

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



U.O. INFRASTRUTTURE SUD

PROGETTO DEFINITIVO

LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO
COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO
TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO

LINEA STORICA
RELAZIONE CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GENERALE

SCALA:

-

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

NN 1 X 0 1 D 7 8 R G BA 0 0 0 0 0 0 1 2 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	E.Pasquali	Ottobre 2020	G.Ficorella	Ottobre 2020	M. D'Avino	Ottobre 2020	D.Tiberti Dicembre 2020
		S.Babbucci						
B	EMISSIONE ESECUTIVA	E.Pasquali	Dicembre 2020	G.Ficorella	Dicembre 2020	M. D'Avino	Dicembre 2020	D.Tiberti Dicembre 2020
		S.Babbucci						

ITALFERR S.p.A.
Gruppo Ferrovie dello Stato
Direzione Generale
U.O. Infrastrutture Sud
Piazzale Leonardo da Vinci
80138 Napoli (NA)
Ordine degli Ingegneri Prov. di Napoli n. 10075

I N D I C E

1	INTRODUZIONE	5
2	NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	6
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
	DESCRIZIONE DEL TRACCIATO	8
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO, MORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO	10
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE.....	10
3.2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO LOCALE	11
3.2.1	<i>Sub-unità della Piana del Sele (Settore Salerno – Pontecagnano – Battipaglia).....</i>	<i>11</i>
3.2.1.1	Supersintema Battipaglia – Persano (BP).....	11
3.2.1.2	Travertini di Pontecagnano (TPO)	12
3.2.1.3	Sintema Campolungo (SLG).....	12
3.2.2	<i>Subunità delle Valli fluviali in destra del Sele (Fiumi Irno, picentino e Tusciano).....</i>	<i>13</i>
3.2.2.1	Sintema Masseria Acqua Santa (MQS):.....	13
3.2.3	<i>Unità ubiquitarie non completamente formate dell'area continentale:</i>	<i>14</i>
3.2.3.1	Depositi alluvionali (b)	14
3.3	INQUADRAMENTO MORFOLOGICO	15
3.4	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	16
4	CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	17
4.1	RISPOSTA SISMICA.....	17
4.1.1	<i>Categoria di sottosuolo</i>	<i>18</i>
4.1.2	<i>Stati limite e probabilità di superamento</i>	<i>22</i>
4.1.3	<i>Accelerazione di riferimento su suolo rigido a_g.....</i>	<i>22</i>
4.2	MAGNITUDO	24
5	INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE	25
5.1	PREMESSA	25
5.2	CAMPAGNE GEOGNOSTICHE PROGETTO DEFINITIVO	25
5.3	CAMPAGNE GEOGNOSTICHE PFTE	26
5.4	CAMPAGNE GEOGNOSTICHE STORICHE ANNI 2000-2002	27

5.5	PROVE IN SITO	28
5.5.1	Analisi stratigrafica.....	28
5.5.2	Prove SPT.....	29
5.5.3	Prove CPTU.....	30
5.5.4	Prove di permeabilità Lefranc	30
5.5.5	Prove carico su piastra	31
5.5.6	Prove pressiometriche Menard	32
5.5.7	Indagini sismiche.....	32
5.6	PROVE DI LABORATORIO	34
6	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GENERALE	35
6.1	PREMESSA	35
6.2	RICONOSCIMENTO DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	35
6.3	CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE	37
6.3.1	Depositi incoerenti	37
6.3.1.1	Densità relativa	37
6.3.1.2	Angolo di resistenza al taglio.....	38
6.3.1.2.1	Correlazioni dirette tra φ' e NSPT.....	38
6.3.1.2.2	Correlazioni dirette tra φ' e prove CPTU	38
6.3.1.3	Caratteristiche di deformabilità.....	39
6.3.2	Depositi coesivi	41
6.3.2.1	Classificazione	41
6.3.2.2	Caratteristiche di resistenza.....	41
6.3.2.3	Riconoscimento stratigrafico da prove CPT.....	42
6.3.2.4	Caratteristiche di deformabilità.....	44
6.3.2.5	Caratteristiche di consolidazione	44
6.4	UNITÀ R- TERRENI DI RIPORTO E COLTRE VEGETALE.....	46
6.5	UNITÀ A – ARGILLA	47
6.5.1	Prove in situ - Analisi Nspt	47
6.5.2	Prove in situ - Analisi CPTU.....	49

6.5.3	Prove in situ - permeabilità.....	50
6.5.4	Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio	51
6.5.5	Caratteristiche di resistenza.....	53
6.5.6	Caratteristiche di deformabilità.....	54
6.5.7	Correlazioni utilizzate	55
6.5.8	Sintesi dei risultati per l'unità ARGILLA.....	57
6.6	UNITÀ L – LIMI.....	59
6.6.1	Prove in situ - Analisi Nspt	59
6.6.2	Prove in situ - Analisi CPTU.....	61
6.6.3	Prove in situ – permeabilità	63
6.6.4	Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio	63
6.6.5	Caratteristiche di resistenza.....	65
6.6.6	Caratteristiche di deformabilità.....	67
6.6.7	Correlazioni e confronto con dati di laboratorio.....	68
6.6.8	Sintesi dei risultati per l'unità LIMO.....	70
6.7	UNITÀ S - SABBIA	72
6.7.1	Prove in situ - Analisi SPT.....	72
6.7.2	Prove in situ – Analisi CPTU.....	74
6.7.3	Prove in situ – Permeabilità.....	75
6.7.4	Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio	76
6.7.5	Caratteristiche di resistenza.....	78
6.7.6	Caratteristiche di deformabilità.....	79
6.7.7	Correlazioni e confronto con i dati di laboratorio.....	80
6.7.8	Sintesi dei risultati per l'unità SABBIA.....	83
6.8	UNITÀ GHIAIA	84
6.8.1	Prove in situ - Analisi SPT.....	85
6.8.2	Prove in situ – Analisi CPTU.....	86
6.8.3	Prove in situ – Permeabilità.....	87

6.8.4	Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio	87
6.8.5	Caratteristiche di resistenza.....	89
6.8.6	Caratteristiche di deformabilità.....	89
6.8.7	Correlazioni e confronto con i dati di laboratorio.....	90
6.8.8	Sintesi dei risultati per l'unità GHIAIA	93
6.9	SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	94
7	FALDA	96
8	LIQUEFAZIONE.....	97
8.1	INDICE POTENZIALE LIQUEFAZIONE	101
8.2	RISULTATI	102
8.2.1	Risultati prove lungo il tracciato.....	103
8.2.1.1	Risultati prove CPTU.....	103
8.2.1.2	Risultati prove DH	104
8.2.1.3	Risultati prove SPT	105
8.2.1.4	Grafici prove CPTU.....	106
8.3	CONCLUSIONI	110

1 INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la Relazione Geotecnica inerente all'installazione delle barriere antirumore relative alla linea storica Salerno-Battipaglia Lotto 01 Prolungamento Metropolitana di Salerno.

Questo documento deriva direttamente dalla relazione Geotecnica Generale redatta nell'ambito del Progetto Definitivo del Completamento della Metropolitana di Salerno, tratta Arechi – Pontecagnano Aeroport

In quanto la tratta oggetto di intervento è la medesima, si riporta la caratterizzazione ottenuta dai sondaggi e prove disponibili per il Lotto 00 del progetto, con cui si è ottenuto il profilo geotecnico complessivo riportato nelle tavole NN1X00D78L6GE0600001-6, da cui si sono estratte le tavole relative alle barriere della Linea Storica (LS), NN1X.01.D.78.L6.BA0000.013-15.

