posidonia oceanica* con variabile frazione limosa e/o argillosa. A profondità di 12÷15 m si passa a depositi per lo più argillo-limosi con intercalazioni di spessore plurimetrico di sabbie ± limose, contenenti un sistema idrico multifalda che, per la posizione prossima alla linea di costa, interagisce, perlomeno nella sua parte freatica, direttamente con il mare. Per l'approvvigionamento di acque dolci è significativo il contributo dell'infiltrazione dei deflussi provenienti dai versanti collinari al contorno o dalle aree urbane non ancora impermeabilizzate artificialmente nonché dal sistema idraulico del Molentargius.

Dalle misurazioni effettuate nel corso delle indagini geognostiche (sia quelle effettuate al contorno sia quelle ubicate nel sottosuolo dello stadio), è stato accertato che la circolazione idrica sotterranea, a carattere variabile tra il freatico e il confinato, si rinviene con maggiore continuità entro i primi 15,00 m di profondità [Unità B1, B2 e B3] e buona/elevata trasmissività. A maggiore profondità, la prevalenza dei depositi argillo-limosi determina l'alternanza di spessori saturi e a moderata trasmissività con altri a diversi gradi di umidità ma privi di flusso idrico libero.

In ogni caso per gli obiettivi del presente lavoro, il livello statico della falda freatica è grossomodo coincidente con l'attuale l.m.m. (da -1 m a -2 m rispetto all'attuale p.c.), ovvero più o meno pari con la quota dell'interfaccia terreni di riporto / sedimento naturale, tenendo conto del fatto che le quote assolute dell'area di stretta pertinenza dello stadio Sant'Elia (ad esempio il campo sportivo) si attestano attorno ai 2,30 m e che la pavimentazione dei parcheggi ubicati nell'immediato contorno della struttura variano tra circa 1,20 m e 1,50 m.

A causa della locale marcata componente limo-argillosa dei terreni di riporto, per effetto della capillarità o per effetto del moto ondoso in caso di mareggiata, tale limite può talora risultare anche a quote più superficiali dell'ordine dei 0,60÷0,80 m dal p.c. piazzale.



FOTO 3.9 e 3.10 – Flusso idrico proveniente dalla coltre di riporto imbibita (indagini presso Arena Spettacoli).

Si ritiene importante segnalare una falda idrica in pressione, estremamente produttiva nell'ambito della compagna calcarea, intercettata nel sondaggio S4 DH, che non ha consentito per via dei forti flussi ed il dilavamento continuo della boiaccia cementizia inserita (oltre il doppio di quella prevista prima di desistere) la strumentazione del foro per il Down-hole.

Poiché le indagini pregresse utilizzate come riferimento per il presente studio sono state effettuate in condizioni meteorologiche molto differenti tra loro (inverno-primavera ed estate) è stato possibile verificare quanto segue.

Durante (o successivamente) periodi piovosi tali da determinare condizioni di forte saturazione del sottosuolo costituito dai terreni di riporto nonché diffusi fenomeni di ristagno superficiale, i flussi idrici sotterranei entro i primi 2,00 m dal p.c. sono per lo più riconducibili al drenaggio delle acque di imbibizione della coltre detritica, visibili al contatto con il sottofondo naturale limo-sabbioso-argilloso e subordinatamente all'interno di quest'ultimo.

In funzione della granulometria prevalente, i flussi idrici risultano più o meno veloci (talora il flusso libero è assente) a seconda della porosità e delle caratteristiche di trasmissività delle terre.

Nel corso della indagine con l'escavatore, in funzione anche della quota assoluta della verticale d'indagine, è stata osservata una discreta variazione nella profondità di rinvenimento della falda freatica con minimi attorno 0,80 m dal p.c. e massimi di profondità di -3,00 m dal p.c.

Nel corso della stagione estiva la circolazione idrica sotterranea entro il primo metro è praticamente assente e risulta influenzata esclusivamente dal modesto accumulo idrico d'acqua dolce che si sovrappone ai flussi di infiltrazione proveniente dal mare adiacente.

Il livello medio di stabilizzazione della falda idrica misurato entro i fori di sondaggio in questa sede è risultato, in media, a -1,50 m dal p.c..

Stante la posizione prossimale del sito alla costa, sono da ammettere fluttuazioni della falda di scala metrica, connesse alle oscillazioni della marea.

A partire da una profondità di circa 12,00÷15,00 dal p.c. e sino a circa 40,00 m, è altresì presente un corpo sedimentario piuttosto continuo **[Unità C+D]** avente le caratteristiche granulometriche e di porosità tali da consentire la presenza di una circolazione idrica a carattere confinato e/o semiconfinato. Infatti le intercalazioni argillose di spessore anche metrico **[Unità C]** all'interno del complesso detritico di ambiente fluvio-deltizio **[Unità D]** a porosità variabile in funzione della distribuzione della componente argillosa determinano la formazione di un sistema acquifero multifalda, con locali caratteristiche di salienza.

Tale proprietà della circolazione idrica, da quantificare in modo esaustivo nel corso della fase progettuale definitiva, può determinare infatti problemi di sifonamento nel corso di perforazioni e conseguente possibile franamento delle pareti del foro.



## 4. PERICOLOSITÀ GEOLOGICA

### 4.1. Pericolosità sismica

La bassa sismicità dell'isola fa escludere elementi di pericolosità sismica che possano compromettere l'integrità e la fruibilità dell'opera in progetto.

### 4.2. Pericolosità da inondazione

Nell'ambito del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.), l'areale di intervento appartiene al *Bacino Idrografico del Flumini Mannu (N. 04)*, *Sub-bacino Flumendosa-Campidano-Cixerri (N. 07)*: le cartografie (<http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegnamappe/?map=pai>) consultabili nel sito ufficiale della R.A.S., per il sito specifico non indicano alcuna criticità.

Le stesse indicazioni provengono dal Piano Stralcio delle Fasce Fluviali.

### 4.3. Pericolosità da frana

Già in condizioni di seminaturalità dei luoghi, il settore in studio è risultato esente da problematiche legate a dissesto per franosità in quanto non sottoposto all'influenza diretta delle dinamiche morfogenetiche connesse con la presenza dei rilievi al contorno perché troppo distanti. Dalla consultazione della relativa cartografia P.A.I., per l'areale in studio ed un suo congruo intorno, non sono indicate condizioni di pericolosità da frana.

Questa constatazione è altresì suffragata dall'esito dei rilievi all'uopo condotti che non hanno fatto ravvisare condizioni di criticità ante e post-operam.

### 4.4. Pericolosità idrogeologica

L'assetto idrogeologico del settore è caratterizzato dalla presenza, sotto la coltre di riporto, di una sequenza sabbiosa di spessore da plurimetrico a subdecametrico che ospita flussi idrici sotterranei in diretto equilibrio con il livello marino e pertanto attestata mediamente alla profondità di 0,80 m, in relazione con la quota assoluta del p.c..

Va da sé che, qualsivoglia fondazione superficiale, anche nell'ipotesi di un minimo incasso (ad esempio minore di 0,50 m), durante la stagione piovosa interferirà con la falda freatica. Per tale motivo si saranno da prevedersi interazioni reciproche di entità proporzionale alle dimensioni delle fondazioni.










## 5. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SOTTOSUOLO

### 5.1. Successione litostratigrafica locale

La campagna di indagini e prove geologiche, geotecniche e geofisiche hanno consentito, direttamente o indirettamente, di estrapolare nel dettaglio le caratteristiche del sedime di intervento, compresi i parametri fisico-meccanici dei terreni necessarie ai fini progettuali. I risultati sono di seguito riepilogati in funzione dello strato testato.

Nello specifico, i dati estrapolati dai nuovi sondaggi di nuova realizzazione hanno confermato la sequenza litostratigrafica proposta in fase di analisi preliminare ricostruita, quest'ultima, sulla base dei dati acquisiti di indagini pregresse precedentemente richiamate e di caratterizzare più specificatamente alcune litofacies mediante l'individuazione di sottounità stratigrafiche.

Il modello geologico adottato è il seguente:

<b>A1]</b>	Superfici artificiali	[Attuale]	
<b>A2]</b>	Terre di riporto	[Attuale]	
<b>B1]</b>	Sabbia fetida poco addensata	[Olocene]	
<b>B2]</b>	Limo fetido con fibra di Posidonia	[Olocene]	
<b>B3]</b>	Sabbia con cemento carbonatico	[Olocene]	
<b>C]</b>	Argilla ± limosa consistente	[Pleistocene ?]	
<b>D]</b>	Sabbie addensate e brecce calcaree	[Pleistocene ?]	
<b>E1]</b>	Calcare organogeno/detritico	[Miocene superiore]	
<b>E2]</b>	Calcare marnoso	[Miocene superiore]	

Nell'immagine satellitare in **FIGURA 5.1** è rappresentata l'area vasta con l'ubicazione delle località che nel proseguo verranno richiamate.



**FIGURA 5.1** – Immagine satellitare con individuazione dell'area di intervento e dei siti di interesse al contorno.



La peculiarità più significativa della modellizzazione riguarda il rinvenimento del substrato roccioso carbonatico esclusivamente nel settore N e NW del sedime di intervento nelle verticali **S4\_DH**, **CPTU\_4**, **CPTU\_6** e **CPTU\_7**, ad una profondità compresa tra circa -9,00 m in **CPTU\_4** e circa 16,00 m in **CPTU\_6**. Questa constatazione è stata suffragata dalle prospezioni geofisiche e più precisamente dallo stendimento geoelettrico **GEO\_7** e quelli di sismica a rifrazione **ST\_10** e **ST\_11**.

L'ubicazione del dominio carbonatico, le caratteristiche della compagine litoide osservate attraverso il sondaggio **S4\_DH** (*F.ne dei Calcarei di Cagliari*) e la quota di soggiacenza del substrato, consentono una correlazione con quanto riscontrato nel settore del Canale di San Bartolomeo/Capannone Nervi, ovvero con la plausibile presenza di una paleodorsale rocciosa orientata NNW-SSE che troverebbe nel piccolo colle di Monte Mixi la sua naturale prosecuzione verso l'entroterra.