Lo studio raccoglie ed analizza le informazioni attualmente disponibili derivanti da indagini geognostiche eseguite in questa fase progettuale, inoltre sono stati utilizzati sia i dati derivanti dalla fase di Fattibilità Tecnica ed Economica del progetto (PFTE) che le stratigrafie di pozzi ad uso idropotabile reperite tramite la banca dati nazionale ISPRA.

Nel presente elaborato verranno quindi affrontati i seguenti aspetti:

- Inquadramento sintetico generale geologico, geomorfologico ed idrogeologico;
- Caratterizzazione sismica;
- Descrizione delle campagne di indagine svolte;
- Descrizione ed interpretazione dei risultati di tutte le indagini svolte nelle varie campagne geognostiche;
- Caratterizzazione geotecnica generale: individuazione delle unità geotecniche interferenti con le opere ed il tracciato, definizione dei parametri geotecnici di progetto, individuazione del livello di falda.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 6 di 110

2 NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

L'interpretazione dei risultati e la redazione della presente relazione sono stati effettuati nel rispetto della Normativa in vigore e di alcune raccomandazioni.

I principali riferimenti normativi sono i seguenti:

- [1] Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18 (NTC-2018);
- [2] Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019 - Istruzioni per l'Applicazione dell'aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018;
- [3] Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario dell'Unione Europea.
- [4] Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010 – Eurocodice 1 – Parte 2
- [5] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21-12-18 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili
- [6] UNI EN 1997-1 - Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- [7] UNI EN 1997-2 - Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo.
- [8] O.P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003 e s.m.i., "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e successive modifiche ed integrazioni.
- [9] O.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".
- [10] D.M. 17/01/2018, "Norme tecniche per le costruzioni".
- [11] D.M. 06/05/2008, integrazione al D.M. 14/01/2008.
- [12] Circ. Min. II.TT. 02/02/2009, n. 617, "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14/01/2008".
- [13] Circ. Min. II.TT. 05/08/2009, "Nuove norme tecniche per le costruzioni approvate con decreto del Ministro delle infrastrutture 14 gennaio 2008 - Cessazione del regime transitorio di cui all'articolo 20, comma 1, del decreto-legge 31 dicembre 2007, n. 248".
- [14] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni», G.U. n.42 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.8.
- [15] RFI DTC SI AG MA IFS 002 A del Dic. 2018: Manuale di progettazione delle Opere Civili – Parte II – Sezione 7 – Geologia.
- [16] Tariffa IG di RFI in vigore nel 2018.
- [17] RFI DTC SI SP IFS 001 B del 22-12-2018 "Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Sez. 3 – Rilievi geologici e indagini geognostiche".
- [18] D.M. 11.03.1988: "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle opere di fondazione". (DPR. 5 ottobre 2010, n. 207 artt. 52-53).

Linea Storica
 Relazione geotecnica generale

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
NN1X	01 D 78	RG	BA0000 012	B	7 di 110

2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

TAVOLE DI RIFERIMENTO

Id	Scala	Codifiche Italferr																		
Linea Storica -Profilo Geotecnico – Tav. 1	1:2000/200	N	N	1	X	0	1	D	7	8	L	6	B	A	0	0	0	0	1	3
Linea Storica -Profilo Geotecnico – Tav. 2	1:2000/200	N	N	1	X	0	1	D	7	8	L	6	B	A	0	0	0	0	1	4
Linea Storica -Profilo Geotecnico – Tav. 3	1:2000/200	N	N	1	X	0	1	D	7	8	L	6	B	A	0	0	0	0	1	5

DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

La tratta oggetto del presente studio è ubicata nella regione Campania, ed attraversa i comuni di Salerno e Pontecagnano (SA), in una zona prevalentemente pianeggiante. Il tracciato in progetto si svilupperà in direzione NW-SE per una lunghezza di circa 9 km nel settore centro settentrionale della Piana del Sele ed affiancherà la linea ferroviaria esistente Salerno – Battipaglia. Il progetto avrà inizio dall'attuale stazione Arechi e si protrarrà in prossimità dell'aeroporto (Figura 0.1). Inoltre, è presente una seconda area di progetto lungo la tratta ferroviaria, a circa 2.3 km a nord-est dalla prima, nei pressi della stazione Salerno Mercatello (Figura 0.1). L'area di Mercatello non è oggetto della presente relazione.

La piana del Sele, ampia circa 500 km², è limitata da un lungomare sabbioso e pressoché rettilineo, allungato tra le città di Salerno e Agropoli (Figura 0.2). A nord è delimitata dai rilievi montuosi dei monti Picentini, che circondano tutta la piana, interrotta solo dalla valle del Sele che si inoltra all'interno dei rilievi con direzione E-W. A sud il confine è costituito dal corso del Fiume Sele.

Figura 0.1 - Immagine aerea dell'area di Salerno e Pontecagnano. In rosso sono evidenziate le tratte oggetto di studio. (Google Earth).

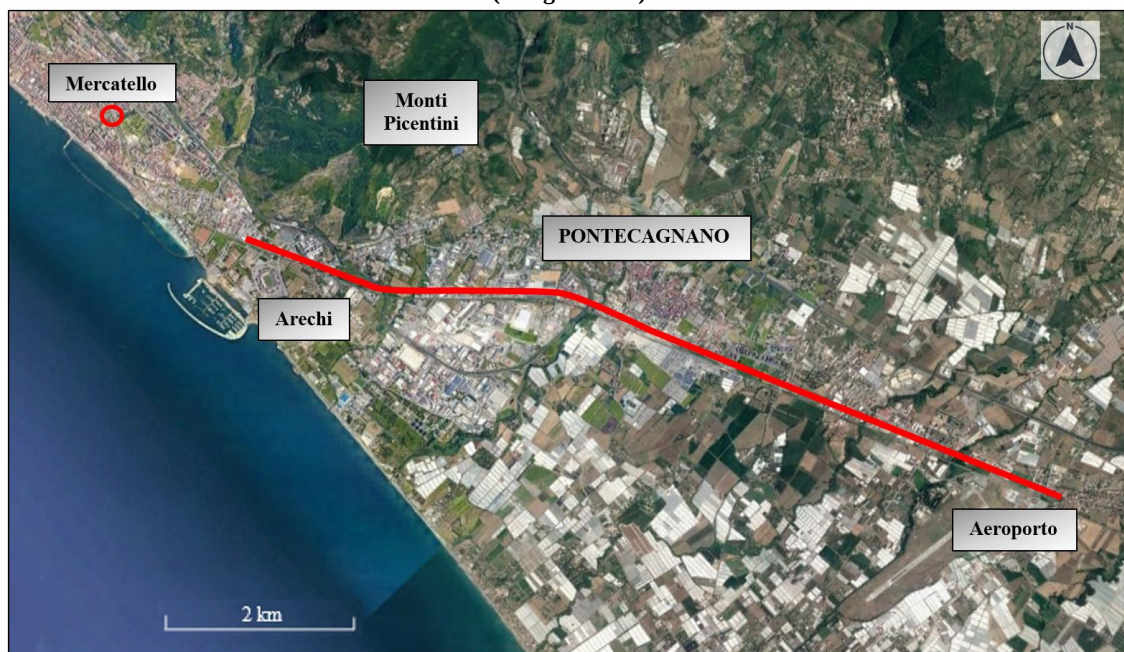


Figura 0.2 – Immagine aerea della Piana del Sele (immagine fuori scala)



3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, MORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

Nel presente capitolo viene fornito un breve inquadramento geologico, morfologico, idrogeologico propedeutico alla caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dalle opere in progetto, legate al completamento della linea Metropolitana di Salerno (tratta Arechi – Pontecagnano aeroporto) includendo l’installazione delle barriere antirumore lungo la Linea Storica. Per maggiori dettagli ed approfondimenti si rimanda a quanto sviluppato nella relazione geologica.

3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

Il settore costiero del territorio campano presenta un assetto geologico-strutturale molto complesso, comprendendo le estreme propaggini occidentali della catena appenninica meridionale, qui interessata dalla presenza di quattro importanti centri vulcanici (da Nord a Sud, Roccamonfina, i Campi Flegrei, il Vesuvio ed il complesso vulcanico dell’isola di Ischia) e caratterizzata da ampie depressioni strutturali, attuali sedi di piane alluvionali più o meno ampie, tra le quali, la Piana del Sele. Il segmento di catena sud-appenninica presente nell’entroterra di Salerno è costituito da una pila di falde sovrapposte che hanno avuto origine sia da domini bacinali (Unità Lagonegrese Auct. e Sicilide Auct.) sia da domini di piattaforma carbonatica (Unità della Piattaforma Carbonatica Appenninica sensu Mostardini & Merlini, 1986), con età comprese tra il Mesozoico ed il Terziario.

Più in dettaglio, dall’alto verso il basso, il Gruppo delle Argille Variegate (AV) dell’Unità Sicilide poggiano sull’unità di piattaforma carbonatica dei M.ti Lattari – M.ti Picentini (UMLP), a sua volta sovrapposta sulle unità del Bacino di Lagonegro, affioranti, in questo settore di catena appenninica, solamente in finestre tettoniche di dimensioni relativamente contenute. Successivamente all’impilamento delle falde, una tettonica estensionale plio-pleistocenica, coeva all’apertura del Tirreno, ha determinato, nell’entroterra del settore settentrionale del golfo di Salerno, un andamento irregolare del margine occidentale della catena - ribassandolo lungo “master faults” ad orientazione SW-NE e WNW-ESE - e la formazione della profonda depressione (graben peri-tirrenico) della Piana del Sele. La depressione della Piana del Sele, che strutturalmente si prolunga verso il Golfo di Salerno, è stata colmata da alcune migliaia di metri di depositi quaternari, a partire dal Pleistocene inferiore e in discordanza sui vari termini della pila tettonica sopra descritta, con le potenti successioni conglomeratiche del supersistema Eboli le quali segnano il passaggio da una sedimentazione marina a condizioni continentali, vale a dire, un sollevamento generalizzato di questo segmento di catena (Brancaccio et alii 1991, Cinque et alii, 1993).

La fascia esterna della piana è stata infine colmata, dal Pleistocene medio-superiore sino all’Olocene, da sedimenti fluviali e marini, soggetti ad un sollevamento più consistente, nel Pleistocene superiore (Cinque et al. 1988). La suddetta forte tettonica estensionale quaternaria si è accompagnata all’attività vulcanica dei Campi Flegrei e del complesso Somma-Vesuvio, responsabile della spessa coltre di vulcanoclastiti che ricoprono quasi ubiquitariamente i rilievi del territorio campano.

3.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO LOCALE

L'opera in progetto si sviluppa nel settore centro settentrionale della Piana del Sele, per una lunghezza di 8,8 km circa ed affiancherà la linea ferroviaria Salerno – Battipaglia nei pressi del comune di Pontecagnano.

Di seguito si descrivono le formazioni affioranti presso l'area di progetto, le quali si succedono dal basso verso l'alto secondo il seguente ordine stratigrafico:

3.2.1 Sub-unità della Piana del Sele (Settore Salerno – Pontecagnano – Battipaglia)

I depositi di questa Sub-unità rappresentano tutto il Pleistocene e l'Olocene e costituiscono le principali unità di paesaggio della Piana alluvionale e costiera del Sele. Questa sub-unità è costituita da due importanti supersintemi (supersistema Battipaglia-Persano; supersistema Eboli), da due unità sintemiche (sistema Campolongo; sistema Gromola) e da due unità litostratigrafiche (Travertini di Pontecagnano; unità di Ariano-Torrente Cornea), di cui seguono le descrizioni delle unità riscontrate nell'area di studio:

3.2.1.1 Supersistema Battipaglia – Persano (BP)

I sedimenti del supersistema occupano una posizione morfo-crono-stratigrafica compresa tra i conglomerati del supersistema Eboli (CE), a monte, ed i primi depositi tirreniani del sistema Gromola (GML), a valle. In relazione agli ambienti di sedimentazione la porzione più recente, di questo supersistema viene distinta nelle seguenti associazioni di litofacies, probabilmente fra loro eteropiche:

- **BPa)** Porzione deposta in ambiente di conoide alluvionale - Alternanze latero verticali di ghiaie sabbiose, sabbie e, subordinatamente, peliti sabbiose con frazione grossolana poligenica ed eterometrica proveniente dalle locali serie mesozoiche. Verso l'alto passano a sedimenti alluvionali sabbioso-limoso-argillosi con componente piroclastica e con frequenti episodi pedogenici intercalati. In sommità è spesso conservato un paleosuolo bruno scuro, ben strutturato, molto decalcificato ed argillificato. Spessore non inferiore a 30 m. (Tardo Pleistocene Medio-Pleistocene Superiore basale?);
- **BPb)** Porzione deposta in ambiente di piana costiera - Sedimenti sabbiosi e pelitici, eteropici di quelli della porzione precedente. Si tratta di complessi sabbioso ghiaiosi e sabbiosi di spiaggia e dune litorali (evidenti sono le tracce morfologiche di antichi cordoni litoranei disposte a quote intorno ai 25 m) alternati a complessi pelitici e pelitico-sabbiosi di laguna e/o stagno costiero con associati sedimenti sabbioso-pelitici di ambienti fluvio-palustri. Localmente sono intercalate lenti ghiaiose e sabbioso-ghiaiose di ambiente alluvionale. Spessore non inferiore a 30 m. (Tardo Pleistocene Medio-Pleistocene Superiore basale?);
- **BPc)** Depositi travertinosi (travertino di Faiano). Questi depositi, affioranti nell'area di Pontecagnano-Faiano, sono costituiti in gran parte da incrostazioni carbonatiche su supporti vegetali di varia natura (piante superiori, muschi, alghe e cianobatteri) e subordinatamente da

sabbie calcaree. Tali depositi formano corpi sedimentari terrazzati, la cui origine è da ricondursi ad acque scorrenti sovrassature in carbonato di calcio.

Al Supersintema Battipaglia-Persano è ascritta la seguente unità litostratigrafica:

3.2.1.2 Travertini di Pontecagnano (TPO)

Costituisce un'unità di tipo litostratigrafico rappresentata da un'associazione di litofacies travertinose formatesi in ambiente di piana fluvio-lacustre ed alluvionale s.l. Essa si colloca dal punto di vista cronostatigrafico tra il sintema Gromola e il sintema Campolungo; gli affioramenti sono rari e non sono esclusi possibili passaggi eteropici con i sedimenti ghiaioso-sabbiosi del sintema Masseria Acqua Santa. Questa unità si sviluppa esclusivamente in pianura (Pontecagnano) ed a tetto del Tufo Grigio Campano (TGC). La potenza, stimata per mezzo di alcuni sondaggi, non supera la ventina di metri. Tardo Pleistocene superiore-Olocene p.p.).