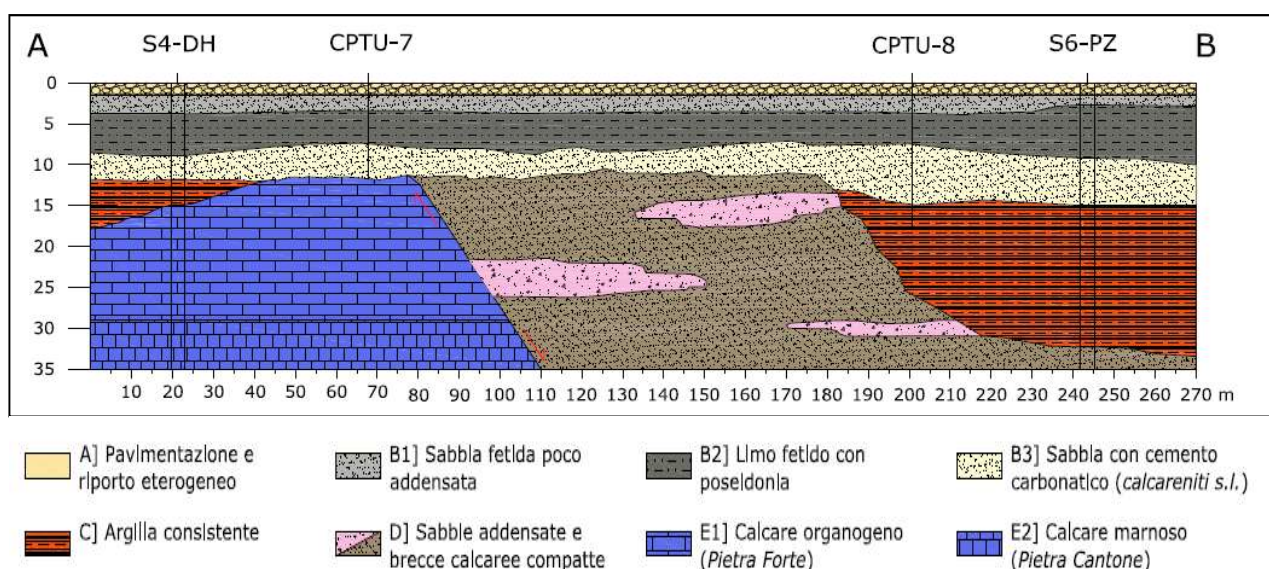
L'origine tettonica di tale conformazione è palese se si tiene conto delle quote in affioramento delle stesse rocce nel vicino colle di Sant'Elia, della soggiacenza dei depositi del Miocene medio rappresentati dalla *F.ne delle Arenarie di Pirri* nel settore a nord dello stadio (Ponte Vittorio, Quartieri La Palma e del Sole), della strutturazione del promontorio di Sant'Elia e del rinvenimento delle litofacies calcaree verso costa (come nel Capannone Nervi) a profondità considerevoli (anche > 40 m) per possibili faglie NW-SE e N-S che hanno condizionato anche l'orientazione dell'antica linea di costa a falesia, ad oggi non più osservabile nel tratto dello stadio di Sant'Elia in quanto ricoperta dall'insieme di depositi quaternari, compresi i depositi di riporto del dopo guerra ed attuali.

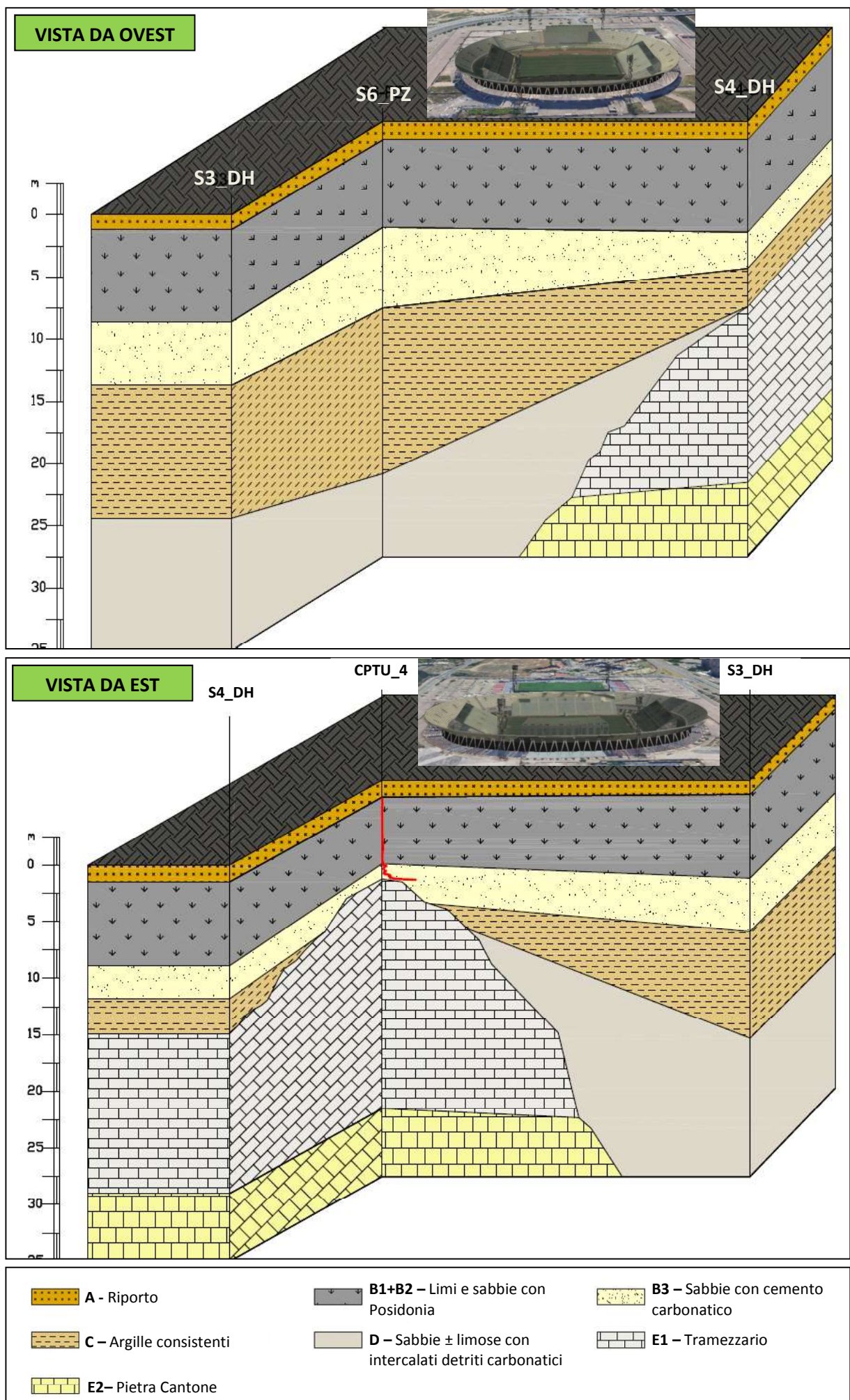
È pertanto verosimile che tra la zona stadio e il vicino rilievo di Sant'Ignazio-Sant'Elia sia presente una paleomorfologia strutturata nel corso della tettonica recente plio-quaternaria con formazione di una profonda conca colmatasi nel Pleistocene con i depositi detritici di genesi alluvio-colluviale e forse anche gravitativa descritti nelle Unità C e D (ragionevolmente correlabili con il Subsistema di Portoscuso **PVM2** o con depositi più antichi), a loro volta ricoperti dai sedimenti marino-litorali olocenici post würmiani. Tale ricostruzione giustificerebbe la mancata intercettazione del basamento roccioso carbonatico negli altri settori del sedime indagati attraverso i sondaggi **S2**, **S3\_DH** e **S6\_PZ**.

Il modello litostratigrafico scaturito dalle correlazioni sono graficamente rappresentate nella sezione geologica in **FIGURA 5.2**, nei due blocco-diagrammi in

**FIGURA 5.3** e nella **TAVOLA III** fuori fascicolo.

Per le stratigrafie di dettaglio si rimanda alle appendici contenute nell'**ELABORATO 2/4**.





**FIGURA 5.3** – Blocco diagrammi interpretativi del modello litostratigrafico del sottosuolo del nuovo Stadio Sant’Elia.



## 5.2. Prove penetrometriche SPT in foro di sondaggio

I risultati delle prove penetrometriche sono richiamati in **TABELLA 5.1**, da dove si evincono valori di  $N_{30}$  compresi tra 11 colpi fino “a rifiuto” per i quali, in ragione della natura coesiva o attritiva del strato testato, si è ricavato il grado di consistenza o addensamento, come indicato nella medesima tabella.

Escludendo i dati non rappresentativi, l'andamento dei valori di  $N_{30}$  sono rappresentati nel grafico di **FIGURA 5.4** che riporta in ascisse il numero dei colpi ( $N_{30}$ ) ed in ordinata la quota assoluta in metri.

SONDAGGIO	PROFONDITÀ (m) DA P.C.	LETTURE SPT (colpi / 15 cm)	$N_{30}$	STRATO LITOTECNICO	GRADO DI CONSISTENZA / ADDENSAMENTO
S2	9,20 ÷ 9,65	10 – 7 – 9	16	<b>B3</b> Sabbie con cemento carbonatico	Addensate
	11,40 ÷ 11,85	5 – 13 – 13	26	<b>B3</b> Sabbie con cemento carbonatico	Addensate
	13,45 ÷ 13,90	9 – 11 – 13	24	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	18,00 ÷ 18,45	12 – 17 – 26	43	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
S3_DH	2,68 ÷ 3,11	1/43 cm		<b>B2</b> Fanghi a posidonia	
	4,35 ÷ 5,27	1/92 cm		<b>B2</b> Fanghi a posidonia	
	7,30 ÷ 8,23	1/93 cm		<b>B2</b> Fanghi a posidonia	
	9,55 ÷ 10,00	15 – 10 – 12	22	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	12,00 ÷ 12,45	4 – 11 – 19	30	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	15,00 ÷ 15,45	12 – 12 – 14	26	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	17,50 ÷ 17,95	30 – 33 – 40	73	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	19,65 ÷ 20,10	10 – 15 – 17	32	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	23,63 ÷ 24,06	10 – 22 – 50/13 cm	Rifiuto	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	26,37 ÷ 26,44	50/7 cm	Rifiuto	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	29,25 ÷ 29,70	12 – 17 – 26	43	<b>D</b> Sabbie	Addensato
	35,75 ÷ 34,02	25 – 50/12 cm	Rifiuto	<b>D</b> Sabbie	Addensato
S4_DH	3,00 ÷ 3,45	2 – 2 – 2	4	<b>B2</b> Limo con posidonia	Soffice
	4,25 ÷ 4,70	1 – 1 – 1	2	<b>B2</b> Limo con posidonia	Soffice
	5,80 ÷ 6,25	1 – 1 – 1	2	<b>B2</b> Limo con posidonia	Soffice
	9,65 ÷ 10,05	9 – 14 – 16	30	<b>B3</b> Sabbie con cemento carbonatico	Addensate
	12,00 ÷ 12,45	7 – 3 – 5	8	<b>C</b> Argilla	Plastico
	14,50 ÷ 14,95	6 – 9 – 13	22	<b>C</b> Argilla	Consistente
S6_PZ	1,70 ÷ 2,15	3 – 1 – 1	2	<b>B2</b> Limo con posidonia	
	5,20 ÷ 6,30	1/110 cm		<b>B2</b> Limo con posidonia	
	7,50 ÷ 8,30	1/80 cm		<b>B2</b> Limo con posidonia	
	8,50 ÷ 8,95	6 – 14 – 16	30	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	12,00 ÷ 12,45	11 – 15 – 15	30	<b>D</b> Sabbie con cemento carbonatico	Addensato
	13,65 ÷ 14,10	9 – 20 – 12	32	<b>D</b> Sabbie con cemento carbonatico	Molto addensato
	16,85 ÷ 17,30	6 – 9 – 11	20	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	19,40 ÷ 19,85	15 – 18 – 19	37	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	22,35 ÷ 22,80	17 – 18 – 20	38	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	25,60 ÷ 26,05	20 – 31 – 32	63	<b>C</b> Argilla	Molto consistente
	29,40 ÷ 29,85	18 – 32 – 44	76	<b>D</b> Breccia calcarea	Molto consistente
	34,40 ÷ 34,65	32 – 50/10 cm	Rifiuto	<b>D</b> Sabbie	Molto addensato

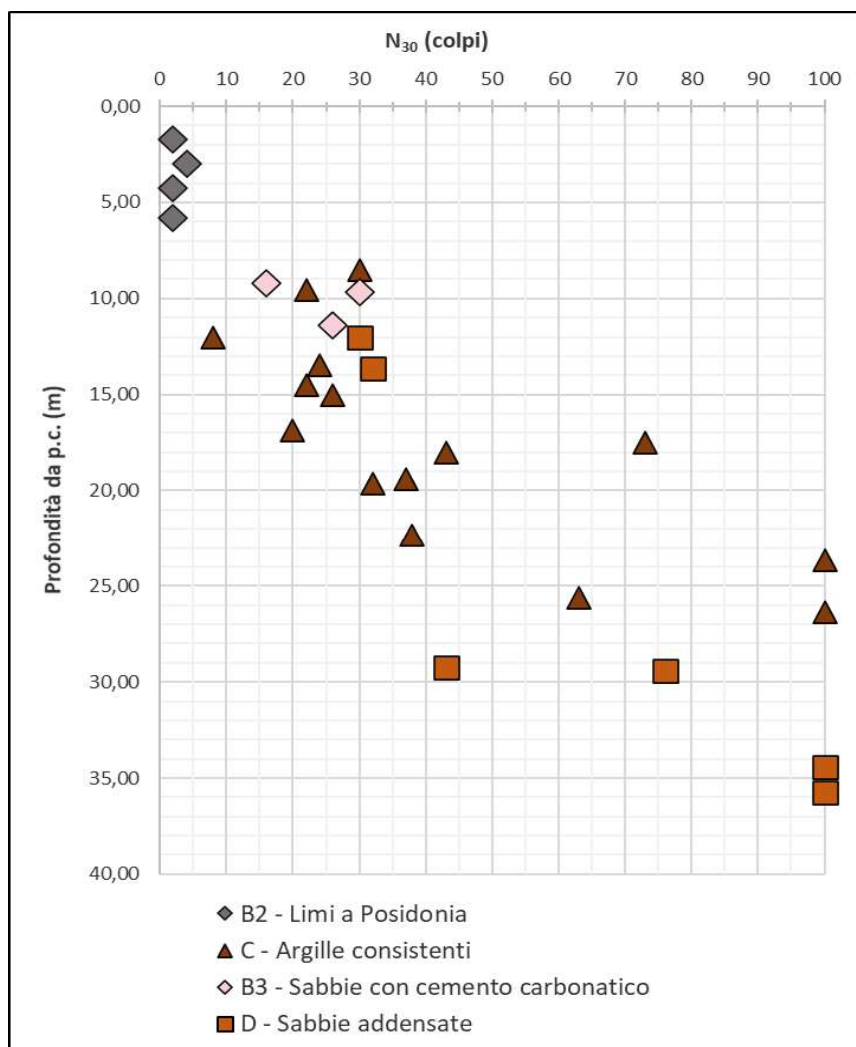
**TABELLA 5.1** – Riepilogo dei risultati delle prove penetrometriche SPT in relazione allo strato testato.

Dall'andamento della risposta penetrometrica espressa in valori  $N_{30}$  con la profondità si osserva un netto trend crescente a partire da circa 7÷8 m di profondità, una volta superati i terreni di riporto [Strato A] ed i depositi fangosi, sabbio-limosi e/o limo-sabbiosi ricchi in fibra vegetale di Posidonia oceanica [Strati B1 e B2]. Per questi ultimi, a parte qualche anomali, i riscontri sono quelli di terre molto soffici o molto sciolte ( $N_{30}=1\div4$ ).

Pertanto, a prescindere dallo **Strato A**, troppo eterogeneo per poter essere caratterizzato in modo univoco e lo **Strato B1+B2**, saturo e eccessivamente condizionato dalla presenza di materiale organico in via di decomposizione, già con le sabbie grigiastre oloceniche, bioclastiche e talora semicementate da carbonato di calcio individuate come **Strato B3** a partire da -8÷9 m dal p.c., le resistenze alla penetrazione presentano valori elevati seppure molto dispersi ( $N_{30}= 16\div30$ ) ed indicativi di terreni granulari da mediamente addensati ad addensati.

I depositi dello **Strato C**, intercettati a partire dalla profondità di 12÷15 m dal p.c., perlopiù argillo-limosi [Strato C1] e con intercalazioni di sabbie più o meno limose [Strato C2], presentano invece un chiaro comportamento coesivo e valori di  $N_{30} > 20$  con picchi ben superiori a 50 colpi (sondaggio S3\_DH con  $N_{30} = 73$ ) indicativi di terreni da "molto dure" a "durissime" in profondità, sino al raggiungimento di condizioni di rifiuto strumentale.

Valori ugualmente molto elevati sono stati raggiunti nelle intercalazioni sabbiose [Strato C2], associabili a terre incoerenti "molto dense".



**FIGURA 5.4**  
Distribuzione dei valori SPT al variare della profondità.



Si attenziona sul valore  $N_{30} = 8$  riscontrato nel sondaggio S4\_DH che rappresenta una chiara anomalia giustificata probabilmente dalla prossimità del test con l'interfaccia tra lo **Strato C1** ed il sovrastante **Strato B2**, quest'ultimo sede di una abbondante falda idrica che può avere fortemente alterato la resistenza meccanica del sedimento argilloso.

Lo **Strato D**, rinvenuto solo nei sondaggi S3\_DH e S6\_PZ rispettivamente alle profondità di 24,40 m e 32,70 m dal p.c. e costituito da deposti grossolani [breccia calcarea – **Strato D2**, intercalati da prevalenti sabbie grossolane molto addensate – **Strato D1**], costituisce un ulteriore deposito con elevate caratteristiche litotecniche evidenziate da valori di  $N_{30} > 43$  sino al rifiuto.

Solo nel sondaggio S4\_DH, a profondità di circa 15 m dal p.c. e al di sotto di circa 3,00 m di depositi dello Strato C1, sono stati intercettate le rocce calcaree del basamento locale [**Strato E**] nel caso rappresentato dalla *F.ne dei Calcari di Cagliari* in facies "Pietra Forte" [**Strato E1**] e "Pietra Cantone" [**Strato E2**], esclusa da questa tipologia di test.

### 5.3. Prove penetrometriche statiche continue con piezocono CPTU

#### 5.3.1. Resistenza alla punta, resistenza laterale e pressioni neutre

Le letture acquisite in campagna sono state restituite sotto forma di tre grafici, aventi in ordinata la profondità ed in ascissa rispettivamente la resistenza alla punta  $q_c$ , la resistenza laterale  $f_s$  ed infine l'andamento delle pressioni neutre  $U$ .

I logs mostrano nel complesso un andamento similare. Il primo metro, costituito da terre di riporto [**Strato A**], come prevedibile ha un comportamento molto variabile, restituendo valori di  $q_c = 0,6 \div 23,4$  daN/cm<sup>2</sup>,  $f_s = 0,06 \div 0,26$  daN/cm<sup>2</sup> e  $u = 0,13 \div 1,24$  daN/cm<sup>2</sup>.