3.2.1.3 Sintema Campolungo (SLG)

I depositi di questo sintema costituiscono un prisma di sedimenti trasgressivi e progradazionali accrezionato sul fronte della Piana nel corso dell'Olocene, con spessore crescente da terra, dove sono ubicati i depositi più antichi, verso mare. Tale spessore è stimabile in circa 20 m all'altezza della costa attuale. Si tratta di una successione sedimentaria di depositi eolici, marino costieri, lagunari e palustri di età olocenica s.l., organizzati in più cicli sedimentari separati da discordanze di natura erosionale rappresentate da superfici di discontinuità connesse alle fasi trasgressivo-regressive responsabili della loro genesi. Il sintema è limitato a tetto dalla superficie topografica, con morfologie dunari ben conservate ed estese su tutta la piana costiera del Sele, da Paestum a Salerno. La base è rappresentata, nel sottosuolo, dalla superficie erosionale determinata dalla regressione tardo-wurmiana.

In definitiva, le associazioni di litofacies presenti nel sintema Campolungo possono essere così di seguito sintetizzate:

- **SLGd)** Sabbie eoliche medie e fini a luoghi rubefatte formanti un cordone dunare costiero potente pochi metri; verso il basso passano a sabbie fossilifere, a luoghi debolmente ghiaiose, di spiaggia s.l. e di spiaggia sommersa. Verso terra sono eteropiche di "e". Età compresa tra 2,5 ka ed il XX secolo.
- **SLGe)** Depositi pelitici caratterizzanti il riempimento di depressioni retrodunari: argille, argille-siltose, limi e sabbie fossilifere di ambiente lagunare con *Cardium spp.*, evolventi verso l'alto ad argille, limi e limi torbosi limno-palustri con rare e sottili intercalazioni di livelli sabbiosi (tempestiti?). Lo spessore complessivo non supera i 10 m. Sono particolarmente evidenti i rapporti di eteropia con gli altri sedimenti del sintema. Età compresa tra circa 9 ka e l'epoca moderna.

- **SLGb2)** Depositi colluviali sabbioso-limosi ricchi di sedimenti di suolo e di frazione organica; disposti lungo il margine interno della depressione retrodunare, mantellano i fianchi di deboli pendii o rivestono il fondo di vallecicole, dove comprendono rari e modesti episodi alluvionali debolmente ghiaiosi. Nel complesso sono eteropici dei sedimenti in facies lagunare e limno-palustre del sintema e presentano uno spessore massimo di alcuni metri. (Olocene).

3.2.2 Subunità delle Valli fluviali in destra del Sele (Fiumi Irno, picentino e Tusciano)

I depositi di questa subunità sono riferibili a tutto il Pleistocene e sono pertinenti le principali unità di paesaggio fluviali che caratterizzano indistintamente tanto la Piana del Sele come i settori vallivi solcanti il rilievo dei Monti Picentini. In particolare, nell'area di Piana dominano le più recenti facies fini alluvionali e marino-transizionali spesso eteropiche di facies esclusivamente di ambiente di piana costiera. Segue la descrizione dell'unità riscontrata nell'area di studio:

3.2.2.1 Sintema Masseria Acqua Santa (MQS):

Questo sintema caratterizza la complessa sedimentazione delle basse valli dei fiumi Irno, Picentino e Tusciano con passaggi eteropici a sedimenti detritico-alluvionali disposti al piede dei rilievi. Cronostratigraficamente i sedimenti si collocano a tetto del Tufo Grigio Campano (TGC), nel tardo Pleistocene sup.-Olocene inf. A valle la superficie-limite superiore di origine deposizionale scompare sotto i sedimenti del sintema Campolongo (SLG); nella zona del Tusciano, morfologicamente, essa dà luogo ad un corpo alluvionale che si incastra nel sintema Fasanara (NSR) e la cui base scende al di sotto del livello del mare attuale. Nelle valli del Picentino e dell'Irno, la superficie-limite superiore coincide o con la superficie dei conii detritico-alluvionali laterali o con le spianate dei terrazzi fluviali (almeno due ordini di cui uno ben evidente). La superficie limite-inferiore è una superficie erosiva impostata tanto sui depositi del substrato calcareo mesozoico locale e tanto sui depositi conglomeratici e travertinosi più antichi (BP, CE, GML e NSR) sospesi sul fondovalle. Nel complesso il sintema è composto da ghiaie e sabbie poligeniche fluviali s.l., con subordinati episodi pelitici. I conoidi alluvionali sono costituiti prevalentemente da ghiaie calcaree poligeniche fini supportate da matrice piroclastica, alternate a colluvioni vulcanoclastiche e sedimenti di suolo. Le falde detritiche sono composte prevalentemente da brecce stratoidi incoerenti a matrice piroclastica e con clasti calcarei centimetrici spigolosi. A luoghi nella successione si riscontrano livelli di corpi di frana s.l. del tipo *debris-mud-earth flows*. Sono eteropici di conglomerati e sabbie fluviali, colluvioni vulcanoclastiche, livelli limno-palustri, vulcanitici e di travertino nel sottosuolo. Nel complesso la potenza dei depositi di questo sintema, estrapolata mediante stratigrafie di sondaggi geognostici, si aggira mediamente intorno ai 20 m. (Tardo Pleistocene sup.-Olocene).

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 14 di 110

3.2.3 Unità ubiquitarie non completamente formate dell'area continentale:

3.2.3.1 Depositi alluvionali (b)

Sedimenti fluviali e alluvioni ghiaiose; sabbie, sabbie ghiaiose e/o limose e limi di fondovalle fluviale caratterizzanti le aree golenali dei principali corsi d'acqua (F. Irno, F. Picentino, F. Tusciano, T. Asa, T. Cornea, ecc.); a luoghi appaiono disposti in modesti, limitati e discontinui terrazzamenti in alveo o chiaramente re-incise. (Olocene).

In definitiva, il tracciato in progetto, al di sotto di eventuali terreni agricoli e/o di riporto antropico, intersecherà depositi alluvionali attuali e recenti, i depositi prevalentemente fini del Sintema Campolungo (SLGe), i depositi travertinosi (TPO) e quelli ascrivibili alle altre due associazioni di litofacies del supersintema Battipaglia – Persano (BP_a e BP_b) ed, infine, le prevalenti ghiaie calcaree del Sintema Masseria Acqua Santa (MQS_b).

3.3 INQUADRAMENTO MORFOLOGICO

L'opera in progetto si sviluppa lungo una zona pianeggiante, con quote comprese tra i 5 m s.l.m., in corrispondenza della fermata Arechi ed i 50 m s.l.m. in prossimità dell'Aeroporto.

La Piana del Sele, che, come già descritto nei paragrafi di inquadramento geologico, corrisponde alla parte continentale di una depressione che si prolunga all'interno del Golfo di Salerno, risulta circondata a monte dalle unità costituenti il margine occidentale della catena appenninica e comprende un'ampia fascia di costa tirrenica che va da Salerno sino alle colline di Agropoli.