STRATO	VALORI IN kPa	CPTU_1	CPTU_2	CPTU_3	CPTU_4	CPTU_5	CPTU_6	CPTU_7	CPTU8	Media
A	$q_c$	220,00	60	2.140,00	-	820,00	1.350,00	2.340	1.040,00	1.139,00
	$F_s$	6,40	9,67	19,42	-	16,19	18,21	26,84	21,05	16,83
	$U$	46,52	32,52	13,53	-	25,34	37,30	42,02	124,50	45,96
B1	$q_c$	600,00	510	370,00	360	180,00	1.300,00	420,00	230,00	496,30
	$f_s$	13,01	15,9	14,35	9,56	12,34	11,01	12,07	15,67	12,99
	$u$	101,60	103,3	26,68	78,48	60,09	60,29	45,07	111,90	73,43
B2	$q_c$	450,00	490	300,00	670	260,00	400,00	190,00	260,00	377,50
	$f_s$	9,04	11,94	12,35	9,49	8,87	10,34	8,60	11,60	10,28
	$u$	98,19	92,28	46,97	131,3	40,65	140,70	45,63	109,00	88,10
B3	$q_c$	6.070,00	8640	10.480,00	7.450,00	10.050,00	8.230,00	7.150,00	12.140,00	8.776,00
	$f_s$	45,62	39,18	47,10	28,42	35,09	47,20	64,50	55,90	45,38
	$u$	235,00	103,10	100,60	207,6	42,85	133,90	106,00	165,80	136,90
C	$q_c$	-	-	9.750,00	-	3.170,00	3.680,00	-	3.540,00	5.035,00
	$f_s$	-	-	176,10	-	81,47	90,64	-	80,11	107,10
	$u$	-	-	234,80	-	689,40	348,90	-	150,90	356,00
D	$q_c$	9.990,00	8.040,00	-	-	-	-	-	-	9.015,00
	$f_s$	107,10	158,10	-	-	-	-	-	-	132,60
	$u$	405,30	256,60	-	-	-	-	-	-	331,00

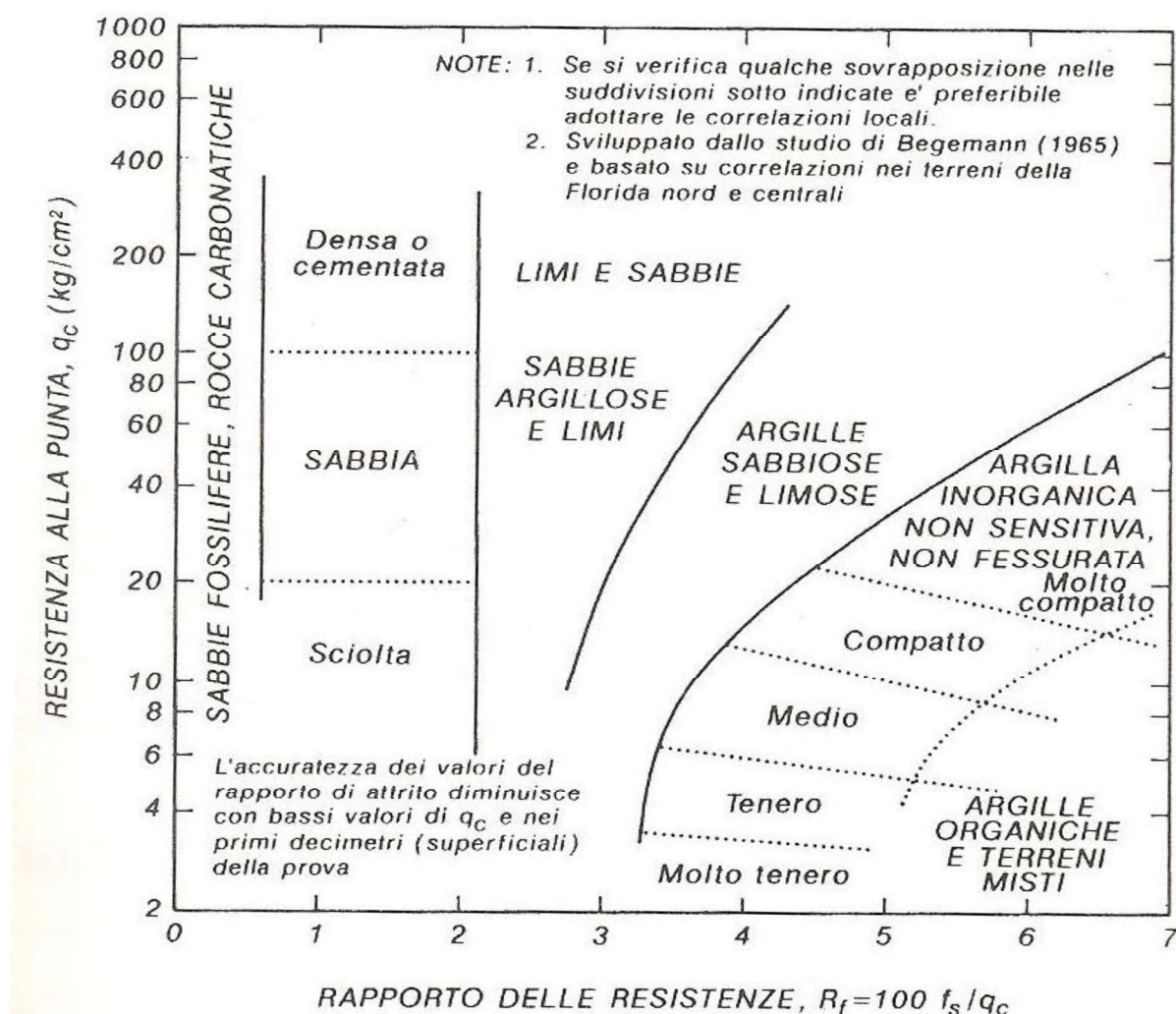
TABELLA 5.2 – Riepilogo dei risultati delle prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU).

I valori di resistenza alla punta registrati per il sottostante **Strato B** (Fanghi a posidonia), pur non discostandosi eccessivamente tra loro, sono accorpabili in due gruppi, afferenti rispettivamente allo **Strato B1** e allo **Strato B2**. Alle terre sabbioso-limose dello **Strato B1** sono associabili  $q_c = 1,8 \div 13 \text{ daN/cm}^2$ ,  $f_s = 0,09 \div 0,16 \text{ daN/cm}^2$  e  $u = 0,27 \div 1,12 \text{ daN/cm}^2$ . Sono attribuiti allo **Strato B2** limo-sabbioso e/o argilloso valori  $q_c = 1,9 \div 6,7 \text{ daN/cm}^2$ ,  $f_s = 0,08 \div 0,12 \text{ daN/cm}^2$  ed un incremento delle pressioni neutre  $u = 0,4 \div 1,40 \text{ daN/cm}^2$ .

Lo **Strato B3** mostra una maggiore resistenza all'attraversamento della punta, per effetto del più elevato grado di addensamento rispetto ai precedenti, con valori di  $q_c = 60,7 \div 121,40 \text{ daN/cm}^2$ ,  $f_s = 0,28 \div 0,64 \text{ daN/cm}^2$  e  $u = 0,43 \div 2,35 \text{ daN/cm}^2$ .

I sottostanti **Strati C** e **D** (argille) presentano dei valori abbastanza simili in ordine alla resistenza all'attrito laterale espressa da  $f_s = 0,80 \div 1,76 \text{ daN/cm}^2$  e delle pressioni neutre  $u = 1,50 \div 6,90 \text{ daN/cm}^2$ , ma si discostano tra loro per la resistenza alla punta: nel caso dello **Strato D** è  $q_c = 80 \div 100 \text{ daN/cm}^2$ , mediamente il doppio rispetto allo **Strato C**.

Riferendosi alla Carta di Classificazione dei terreni (Schmertmann, 1969) che correla la resistenza alla punta  $q_c$  in  $\text{daN/cm}^2$  (in ascisse scala logaritmica) ed il rapporto tra le resistenze  $R_f$  ottenuto da  $q_c/f_s$  (in ordinate, scala normale), dai valori ricavati dalle prove CPTU è possibile associare a ciascuno strato il corrispettivo tipo litologico (**FIGURA 5.5**).



**FIGURA 5.5** – Carta per la valutazione della granulometria dei terreni attraverso le prove CPT.



Assunto:

⇒ <b>Strato A2</b>	$q_c = 11 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 0,15 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 1,4$
⇒ <b>Strato B1</b>	$q_c = 45 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 0,13 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 0,3$
⇒ <b>Strato B2</b>	$q_c = 35 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 0,1 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 0,3$
⇒ <b>Strato B3</b>	$q_c = 85 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 0,45 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 0,5$
⇒ <b>Strato C</b>	$q_c = 50 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 1,1 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 2,2$
⇒ <b>Strato D</b>	$q_c = 90 \text{ daN/cm}^2$	$F_s = 1,3 \text{ daN/cm}^2$	$R_f = 1,44$

dal grafico in **FIGURA 5.5** si estrapolano le seguenti associazioni:

⇒ <b>Strato A2</b>	sabbie sciolte
⇒ <b>Strato B1+B2</b>	terre fossilifere, rocce carbonatiche
⇒ <b>Strato B3</b>	sabbie
⇒ <b>Strato C</b>	sabbie argillose e limi
⇒ <b>Strato D</b>	sabbie

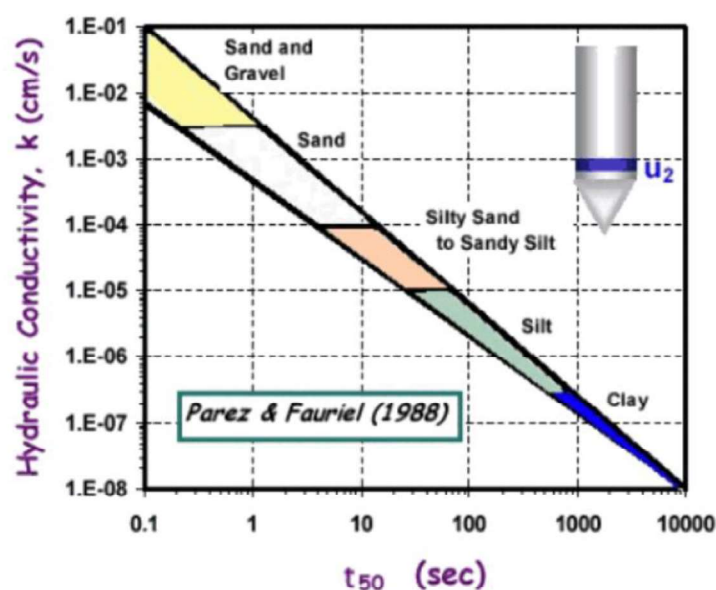
In alcuni casi in difformità con quanto rilevato attraverso i sondaggi e coerentemente con la rappresentazione formulata nella modellazione geologica locale.

### 5.3.2. Prove di dissipazione

In ciascuna delle verticali con gli identificativi CPTU\_1 e CPTU\_6 è stata condotta una “prova di dissipazione” per stimare la conducibilità idraulica ed il grado di consolidazione del terreno.

La dissipazione ha inizio con l’arresto dell’infissione e la registrazione nel tempo della pressione interstiziale ( $u$ ): dal valore iniziale ( $u_i$ ) inizia a decrescere al valore di equilibrio corrispondente alla pressione idrostatica ( $u_0$ ). Si indica con  $T_{50}$  (in secondo) il tempo corrispondente al 50% della dissipazione. In funzione del  $T_{50}$  è possibile determinare il coefficiente di consolidazione orizzontale ( $C_h$  in  $\text{cm}^2/\text{s}$ ) e la conducibilità idraulica ( $k$ ) secondo la formula  $C_h = 11,63/T_{50}$ .

Il valore della permeabilità (in  $\text{cm/s}$ ) si ricava attraverso il grafico di Parez e Fauriel (1988) richiamato nella **FIGURA 5.6**.



**FIGURA 5.6** – Correlazione tra il valore  $T_{50}$  (in secondi) e la permeabilità  $k$  (in  $\text{cm/sec}$ ).

Le dissipazioni delle pressioni neutre nello **Strato B2** hanno restituito un coefficiente di consolidazione compreso tra  $0,10 \div 0,21 \text{ cm}^2/\text{s}$  ed una conducibilità idraulica  $1,00\text{E}-07 \div 1,00\text{E}-08 \text{ m/s}$ , come specificato in **TABELLA 5.3**.

STRATO	QUOTA (m)	PROVA	$u_i$ (kPa)	$u_0$ (kPa)	$u_{50}$ (kPa)	$T_{50}$ (s)	$C_h$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$K$ (cm/s)
B2	7,04	CPTU_1	84,04	53,95	69,00	55	<b>0,21</b>	<b><math>10^{-5}</math></b>
B2	6,08	CPTU_6	111,18	79,08	95,13	111	<b>0,10</b>	<b><math>10^{-6}</math></b>

**TABELLA 5.3** – Risultato delle prove di dissipazione.

## 5.4. Prove geotecniche di laboratorio

Sono di seguito riepilogati valori delle principali grandezze fisiche e meccaniche, funzionalmente alla profondità del campione e dello strato testato.

### 5.4.1. Caratteristiche fisiche generali

Le determinazioni eseguite su n. 11 campioni hanno fornito i risultati di seguito illustrati.

#### **STRATO B2**

- Peso dei grani ( $\gamma_s$ )  **$24,16 \div 24,40 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico naturale ( $\gamma_n$ )  **$13,61 \div 14,43 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico secco ( $\gamma_{dry}$ )  **$6,72 \div 7,11 \text{ kN/m}^3$**
- Indice dei vuoti (e)  **$2,4 \div 2,6\%$**
- Grado di saturazione (Sr)  **$97 \div 106\%$**
- Grado di umidità ( $W_n$ )  **$102 \div 106\%$**

#### **STRATO B3**

- Peso dei grani ( $\gamma_s$ )  **$26,03 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico naturale ( $\gamma_n$ )  **$21,26 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico secco ( $\gamma_{dry}$ )  **$18,86 \text{ kN/m}^3$**
- Indice dei vuoti (e)  **$0,383\%$**
- Grado di saturazione (Sr)  **$88\%$**
- Grado di umidità ( $W_n$ )  **$12,7\%$**

#### **STRATO C**

- Peso dei grani ( $\gamma_s$ )  **$25,50 \div 26,50 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico naturale ( $\gamma_n$ )  **$17,50 \div 22,00 \text{ kN/m}^3$**
- Peso specifico secco ( $\gamma_{dry}$ )  **$14,00 \div 20,00 \text{ kN/m}^3$**
- Indice dei vuoti (e)  **$0,2 \div 2,0\%$**
- Grado di saturazione (Sr)  **$85 \div 105\%$**
- Grado di umidità ( $W_n$ )  **$10 \div 30\%$**



**STRATO D**

- Peso dei grani ( $\gamma_s$ ) **25,77 kN/m<sup>3</sup>**
- Peso specifico naturale ( $\gamma_n$ ) **20,48 kN/m<sup>3</sup>**
- Peso specifico secco ( $\gamma_{dry}$ ) **17,24 kN/m<sup>3</sup>**
- Indice dei vuoti (e) **0,498%**
- Grado di saturazione ( $S_r$ ) **99%**
- Grado di umidità ( $W_n$ ) **18,8%**

CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	PARAMETRI FISICI								STRATO
		$\gamma_n$	$\gamma_{dry}$	$\gamma'$	$\gamma_s$	$W_n$	$S_r$	e	n	
C1-S6_PZ	3,25÷3,85	13,61	6,72	6,72	24,27	102,60	97	2,618	0,724	B2
C1-S4_DH	3,80÷4,25	14,43	7,11	7,11	24,16	103,00	106	2,404	0,706	
C1-S3_DH	4,00÷4,35	13,93	6,72	6,72	24,40	107,60	102	2,640	0,725	B3
C2-S4_DH	9,00÷9,60	21,26	18,86	18,86	26,03	12,70	88	0,383	0,277	
C1-S2	12,85÷13,45	17,81	14,01	14,01	25,78	27,20	85	0,844	0,458	C
C3-S4_DH	13,90÷14,50	19,74	15,89	15,89	26,04	24,20	100	0,641	0,391	
C3-S3_DH	14,60÷15,02	20,07	16,70	16,70	25,90	20,20	96	0,550	0,356	
C2-S2	16,00÷16,52	21,66	19,04	19,04	25,88	13,80	101	0,360	0,266	
C2-S6_PZ	16,45÷16,85	19,23	15,48	15,48	25,97	24,20	94	0,680	0,405	
C4-S3_DH	16,90-17,50	20,67	18,01	18,01	25,86	14,80	89	0,440	0,305	
C6-S3_DH	25,70÷25,90	20,48	17,24	17,24	25,77	18,80	99	0,498	0,332	D

$\gamma_n$  (kN/m<sup>3</sup>) Peso dell'unità di volume allo stato naturale

$\gamma_n$  (kN/m<sup>3</sup>) Peso dell'unità di volume allo stato naturale

$\gamma_{dry}$  (kN/m<sup>3</sup>) Peso dell'unità di volume secco

$\gamma'$  (kN/m<sup>3</sup>) Peso dell'unità di volume immerso

$\gamma_s$  (kN/m<sup>3</sup>) Peso dell'unità di volume dei grani

$W_n$  (%) Umidità naturale media

$S_r$  (%) Grado di saturazione

e Indice dei vuoti

n Porosità

**TABELLA 5.4** – Riepilogo dei risultati delle determinazione delle caratteristiche fisiche generali in laboratorio

#### 5.4.2. Caratteristiche di consistenza

Le determinazioni eseguite su n. 11 campioni hanno fornito i risultati di seguito illustrati.

**STRATO B2**

- Limite di Liquidità (LL) **105÷135%**
- Limite di Plasticità (LP) **40÷80%**
- Indice di Plasticità (IP) **40÷70%**
- Indice di Consistenza (IC) **-0,01÷0,56**
- Indice di Liquidità (IL) **0,44÷1,01**
- Indice di Attività (A) **2,76÷3,65**

**STRATO B3**

– Limite di Liquidità (LL)	<b>34%</b>
– Limite di Plasticità (LP)	<b>18%</b>
– Indice di Plasticità (IP)	<b>16%</b>
– Indice di Consistenza (IC)	<b>&gt; 1</b>
– Indice di Liquidità (IL)	<b>&lt; 0</b>
– Indice di Attività (A)	<b>1,33</b>

**STRATO C**

– Limite di Liquidità (LL)	<b>40÷75%</b>
– Limite di Plasticità (LP)	<b>10÷20%</b>
– Indice di Plasticità (IP)	<b>30÷55%</b>
– Indice di Consistenza (IC)	<b>0,74÷&gt;1</b>
– Indice di Liquidità (IL)	<b>&lt;0÷0,26</b>
– Indice di Attività (A)	<b>0,52÷3,79</b>

**STRATO D**

– Limite di Liquidità (LL)	<b>37%</b>
– Limite di Plasticità (LP)	<b>17%</b>
– Indice di Plasticità (IP)	<b>20%</b>
– Indice di Consistenza (IC)	<b>0,91</b>
– Indice di Liquidità (IL)	<b>0,09</b>
– Indice di Attività (A)	<b>0,54</b>

CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	PARAMETRI FISICI							STRATO
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	W <sub>n</sub>	IC	IL	A	
C1-S6_PZ	3,25÷3,85	135	77	58	102,60	0,56	0,44	2,76	B2
C1-S4_DH	3,80÷4,25	106	44	62	103,00	0,05	0,95	3,65	
C1-S3_DH	4,00÷4,35	107	60	47	107,60	-0,01	1,01	3,36	
C2-S4_DH	9,00÷9,60	34	18	16	12,70	> 1	< 0	1,33	B3
C1-S2	12,85÷13,45	51	19	32	27,20	0,74	0,26	0,52	C
C3-S4_DH	13,90÷14,50	48	17	31	24,20	0,77	0,23	0,61	
C3-S3_DH	14,60÷15,02	71	18	53	20,20	0,96	0,04	3,79	
C2-S2	16,00÷16,52	46	15	31	13,80	> 1	< 0	1,19	
C2-S6_PZ	16,45÷16,85	59	19	40	24,20	0,87	0,13	1,08	
C4-S3_DH	16,90-17,50	49	16	33	14,80	> 1	< 0	1,10	
C6-S3_DH	25,70÷25,90	37	17	20	18,80	0,91	0,09	0,54	D

<b>LL (%)</b>	Limite di Liquidità
<b>LP (%)</b>	Limite di Plasticità
<b>IP (%)</b>	Indice di Plasticità
<b>LR (%)</b>	Limite di Ritiro
<b>IC</b>	Indice di Consistenza
<b>IL</b>	Indice di Liquidità
<b>A</b>	Indice di Attività

**TABELLA 5.5** – Riepilogo dei risultati delle determinazione dei parametri di consistenza.



### 5.4.3. Analisi granulometrica

Le analisi eseguite mediante vagliatura e sedimentazione su n. 11 campioni hanno fornito i risultati di seguito illustrati.