Nell'ambito della piana del Sele, che presenta un'estensione totale di circa 300 km² ed una vaga forma triangolare, si possono distinguere differenti sottounità, che corrispondono a tre ordini di terrazzi fluviali, con due fasi litorali ed una di deiezione, rappresentata dalle ampie conoidi di Eboli e Battipaglia.

Il terrazzo di primo ordine, che occupa la parte posta a quote più elevate ed appare maggiormente smembrato dall'erosione, sigilla la prima fase di riempimento della depressione della piana del Sele.

Il terrazzo di II ordine si incastra in quello precedente e si prolunga verso la costa, sospeso a circa 15 metri di quota, sino al contatto con il cordone dunare "di Gromola" (il cui andamento è evidenziato da deviazioni brusche dei tracciati dei corsi d'acqua che solcano la piana).

Il terrazzo di III ordine, olocenico, comprende invece la parte prossima alla fascia costiera e borda con continuità il Sele sino in prossimità della costa e ad esso sono associate anche le vallecicole incise dai corsi d'acqua minori che discendono dalle alture collinari retrostanti.

Altri importanti corsi d'acqua che hanno contribuito alla crescita della piana del Sele sono, da nord verso sud, il Torrente Fuorni, il Fiume Picentino, i torrenti Asa e Rialto, il Fiume Tusciano, il Fosso Capodifiume (corso di risorgiva carico solo di soluzioni carbonatiche) ed il Fiume Solofrone.

Gran parte della piana è fittamente reincipisa, sia dai sopracitati corsi d'acqua maggiori che da numerose vallecicole di basso ordine gerarchico, poco profonde ed ampiamente svasate, che hanno origine sulla piana stessa.

3.4 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

L'area in esame, fa parte dell'ampio e complesso sistema idrogeologico della piana del Sele, i cui principali acquiferi di ricarica, caratterizzati da un'elevata infiltrazione efficace, sono costituiti dagli estesi e produttivi complessi delle successioni carbonatiche mesozoiche e paleogeniche della catena appenninica. Le portate in uscita dai massicci carbonatici della Regione, come sorgenti, ammontano a circa 70 m³/s, mentre i travasi sotterranei verso le piane sono di circa 27 m³/s.

Il deflusso verso la piana avviene secondo due direttrici preferenziali orientate NE-SW, le quali coincidono con due antichi coni di deiezione sepolti del Tusciano e del Sele.

Nell'area in esame, rientrando nella porzione NW della Piana del Sele, i sedimenti continentali di riempimento sono organizzati in modo da formare un'alternanza di terreni a diversa permeabilità che, nel loro insieme, costituiscono un acquifero multifalda, costituito quindi da sedimenti plio-quadernari molto eterogenei ghiaioso-sabbiosi e limo-argillosi tra loro eteropici.

Le Unità idrogeologiche individuate sono quindi le seguenti:

Depositi a permeabilità medio-alta: corpi sedimentari principalmente ghiaiosi, con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa da scarsa ad abbondante. Permeabilità, esclusivamente per porosità, compresa tra 10⁻⁵ e 10⁻³ m/s.

Depositi a permeabilità media: corpi sedimentari prevalentemente sabbiosi (con basso contenuto di frazione fine). Permeabilità, esclusivamente per porosità, compresa tra 10⁻⁶ e 10⁻⁵ m/s.

Depositi a permeabilità medio bassa: corpi sedimentari prevalentemente limoso-sabbiosi e sabbioso-limosi. Permeabilità, esclusivamente per porosità, compresa tra 10⁻⁷ e 10⁻⁶ m/s.

Depositi a permeabilità bassa: limi, limi argillosi e argille limose, in orizzonti di potenza significativa. Permeabilità molto bassa, compresa tra 10⁻⁹ e 10⁻⁷ m/s.

Depositi semirocciosi e a permeabilità variabile: Depositi travertinosi a grado di fratturazione ed alterazione variabile la cui permeabilità è da considerare secondaria e dipendente da questi fattori locali. In questa unità sono compresi i depositi di torba che, a seconda del grado di compattazione, possono presentare valori di permeabilità da elevati a molto bassi. Permeabilità da media a molto bassa, compresa tra 10⁻⁹ e 10⁻⁵ m/s.

4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

4.1 RISPOSTA SISMICA

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale F_0 , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale T_c^* ;
- per diverse probabilità di superamento durante la vita nominale dell'opera (V_N) e/o diversi periodi di ritorno T_R ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 45 e 1462 anni, estremi inclusi.

Pertanto, per individuare le corrispondenti azioni sismiche, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, occorre fissare:

- la vita di riferimento V_R della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento P_{VR} associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento V_R , T_R è esprimibile in funzione di P_{VR} mediante l'espressione:

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

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove V_N è la vita nominale dell'opera e C_U la classe d'uso.

Nel caso in esame, ai fini della definizione dell'azione sismica, i progettisti hanno assunto:

- per opere maggiori ed opere minori lungo linea (opere di protezione, muri di sostegno e ponti) e verifica di stabilità rilevati: $V_N = 75 \text{ anni}$
- per i fabbricati: $V_N = 50 \text{ anni}$
- per le nuove viabilità (passarelle, sottopassi e cavalcaferrovia): $V_N = 75 \text{ anni}$

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 18 di 110

Mentre per quanto riguarda la classe d'uso:

- per opere maggiori ed opere minori lungo linea (opere di protezione, muri di sostegno e ponti) e verifica di stabilità rilevati: Classe d'uso III (CU = 1.5);
- per i fabbricati: Classe d'uso IV (CU = 2.0);
- per le nuove viabilità (passarelle, sottopassi e cavalcaferrovia): Classe d'uso III (CU = 1.5);

Il periodo di riferimento VR si ottiene moltiplicando la vita nominale VN per il coefficiente d'uso CU. Pertanto, sulla base delle indicazioni NTC2018, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento VR pari a:

- $V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.5 = 112.5$ anni per opere maggiori ed opere minori lungo linea (opere di protezione, muri di sostegno e ponti) e verifica di stabilità rilevati;
- $V_R = V_N \times C_U = 50 \times 2.0 = 100$ anni per i fabbricati;
- $V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.5 = 112.5$ anni per le nuove viabilità (passarelle, sottopassi e cavalcaferrovia);

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido a_g , l'accelerazione di picco a_{max} è valutata sulla base della risposta sismica locale:

$$a_{max} = S_s \cdot S_T \cdot a_g$$

Dove S_s è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica, S_T è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica.

Nel seguito viene definita la categoria di sottosuolo e le azioni sismiche di progetto.

4.1.1 Categoria di sottosuolo

La classificazione della categoria di sottosuolo viene eseguita sulla base delle condizioni stratigrafiche e del valore equivalente di velocità di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s) nei primi 30 m di profondità, definita dall'espressione:

$$V_{Seq} = V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

- ✓ h_i = spessore dell'i-esimo strato;
- ✓ $V_{S,i}$ = valore di velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

- ✓ N = numero di strati;
- ✓ H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per la definizione della categoria di sottosuolo sismica, in accordo alla normativa vigente sono state eseguite indagini sismiche finalizzate alla determinazione della $V_{s,eq}$, in particolare sono state eseguite prove sismiche di tipo Down-Hole e MASW.

Le indagini eseguite per il progetto mostrano come la stratigrafia delle aree di progetto sia genericamente costituita da alternanze di depositi di natura alluvionale, prevalentemente fini, con granulometria variabile dalle argille alle sabbie, intervallate da letti di materiale ghiaioso di spessore anche significativo.