#### **STRATO B2**

– Ghiaia	<b>1÷2%</b>
– Sabbia	<b>8÷33%</b>
– Limo	<b>47÷72%</b>
– Argilla	<b>14÷21%</b>

#### **STRATO B3**

– Ghiaia	<b>11%</b>
– Sabbia	<b>63%</b>
– Limo	<b>14%</b>
– Argilla	<b>12%</b>

#### **STRATO C**

– Ghiaia	<b>0÷3%</b>
– Sabbia	<b>1÷48%</b>
– Limo	<b>31÷61%</b>
– Argilla	<b>14÷51%</b>

#### **STRATO D**

– Ghiaia	<b>0%</b>
– Sabbia	<b>39%</b>
– Limo	<b>24%</b>
– Argilla	<b>37%</b>

CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA (%)				STRATO
		GHIAIA	SABBIA	LIMO	ARGILLA	
C1-S6_PZ	3,25÷3,85	1	31	47	21	B2
C1-S4_DH	3,80÷4,25	3	8	72	17	
C1-S3_DH	4,00÷4,35	2	33	51	14	
C2-S4_DH	9,00÷9,60	11	63	14	12	B3
C1-S2	12,85÷13,45	1	36	42	21	C
C3-S4_DH	13,90÷14,50	1	1	47	51	
C3-S3_DH	14,60÷15,02	2	48	36	14	
C2-S2	16,00÷16,52	3	35	36	26	
C2-S6_PZ	16,45÷16,85	0	2	61	37	
C4-S3_DH	16,90-17,50	2	37	31	30	
C6-S3_DH	25,70÷25,90	0	39	24	37	D

**TABELLA 5.6** – Distribuzione delle classi granulometriche ottenute per vagliatura e sedimentazione.

#### 5.4.4. Caratteristiche di resistenza al taglio

L'interpolazione delle determinazioni condotte mediante n. 5 "Prove di Taglio Diretto (CD)" e n. 4 "Compressioni triassiali (UU)" hanno consentito di estrapolare i parametri di resistenza al taglio indicati nella tabella successiva.

CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	PARAMETRI DI RESISTENZA AL TAGLIO				STRATO
		$c'$	$c_u$	$\phi'$	$\phi_u$	
C1-S3_DH	4,00÷4,35	0		30		B2
C1-S6_PZ	3,25÷3,85	0		33		
C1-S4_DH	3,80÷4,25	0		21		
C2-S4_DH	9,00÷9,60	0		36		B3
C1-S2	12,85÷13,45	1		29		C C C C C
C3-S3_DH	14,60÷15,02		152		0	
C3-S4_DH	13,90÷14,50		N.D.		N.D.	
C4-S3_DH	16,90-17,50		0		17	
C2-S6_PZ	16,45÷16,85	-	183-216	-	0	

$c'$  (kPa) Coesione efficace

$c_u$  (kPa) Coesione non drenata

$\phi'$  (°) Angolo di resistenza al taglio efficace

$\phi_u$  (°) Angolo di resistenza al taglio non drenata

TABELLA 5.7 – Esito delle interpolazioni delle prove di taglio CD e di compressione triassiale UU.

#### 5.4.5. Prova di compressibilità edometrica

Questa prova è stata eseguita esclusivamente per i campioni provenienti dallo **Strato C**. Come si rileva dal grafico di cui alla **FIGURA 5.7**, l'andamento del modulo edometrico si mantiene pressochè omogeneo e compreso tra **2÷13 MPa** al variare della pressione da 100 kPa sino a 400 KPa per poi crescere progressivamente per ulteriori intervalli di carico.

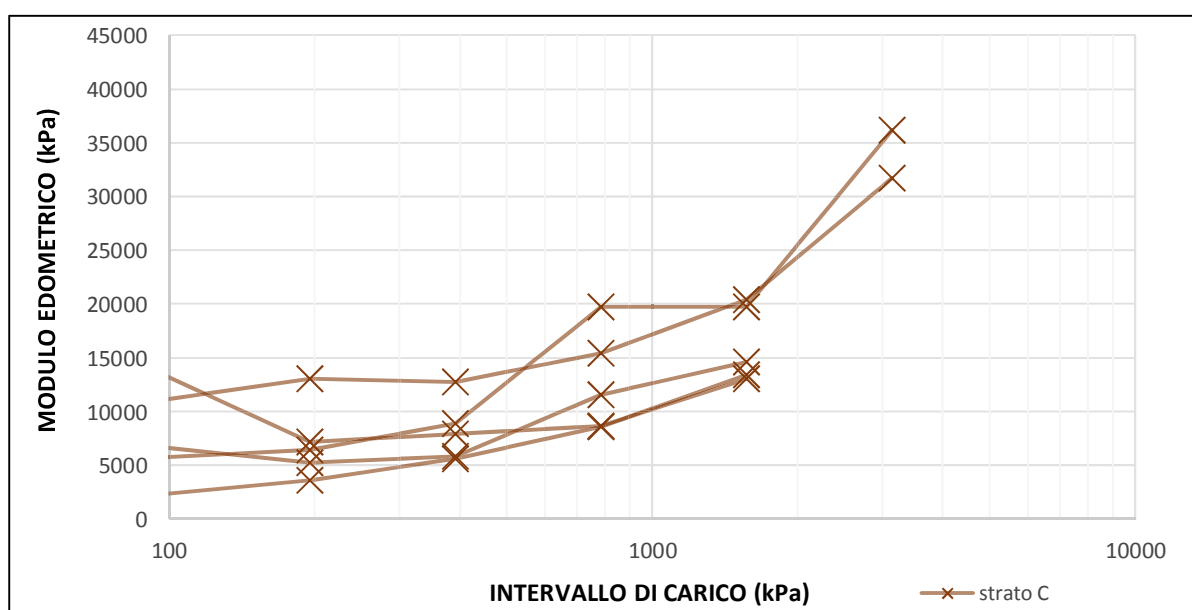


FIGURA 5.7 – Andamento del modulo edometrico per diversi intervalli di carico.



CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	MODULO DI COMPRESSIBILITA' EDOMETRICA (KpA) PER INTERVALLO DI CARICO							
		0	25	49	98	196	393	785	1.570
C1-S2	12,85÷13,45	0	5.882	2.366	2.305	3.574	5.607	8.585	13.417
C3-S3_DH	14,60÷15,02	0	31.203	4.937	5.723	6.431	8.899	19.736	19.736
C4-S3_DH	16,90-17,50	0	12.708	13.353	7.141	7.900	8.651	13.010	19.736
C3-S4_DH	13,90÷14,50	0		42.609	6.659	5.196	5.795	11.579	14.576
C2-S6_PZ	16,45÷16,85	0		12.708	13.353	7.141	7.900	8.651	13.010

TABELLA 5.8 – Riepilogo dei risultati delle determinazione dei parametri di consistenza.

#### 5.4.6. Prova di compressione monoassiale su provini di roccia

Il sondaggio S4-DH, ubicato nel settore nord occidentale dello stadio, ha intercettato, a partire da circa 15,0 m dal p.c. il basamento miocenico rappresentato dai calcari della FNE DEI CALCARI DI CAGLIARI.

Dall'analisi visiva e dalle prove di compressione monoassiale è stato possibile distinguere uno **Strato E1**, rappresentato da un calcare organogeno e riconducibile alla litofacies **CGIc** nota in letteratura come "*Pietra Forte*" ed uno **Strato E2** associabile ad un calcare marnoso costituente di solito, la fare basale della sequenza carbonatica tardo miocenica noto in letteratura come "*Pietra Cantone*"[CGIa].

CAMPIONE	PROF.TA' (m) DA P.C.	DETERMINAZIONI		STRATO
		$\gamma$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_r$ (MPa)	
C4-S4_DH	16,60÷16,80	2,44	23,64	E1
C5-S4_DH	19,50÷19,70	2,13	7,12	
C6-S4_DH	25,30÷25,60	2,43	19,81	
C7-S4_DH	30,70÷30,85	1,95	3,40	E2

$\gamma$  (Mg/m<sup>3</sup>)      Peso di Volume

$\sigma_r$  (MPa)      Sforzo a rottura

TABELLA 5.9 – Esito delle prove di compressione monoassiale su campioni di roccia.

## 6. AGGRESSIVITÀ AL CALCESTRUZZO

Gli ambienti chimicamente aggressivi per il calcestruzzo, sono riconducibili ad alcune proprietà del suolo naturale e delle acque nel terreno rilevate a temperature di  $5\div 25^{\circ}\text{C}$  e ad una velocità dell'acqua sufficientemente bassa da poter essere approssimata a condizioni statiche. La condizione più gravosa, per ognuna delle condizioni chimiche, determina la classe di esposizione: se due o più caratteristiche di aggressività appartengono alla stessa classe, l'esposizione sarà classificata nella classe più elevata successiva, salvo il caso che uno studio specifico provi che ciò non è necessario.

Le analisi sulle acque all'uopo condotte su n. 2 campioni rappresentativi prelevati dal piezometro **S4\_DH** e dal foro residuo della prova penetrometrica **CPTU\_5**, hanno dato i riscontri presentati in **TABELLA 6.1** che richiamano i valori dei rapporti di prova in appendice.

ACQUE SOTTERRANEE						
Campione	$\text{CO}_2$ (mg/l)	Ione $\text{NH}_4^+$ (mg/l)	Ione $\text{NO}_3^+$ (mg/l)	Cloruri (mg/l)	pH	Ione $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)
S4_DH	8,99	$0,135 \pm 0,026$	$< 0,30$	$4.290 \pm 570$	$7,8 \pm 0,1$	$698 \pm 92$
CPTU_5	8,49	$1,10 \pm 0,13$	$< 0,30$	$374 \pm 49$	$7,5 \pm 0,1$	$46,8 \pm 6,2$

**TABELLA 6.1** – Esito delle analisi per l'aggressività delle acque nei confronti del calcestruzzo.

Con riferimento alla "Classi di esposizione" per calcestruzzo strutturale in funzione delle condizioni ambientali secondo la norma UNI 11104:2004 e UNI EN 206-1:2006, si evincono le seguenti classi di esposizione:

- ⇒  $\text{CO}_2$  nessuna
- ⇒  $\text{NH}_4^+$  nessuna
- ⇒ pH XA1 (debolmente aggressivo)
- ⇒ Solfati XA1 e XA2 (debolmente e moderatamente aggressivo)



## 7. CONCLUSIONI

Le analisi effettuate in questa sede – basate sui dati ricavati dalla campagna geognostica effettuata nell'ottobre 2020 entro le strette pertinenze della struttura sportiva, coadiuvati dalle informazioni estrapolate da indagini svolte nelle aree contermini per altri interventi ingegneristici – hanno consentito di affinare le modellazioni geologiche, geotecniche e sismiche in relazione alle specifiche problematiche applicative connesse con la realizzazione dell'intervento e con un dettaglio congruo alla fase progettuale in essere.

Lo stadio di Sant'Elia ricade nell'ambito di un vasto settore pianeggiante che sino al primo ventennio del secolo scorso costituiva un'ampia rientranza acquitrinosa direttamente influenzata da mare che lambiva la stretta striscia di terra emersa che univa il settore del promontorio di Sant'Elia / Sella del Diavolo con l'entroterra cagliaritano.

Tale morfologia, è stata significativamente alterata nel corso degli ultimi secoli sino alla completa bonifica, datata 1920, del tratto di mare basso compreso tra i rilievi di Monte Urpinu / Bonaria e Sant'Elia evidenziata dalla rettificazione della costa tra il porto de Su Siccu e Sant'Elia, sulla quale ora trovano spazio lo stesso stadio, i parcheggi al suo contorno, la viabilità e tutto il resto di infrastrutture connesse con le pregresse attività di produzione, trasporto e stoccaggio del sale, ed il canale di San Bartolomeo.

La sequenza litostratigrafica locale prevede il seguente insieme di strati (o unità litostratigrafiche informali), a partire dal più superficiale:

**A] Superfici artificiali e terreni di riporto eterogenei [Attuale]**

- A1]** Superfici artificiali
- A2]** Terreni di riporto eterogenei

**B] Depositi limo sabbiosi e sabbioso ghiaiosi di ambiente litorale e transizionale [Olocene]**

- B1]** Fango limoso e limi sabbiosi, conchigliari e con fibra vegetale marina decomposta
- B2]** Sabbie fini e medie limose con abbondante fibra vegetale marina decomposta
- B3]** Sabbie e ghiaie  $\pm$  cementate da carbonato di calcio

**C] Depositi argillo-limosi e sabbiosi di ambiente fluvio-deltizio [Pleistocene?]**

- C1]** Argille  $\pm$  limose con noduli carbonatici, sovraconsolidate
- C2]** Sabbie argillose ferrettizzate

**D] Depositi detritici sabbiosi e conglomeratici fluvio-deltizi [Pleistocene?]**

- D1]** Sabbie grossolane addensate
- D2]** Breccie calcaree monogeniche, molto compatte

**E] Basamento roccioso carbonatico [Miocene superiore]**

- E1]** Calcare organogeno/detritico (Litofacies "Tramezzario" + "Pietra Forte")
- E2]** Calcare marnoso (litofacies "Pietra Cantone")

In sommità, i terreni di riporto eterogenei [**Strato A**] di spessore variabile da 1,00 m a 2,00 m, ricoprono un deposito naturale di limi sabbioso-argillosi di ambiente marino litorale di spessore plurimetrico (6,00÷8,00 m) con accumuli più o meno rilevanti di fibra vegetale (*Posidonia oceanica*) in vario stato di decomposizione [**Strati B1+B2**] saturi già da 1,00÷2,00 m di profondità e con scadenti proprietà geotecniche.

Seguono circa 3,00÷6,00 m di depositi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi, con caratteristiche dapprima mediocri che migliorano decisamente attorno agli 8÷11 m dal p.c. [**Strato B3**]: questa sequenza di depositi marino-litorali olocenici poggia su un substrato alluvionale/colluviale prevalentemente argilloso [**Strato C**] molto consistente e sovra-consolidato. Quest'ultimo nel settore sud del sedime, a partire da quota circa -24 m (sondaggio S3\_DH) diventa a prevalenza di sabbie con intercalazioni di brecce calcaree [**Strato D**], entrambi con buone/ottime caratteristiche geotecniche tanto da costituire, già a partire da profondità di -15,0 m dal p.c. un ottimale substrato di appoggio per fondazioni profonde, in assenza del basamento roccioso carbonatico.

Il substrato calcareo antico [**Strato E**], lapideo in facies calcarea (*Tramezzario/Pietra Forte*), intercettato direttamente nel sondaggio S4\_DH e valutato indirettamente nelle prove CPTU\_4, CPTU\_6 e CPTU\_7 a profondità comprese tra -9,00 m e -16,00 m dal p.c., risulta presente solo nel settore nord del sedime di intervento, venendo completamente a mancare nella parte centrale e verso mare dove si approfondisce sino a più di 35 m dal p.c. a causa di dislocamenti tettonici antichi.

Relativamente al contesto idrogeologico, i primi 12,00÷15,00 m dal p.c. [**Strato A + Strato B**], la prevalenza dei quali di chiara origine sedimentaria marino litorale di ambiente per lo più protetto, ospitano una falda salmastra il cui livello piezometrico risulta stabilizzato a brevissima profondità dal p.c. (0,60÷1,00 m) in equilibrio con il l.m.m..

A partire da una profondità di circa -12,00÷15,00 dal p.c. e sino a circa -40,00 m, è presente un altro corpo sedimentario piuttosto continuo [**Strati C+D**] di ambiente fluvio-deltizio avente le caratteristiche granulometriche e di porosità tali da fungere sia da limite di tamponamento inferiore alla falda freatica sia di consentire la presenza di una circolazione idrica a carattere confinato e/o semiconfinato, favorevole alla formazione di un sistema acquifero multifalda, con locali caratteristiche di salienza.

In particolare nella compagine calcarea fratturata intorno ai 16-17 m di profondità (S4DH) è stato rinvenuto un importante flusso idrico in pressione, di cui si dovrà tenere conto nell'ambito delle scelte progettuali di fondazioni profonde.

Le pessime caratteristiche geotecniche delle terre di riporto e dei depositi limoso-sabbiosi con l'abbondante presenza di fibra vegetale marina in decomposizione [Unità A+B1+B2] nei primi -8,00÷9,00 m dal p.c., non consente l'adozione di fondazioni di tipo diretto, anche se estese, in ragione della significativa compressibilità dei depositi superficiali e la conseguente ammissione di cedimenti di entità difficilmente tollerabile dalla struttura in elevazione. Ne consegue la necessità di ricorrere a fondazioni indirette per le opere di maggiore rilevanza strutturale, quali pali di medio o grande diametro o micropali che potranno fare affidamento sulle sufficienti/buone caratteristiche geotecniche del substrato sabbioso-arenaceo alla base della sequenza olocenica [**Strato B3**] o meglio sulle ottimali caratteristiche geotecniche riscontrate negli **Strati C e D**, ma a partire da profondità non inferiori ai 15 m dal p.c.

A riguardo si ritiene che la tipologia di palo più adeguato ricadrebbe tra quelli battuti di medio-grande diametro  $\varnothing$  600÷1.000 mm, gettati in opera, fermo restando le opportune verifiche delle vibrazioni indotte sugli stabili circostanti. Quelli trivellati di grande diametro potrebbero risultare problematici laddove dovessero intestarsi per diversi metri entro la compagine calcarea per via della necessità di ricorrere allo scalpello e per via di flussi idrici in pressione.

In tali situazioni potrebbero risultare più adeguati i micropali, sempre con l'accorgimento di prevedere sistemi in grado di opporsi al dilavamento della boiaccia cementizia da iniettare (es. "calze in polipropilene").

Allo stato attuale delle cose, nel sito di previsto intervento edilizio non sono stati riscontrati fenomeni (in atto o potenziali) tali da determinare condizioni di rischio geologico da frana e da alluvione, né si prevede che l'evoluzione morfodinamica naturale dei luoghi possa in qualche modo compromettere la funzionalità delle opere in progetto.