I risultati ricavati dalle prove geofisiche in termini di valore equivalente di velocità di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ sono riportati in Tabella 4-1 con le categorie di suolo corrispondenti. Le prove sono riportate in ordine di posizione progressiva.

Sulla base di quanto osservato, sono state individuate tre sezioni della linea in progetto per la definizione della categoria di suolo della zona attraversata dal tracciato di interesse (le progressive si riferiscono alla linea di nuova costruzione):

- **Sezione 1** (da pk -0+65 a pk 0+822): cautelativamente **categoria di sottosuolo C** (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s);
- **Sezione 2** (da pk 0+822 a pk 4+722): cautelativamente **categoria di sottosuolo E** (terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m).+
- **Sezione 3** (da pk 4+722 a pk 8+811): **categoria di sottosuolo C** (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s).

Tabella 4-1. Risultati delle prove geofisiche in termini di $V_{s,eq}$ e loro categorie di sottosuolo

Tratto	Prova	Data di esecuzione	$V_{s,eq}$ (m/s)	Tipo di suolo
Sezione A1	MASW BH1	2020	270	C
	MASW 1	2019	392	B

Tratto	Prova	Data di esecuzione	VS,eq (m/s)	Tipo di suolo
(da pk -0+65 a pk 0+822)	MASW BH3	2020	259	C
Sezione A2 (da pk 0+822 a pk 4+722)	MASW 2	2019	346	E
	MASW 3	2019	324	C
	MASW 4	2019	356	E
	MASW 5	2019	375	B
	MASW 6	2019	336	E
	MASW 7	2019	334	E
	DH_13	2020	343	C
	MASW8	2019	313	E
Sezione A3 (da pk 4+722 a pk 8+811)	S3_DH (pk 63+703)	2002	229	C
	MASW 9	2019	292	C
	DH_16	2020	258	C
	MASW BH15	2020	266	C
	DH_19	2020	270	C
	MASW 10	2019	271	C
	MASW BH20	2020	262	C
	MASW 11	2019	267	C
	S3_DH (pk 66+406)	2002	191	C
	DH_23	2020	256	C
	MASW 12	2019	275	C
	DH_24	2020	231	C

Lungo il tracciato i valori delle velocità delle onde di taglio identificano quindi terreni di **tipo B, C e E**.

Nel seguito si definiscono le azioni sismiche di progetto considerando le categorie di sottosuolo precedentemente individuate.

Suolo	Descrizione geotecnica
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO						
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 21 di 110	

Suolo	Descrizione geotecnica
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

I coefficienti S_s per le categorie di sottosuolo C e E si ottengono dalle seguenti espressioni (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_s = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.50 \quad (C)$$

$$S_s = 1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.60 \quad (E)$$

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, il tracciato di progetto si colloca su superficie sostanzialmente pianeggiante (cat. T1 - Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, in accordo alla Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 22 di 110

4.1.2 Stati limite e probabilità di superamento

L'azione sismica di progetto va quindi determinata in funzione degli Stati Limite di verifica e delle corrispondenti probabilità P_{VR} di realizzarsi nel periodo di riferimento V_R .

Gli Stati Limite di riferimento per verifiche in presenza di sisma sono quelli definiti nelle NTC2018 al par. 3.2.1.

Nel caso in esame, i valori di periodo di ritorno dell'azione sismica e le probabilità di superamento per i diversi Stati Limite sono mostrati in Tabella 4-2.

Tabella 4-2 – Periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto per i diversi stati limite

Stato limite di riferimento		Probabilità di superamento P_{VR}	Periodo di ritorno dell'azione sismica T_R		
			opere lungo linea (opere di protezione, muri di sostegno e ponti)	fabbricati	viabilità (passarelle, sottopassi e cavalcaferrovia)
Stati limite di esercizio (SLE)	Stato limite di immediata operatività (SLO)	81%	68	60	68
	Stato limite di danno (SLD)	63%	113	101	113
Stati limite ultimi (SLU)	Salvaguardia della vita umana (SLV)	10%	1068	949	1068
	Stato limite di prevenzione del collasso (SLC)	5%	2193	1950	2193

4.1.3 Accelerazione di riferimento su suolo rigido a_g

Per definire l'azione sismica lungo il tracciato sede delle opere in progetto, sono stati individuati 2 punti di interesse in corrispondenza di inizio e fine tracciato (P1 e P2). In Tabella 4-3, si sono riportati le coordinate dei punti di interesse per i quali vengono definiti i valori della pericolosità sismica di base.

Il confronto fra i valori del parametro a_g per i diversi stati limite di Tabella 4-4 mostra come la variabilità dell'input sismico lungo l'estensione del tracciato sia bassa. Pertanto, si è assunto quale riferimento per la definizione della pericolosità sismica per tutta l'estensione dell'opera, il punto P2 (fine tracciato), in quanto di pericolosità leggermente superiore.

Tabella 4-3 – Nodi del reticolo di riferimento nell'intorno del sito di progetto. Elaborazione da foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v. 1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009.

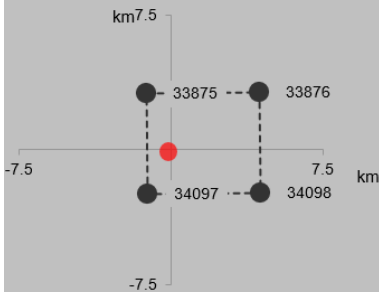
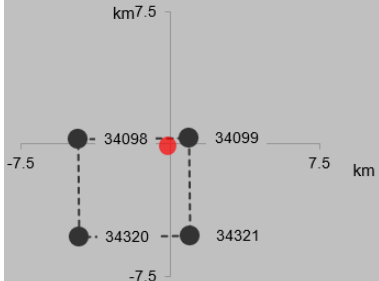
Nome di sito	Latitudine	Longitudine	Localizzazione punti di griglia
P1 (inizio tracciato)	40.648988	14.821829	
P2 (fine tracciato)	40.622704	14.927988	

Tabella 4-4 – Valori di a_g per gli stati limite di riferimento per i siti di progetto (ottenuti mediante il foglio di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3.xls, CSLLPP (2009)) per $V_R = 50$ anni.