A suffragio di quanto il medesimo non rientra tra le aree perimetrate dal Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) né dal Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF). **GT**

DATA: 18 giugno 2021



*appendice*

***RAPPORTI DI LABORATORIO CHIMICO  
(ACQUE)***

**RAPPORTO DI PROVA n° 20SA42058**

del 18/12/2020

Pagina 1 di 2

Spett.le

**GEOTECHNA S.r.l.**Via Lorenzo il Magnifico, 7  
09134 CAGLIARI (CA)

Committente: GEOTECHNA S.r.l.

Campione ricevuto il : 04/12/2020 - Temperatura di trasporto : Temperatura ambiente

Prelievo eseguito da: GEOTECHNA S.r.l.

**Descrizione campione** (Informazioni dichiarate dal cliente di cui il laboratorio non si assume alcuna responsabilità)Descrizione campione: **Acqua Sotterranea**Luogo del prelievo : **Stadio S. Elia - Cagliari - S4-DH-2012-01**

Prelevato il : 01/12/2020 alle ore : 10:00 con procedura di campionamento : \* Non Dichiarata

**Risultati delle prove**

Parametri / Prove	Unità di misura	VALORE	Inc. Estesa	L 1- L 2	Data analisi inizio - fine
Anidride carbonica disciolta * (APAT CNR IRSA 4010 Man 29 2003)	mg/l	<b>8.99</b>			05/12 05/12
Azoto ammoniacale (N-NH4) (ISO 15923-1:2013)	mg/l	<b>0.135± 0.026</b>		0.4	05/12 05/12
Azoto nitrico (N-NO3) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l	<b>&lt; 0.30</b>			11/12 11/12
Cloruri (Cl) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l	<b>4290± 570</b>			17/12 17/12
pH (in campo) <sup>2</sup> (APAT CNR IRSA 2060 Man 29 2003)	unità di pH	<b>7.8± 0.1</b>			01/12 01/12
Solfati (SO4) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l #	<b>698± 92</b>		250	17/12 17/12

LIMITI DI RIFERIMENTO: D.Lgs. 152/2006 - Allegato 5 Tab.2 - Acque sotterranee + Limiti sostanze non comprese (APAT 2006)

**(#): Il parametro non rispetta i limiti di riferimento indicati.**

Scostamenti, aggiunte od esclusioni rispetto a procedura di campionamento, metodi di prova, condizioni di prova ed ambientali:

Nulla di rilevante.

**LEGENDA:**

SS: Sostanza Secca

MP: Metodo di Prova interno

(-): Non determinabile

L1 : Limite di Riferimento Minimo

L2 : Limite di Riferimento Massimo

(\*): Prova non accreditata ACCREDIA

(²): Prova eseguita in campo

Il Rapporto di Prova riguarda solo il campione sottoposto a prova e non può essere riprodotto parzialmente, salvo approvazione scritta del Laboratorio. Nel caso che il campionamento sia stato eseguito dal Cliente i risultati si riferiscono al campione come ricevuto. I campioni esaminati, salvo specifici accordi intrapresi con il Laboratorio o situazioni particolari, vengono smaltiti dopo la stampa dei rapporti di prova. I dati strumentali e le registrazioni tecniche inerenti all'analisi vengono conservate per un periodo non inferiore a cinque anni. I valori di incertezza estesa contenuti nel presente documento sono relativi ad un livello di probabilità P=95%, gradi di libertà >10 e fattore di copertura K=2. Nel caso di prove microbiologiche, l'incertezza estesa è da intendersi come "intervallo di fiducia". L'incertezza riportata non tiene conto del contributo del campionamento. L'indicazione dei parametri non conformi rispetto ai limiti di riferimento applicati è riportata senza tenere conto del contributo dell'incertezza di misura. Se non diversamente specificato, eventuali sommatorie presenti sono calcolate secondo il criterio Lower Bound. Se non diversamente specificato, il recupero è all'interno dell'intervallo di accettabilità previsto per il metodo impiegato e pertanto non considerato per l'espressione del valore finale. Tutte le prove riportate sul presente documento sono eseguite presso la sede del Laboratorio, riportata in calce ad ogni pagina, ad eccezione delle prove segnalate come "(²) Prova eseguita in campo" che vengono effettuate presso il punto di prelievo o di campionamento.

**RAPPORTO DI PROVA n° 20SA42058**

del 18/12/2020

Pagina 2 di 2

Spett.le

**GEOTECHNA S.r.l.**

Via Lorenzo il Magnifico, 7  
09134 CAGLIARI (CA)

*Il documento originale è in formato elettronico e con firma digitale dei Responsabili sotto indicati. Qualsiasi stampa è una COPIA dell'originale.  
Il documento originale in formato elettronico è conservato presso gli archivi di Savi Laboratori & Service S.r.l. per una durata non inferiore a cinque anni dalla data di emissione dello stesso.*

**Sostituto del Responsabile delle  
prove chimiche**

Dott. Armando Vicari  
Ordine dei chimici di Mantova  
Iscrizione n. A 232

**Sostituto del Responsabile del  
Laboratorio**

Dott. Mosè Mozzarelli  
Ordine dei chimici di Mantova  
Iscrizione n. A 224

-----  
*Fine del rapporto di prova*



## RAPPORTO DI PROVA n° 20SA42059

del 18/12/2020

Pagina 1 di 2

Spett.le

**GEOTECHNA S.r.l.**

Via Lorenzo il Magnifico, 7  
09134 CAGLIARI (CA)

Committente: GEOTECHNA S.r.l.

Campione ricevuto il: 04/12/2020 - Temperatura di trasporto: Temperatura ambiente

Prelievo eseguito da: GEOTECHNA S.r.l.

**Descrizione campione** (Informazioni dichiarate dal cliente di cui il laboratorio non si assume alcuna responsabilità)

Descrizione campione: **Acqua Sotterranea**

Luogo del prelievo: **Stadio S. Elia - Cagliari - CPTU05-201201**

Prelevato il: 01/12/2020 alle ore: 10:30 con procedura di campionamento: \* Non Dichiarata

## Risultati delle prove

Parametri / Prove	Unità di misura	VALORE	Inc. Estesa	L 1- L 2	Data analisi inizio - fine
Anidride carbonica disciolta * (APAT CNR IRSA 4010 Man 29 2003)	mg/l	<b>8.49</b>			05/12 05/12
Azoto ammoniacale (N-NH4) (ISO 15923-1:2013)	mg/l #	<b>1.10± 0.13</b>		0.4	05/12 05/12
Azoto nitrico (N-NO3) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l	<b>&lt; 0.30</b>			11/12 11/12
Cloruri (Cl) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l	<b>374± 49</b>			17/12 17/12
pH (in campo) <sup>2</sup> (APAT CNR IRSA 2060 Man 29 2003)	unità di pH	<b>7.5± 0.1</b>			01/12 01/12
Solfati (SO4) (APHA Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ed 23rd 2017 4110B)	mg/l	<b>46.8± 6.2</b>		250	11/12 11/12

LIMITI DI RIFERIMENTO: D.Lgs. 152/2006 - Allegato 5 Tab.2 - Acque sotterranee + Limiti sostanze non comprese (APAT 2006)

**(#): Il parametro non rispetta i limiti di riferimento indicati.**

Scostamenti, aggiunte od esclusioni rispetto a procedura di campionamento, metodi di prova, condizioni di prova ed ambientali:

Nulla di rilevante.

### LEGENDA:

SS: Sostanza Secca

MP: Metodo di Prova interno

(-) : Non determinabile

L1 : Limite di Riferimento Minimo

L2 : Limite di Riferimento Massimo

(\*) : Prova non accreditata ACCREDIA

(<sup>2</sup>) : Prova eseguita in campo

Il Rapporto di Prova riguarda solo il campione sottoposto a prova e non può essere riprodotto parzialmente, salvo approvazione scritta del Laboratorio. Nel caso che il campionamento sia stato eseguito dal Cliente i risultati si riferiscono al campione come ricevuto. I campioni esaminati, salvo specifici accordi intrapresi con il Laboratorio o situazioni particolari, vengono smaltiti dopo la stampa dei rapporti di prova. I dati strumentali e le registrazioni tecniche inerenti all'analisi vengono conservate per un periodo non inferiore a cinque anni. I valori di incertezza estesa contenuti nel presente documento sono relativi ad un livello di probabilità P=95%, gradi di libertà >10 e fattore di copertura K=2. Nel caso di prove microbiologiche, l'incertezza estesa è da intendersi come "intervallo di fiducia". L'incertezza riportata non tiene conto del contributo del campionamento. L'indicazione dei parametri non conformi rispetto ai limiti di riferimento applicati è riportata senza tenere conto del contributo dell'incertezza di misura. Se non diversamente specificato, eventuali sommatorie presenti sono calcolate secondo il criterio Lower Bound. Se non diversamente specificato, il recupero è all'interno dell'intervallo di accettabilità previsto per il metodo impiegato e pertanto non considerato per l'espressione del valore finale. Tutte le prove riportate sul presente documento sono eseguite presso la sede del Laboratorio, riportata in calce ad ogni pagina, ad eccezione delle prove segnalate come "(<sup>2</sup>) Prova eseguita in campo" che vengono effettuate presso il punto di prelievo o di campionamento.

**RAPPORTO DI PROVA n° 20SA42059**

del 18/12/2020

Pagina **2 di 2**

Spett.le

**GEOTECHNA S.r.l.**

Via Lorenzo il Magnifico, 7  
09134 CAGLIARI (CA)

*Il documento originale è in formato elettronico e con firma digitale dei Responsabili sotto indicati. Qualsiasi stampa è una COPIA dell'originale.  
Il documento originale in formato elettronico è conservato presso gli archivi di Savi Laboratori & Service S.r.l. per una durata non inferiore a cinque anni dalla data di emissione dello stesso.*

**Sostituto del Responsabile delle  
prove chimiche**

*Dott. Armando Vicari*  
Ordine dei chimici di Mantova  
Iscrizione n. A 232

**Sostituto del Responsabile del  
Laboratorio**

*Dott. Mosè Mozzarelli*  
Ordine dei chimici di Mantova  
Iscrizione n. A 224

-----  
*Fine del rapporto di prova*