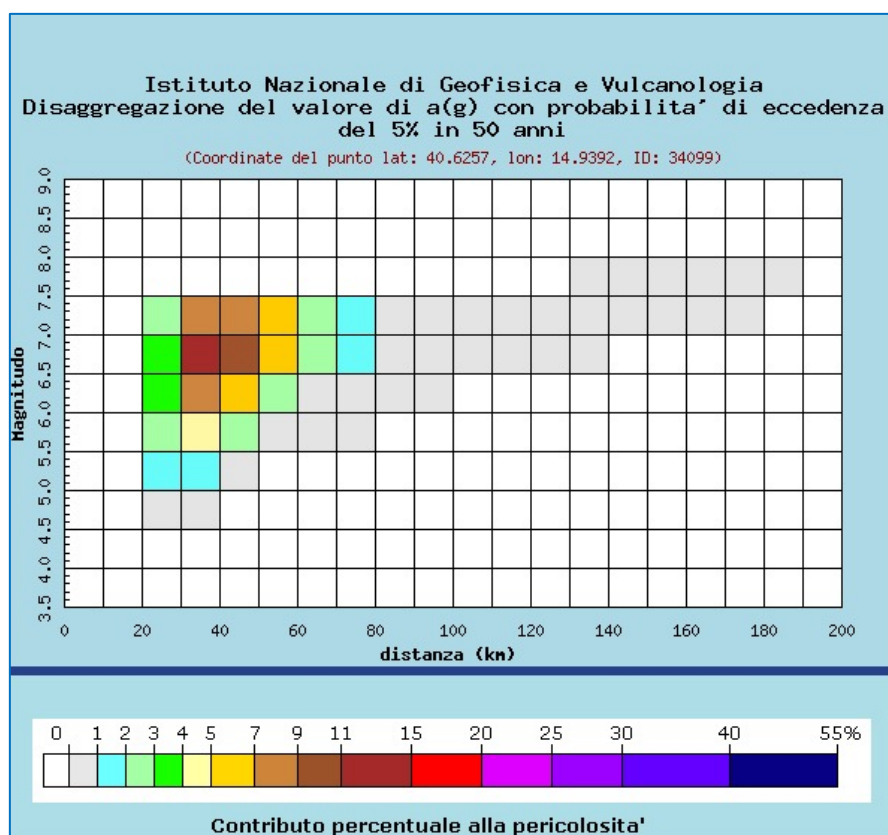
SL	TR (anni)	ag (g)	
		Punti di interesse	
		P1	P2
SLO	68	0.052	0.052
SLD	113	0.063	0.063
SLV	1068	0.126	0.132
SLC	2193	0.151	0.160

4.2 MAGNITUDO

Per la definizione del valore di magnitudo di riferimento per le verifiche a liquefazione, può essere considerata l'analisi di disaggregazione dei valori di pericolosità sismica (accelerazione su suolo rigido orizzontale) di cui alle NTC2018, fornita quale elaborazione aggiuntiva direttamente dal progetto INGV-DPC S1 (vedi Figura 4.1) qui considerata per il punto P2 (fine tracciato).

La valutazione del potenziale di liquefazione è stata condotta per il periodo di ritorno dell'azione sismica più prossimo a quello dello stato limite ultimo di verifica (SLV). I risultati di tale analisi, svolta per il punto di griglia più prossimo al sito di progetto (N. 34099) per un periodo di ritorno di 975 anni (probabilità di superamento di 5 % in 50 anni) mostrano come siano dominanti terremoti con valori di magnitudo compresi tra 6-7.5 ed epicentro a distanza 30-60 km. I valori medi di magnitudo e distanza da analisi di disaggregazione sono rispettivamente $M=6.67$ e $d=44.5$ km.

Figura 4.1 – Analisi di disaggregazione del dato di pericolosità per il punto di griglia 34099 (per $T_R = 475$ anni), da elaborazioni DPC-INGV S1 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>)



Sulla base della sismicità storica, la magnitudo di riferimento da considerare risulta generalmente più elevata. Tenendo conto dei terremoti con maggiore risentimento nell'area di progetto (cfr. paragrafi precedenti) è ragionevole assumere, una magnitudo di riferimento per la verifica a liquefazione pari a **6.8**.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 25 di 110

5 INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE

5.1 PREMESSA

Nel seguente capitolo verranno riepilogate le campagne geognostiche utilizzate per la definizione dei parametri geotecnici.

Verranno inoltre descritte nel dettaglio le indagini in sito e le prove di laboratorio eseguite nelle suddette campagne d'indagine.

Per l'ubicazione planimetrica dei sondaggi si rimanda alla specifiche tavole di progetto.

5.2 CAMPAGNE GEOGNOSTICHE PROGETTO DEFINITIVO

Per la caratterizzazione geotecnica del tracciato di interesse sono state prese in considerazione le seguenti indagini geognostiche eseguite nel periodo gennaio-maggio 2020 dalle imprese SOCOTEC ITALIA S.r.l. di Milano e SGAILAB – Laboratori e Ricerche S.r.l. di Morciano di Romagna (RN), comprendenti:

- n. 26 sondaggi a carotaggio continuo, realizzati sino a profondità massima di 50 m da p.c.;
- n.1 sondaggio a distruzione di nucleo, realizzato sino alla profondità di 15 m da p.c. con l'installazione di un piezometro Casagrande;
- n. 2 prove penetrometriche CPTu/ DPSH e n. 1 prova penetrometrica statica CPTu;
- 1 prova pressiometrica di tipo Menard;
- n. 5 prove geofisiche MASW e n. 9 prove geofisiche Down Hole nei sondaggi precedentemente eseguiti;
- n. 14 prove geosismiche HVSR.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

- rilievo stratigrafico con descrizione della litologia e della consistenza dei terreni e documentazione fotografica con foto a colori delle cassette;
- esecuzione di prove S.P.T. (Standard Penetration Test);
- esecuzione prove di permeabilità tipo Lefranc;
- rilievo del livello piezometrico;
- installazione di 17 piezometri per il monitoraggio della falda;
- strumentazione dei sondaggi per realizzazione prove geofisiche;
- prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per prove di laboratorio.

La seguente tabella riporta le principali caratteristiche delle indagini considerate.

Tabella 5-1. Riepilogo sondaggi eseguiti

Sond.	Lunghezza [m]	Camp. Ind. [n°]	Camp. Riman [n°]	S.P.T. [N]	Prove Lefranc	Piez.	DH	Metodo perf ⁽¹⁾
BH1	22.5	4	2	7	2	x		CC
BH2	30	4	4	8	2	x		CC
BH3	30	4	4	9	2	x		CC
BH4	30	4	3	7	2	x		CC
BH5	50	3	2	8	2	x		CC
BH6	50	-	-	-	-		x	CC
BH7	40	5	4	8	2	x		CC
BH8	50	8	4	8	2		x	CC
BH9	30	2	6	7	2	x		CC
BH10	30	2	6	10	2	x		CC
BH11	50	-	9	8	2	x		CC
BH12	50	1	-	-	-		x	CC
BH13	30	2	6	8	2		x	CC
BH14	30	8	10	-	2	x		CC
BH15	40	7	2	9	2	x		CC
BH15bis	15	-	-	-	-	x		DN
BH16	40	8	-	10	2		x	CC
BH17	30	8	-	8	2	x		CC
BH18	50	-	-	-	-	x		CC
BH19	50	8	3	7	2		x	CC
BH20	30	7	-	9	2	x		CC
BH21	50	9	2	9	2	x		CC
BH22	50	-	-	-	-		x	CC
BH23	30	8	-	11	2		x	CC
BH24	30	8	-	10	2		x	CC
BH25	30	8	-	10	2	x		CC

⁽¹⁾CC = Carotaggio Continuo; DN = a Distruzione del Nucleo

5.3 CAMPAGNE GEOGNOSTICHE PFTE

Al fine della caratterizzazione geotecnica dei terreni e soprattutto della definizione della successione stratigrafica, sono state prese in considerazione anche le indagini geognostiche utilizzate nell'ambito della fase di Fattibilità Tecnica ed Economica del progetto. Esse comprendono:

- n. 12 prove penetrometriche sismiche;
- n. 12 prove MASW ed HVSr.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 27 di 110

5.4 CAMPAGNE GEOGNOSTICHE STORICHE ANNI 2000-2002

Le indagini geognostiche disponibili da bibliografia eseguite in passato nelle medesime aree e nell'ambito dei seguenti progetti:

- “Completamento della Metro di Salerno”, progetto Italferr, anno 2000;
- “Soppressioni passaggi a livello della linea Napoli-Potenza”, progetto RFI, anno 2002;
- Banca dati ISPRA - Stratigrafie dei pozzi.

Nel complesso, si hanno a disposizione le seguenti indagini geognostiche:

- 17 sondaggi a carotaggio continuo;
- 2 prove penetrometriche statiche CPT;
- 1 prova penetrometrica statica sismica SCPT;
- 2 prove sismiche down-hole.

In particolare di queste indagini sono stati recuperati i certificati stratigrafici dei sondaggi con i risultati delle prove SPT e i risultati delle prove di laboratorio effettuate sui campioni prelevati (documento NN1R 00 F 69 SG GE0005 001 A del PFTE).

Le relative ubicazioni delle suddette indagini sono illustrate sull'elaborato: “Carta geologica e profilo geologico” con codifica: NN1R 00 F 69 NZ GE0001 001 A del PTFE.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 28 di 110

5.5 PROVE IN SITO

Nei seguenti paragrafi verranno riassunte le prove eseguite durante la realizzazione della campagna geognostica relativa al Progetto Definitivo.

5.5.1 Analisi stratigrafica

I sondaggi a carotaggio continuo sono stati eseguiti a rotazione con il metodo classico ad aste e carotiere. Le carote estratte nel corso della perforazione sono state sistemate in apposite cassette catalogatrici munite di scomparti divisorii e coperchio apribile di dimensioni 5 m x 1 m. Su ogni cassetta è indicato il committente, il cantiere, la profondità, ed il codice del sondaggio e ogni cassetta è fotografata (Figura 5.1). I primi 5m di ogni sondaggio sono stati eseguiti “a secco” (sondaggi tipo ambientale). Per ogni sondaggio è presente un report riepilogativo, come indicato in Figura 5.2.

Figura 5.1 – Esempio di cassetta catalogatrice per le carote estratte (BH1)



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	NN1X	01 D 78	RG	BA0000 012	B	29 di 110

Figura 5.2 – Estratto di report sondaggio (BH1)

SOCOTEC ITALIA SRL AVELLINO DEPARTMENT Via Campo di Fiume, 13 – 83030 Montefredane (AV) Tel.: +39 0825 24353 - Fax.: +39 0825 248705 SOCOTEC ITALIA Srl – P.Iva 01872430648 Headquarters: Via Bariola, 101-103 - 20020 Lainate (MI) Tel.: +39 02 9375 0000 - Fax: +39 02 9375 0099 www.socotec.it		 SOCOTEC			
SONDAGGIO BH1		R.d.P. n° SA-20-0240 Del 15/05/20			
Committente: ITALFERR S.P.A.					
Oggetto Lavoro: A.Q. n. 200001236 . Ord. 100038051 -"esecuzione di indagini geognostiche per il progetto definitivo del "Prolungamento della Metropolitana di Salerno"					
Commessa n°: NN14.1D01.A01		Vebrale di Accettazione n° -			
Località: Loc S. Leonardo (SA)		Data esecuzione sondaggio: 09/04/2020 al 15/04/2020			
Coordinate WGS84 : 485209,729 E - 4499743,817 N		Quota (m.s.l.m): 6,191			
Coordinate Gauss-Boaga: 2505214,184 E - 4499752,695 N					
Campione Rimaneggiato:	Cr1,2...	Prova Pressiometrica:	 Pozzetto carrabile e terminale di protezione	 S.P.T. (Punta chiusa)	PC
Campione Indisturbato Shelby:	SC1,2...	Prova Dilatometrica:	 Piezometro a tubo aperto:	 S.P.T. (Punta aperta)	PA
Campione Indisturbato Denison -Mazler:	MC1,2...	Prova Lugeon:	 Tubo in PVC per Down-hole:	 Quota falda iniz.	
Campione Indisturbato Osterberg:	OC1,2...	Prova Lefranc:	 Cella casagrande:	 Quota falda finale	

Profondità p.c. (m)	Potenza strati (m)	Simbologia	Consistenza		DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	Indice di carotaggio		Prelievo campioni		Prove in foro		Installazione in foro		Falda quota (m dal p.c.)	Dati foro	
			Pocket σ (kg/cm ²)	Vane Test Cu (kg/cm ²)		% carot.	RQD	Modalità	Profondità (m)	S.P.T. prof. (m p.c.)	N° Colpi	Schema	Utensile perforazione		Rivestimento Foro	
1,60	1,60				Terreno di riporto costituito da sabbie piroclastiche con ciottoli e resti di laterizi											
3,00	1,40		2,00 2,50	0,40 0,30	Limi sabbiosi di colore marrone con pomici millimetriche talora presenti, poco moderatamente consistenti. Poco umidi			SC1	2,60-3,10							
4,20	1,20		0,70 1,10	0,25 0,30	Limi e limi argillosi di colore marrone, moderatamente consistenti. Umid											
5,10	0,90		1,30 1,90	0,40 0,45	Limi argilloso-sabbiosi moderatamente consistenti di colore marrone scuro. Umid											
			0,90	0,30	Limi argillosi da poco a moderatamente consistenti di colore marrone scuro moderatamente plastici. Umid			SC2	6,00-6,60							

I risultati di tutti i sondaggi geognostici eseguiti sono riportati nei documenti NN1X00D69SGGE0005001A (sondaggi dal 1 al 13) e NN1X00D69SGGE0005002A (sondaggi dal 14 al 26).

5.5.2 Prove SPT

Lo Standard Penetration Test, o SPT, è il test in situ più utilizzato come indicatore della densità e della compressibilità dei terreni granulari. Viene anche comunemente usato per verificare la consistenza dei suoli coesivi rigidi o pietrosi e delle rocce deboli e completamente fratturate. Questo test consiste nel condurre un campionatore standard da 50 mm di diametro esterno a parete spessa nel terreno sul fondo di un foro di trivellazione, usando colpi ripetuti di un martello da 63,5 kg che cade da un'altezza di 760 mm. Il valore SPT N (Nspt) è il numero di colpi richiesti per raggiungere una penetrazione di 300 mm, dopo un azionamento iniziale della sede di 150 mm.

Figura 5.3 – Riepilogo dati N_{SPT} grezzi in funzione della profondità

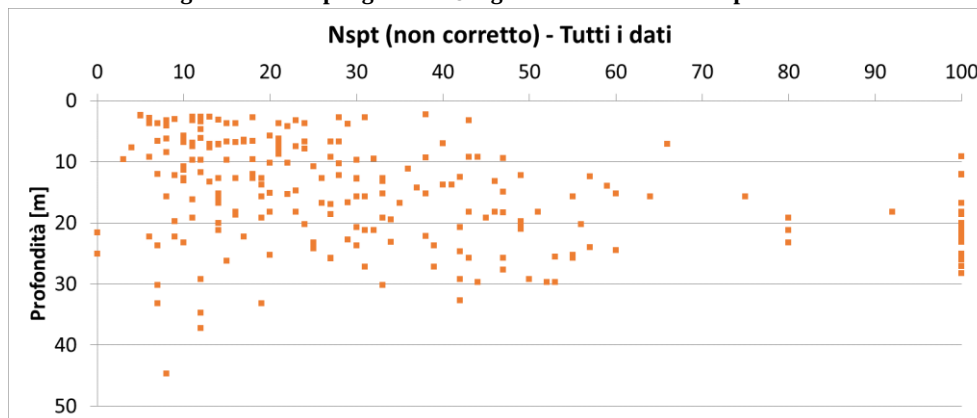
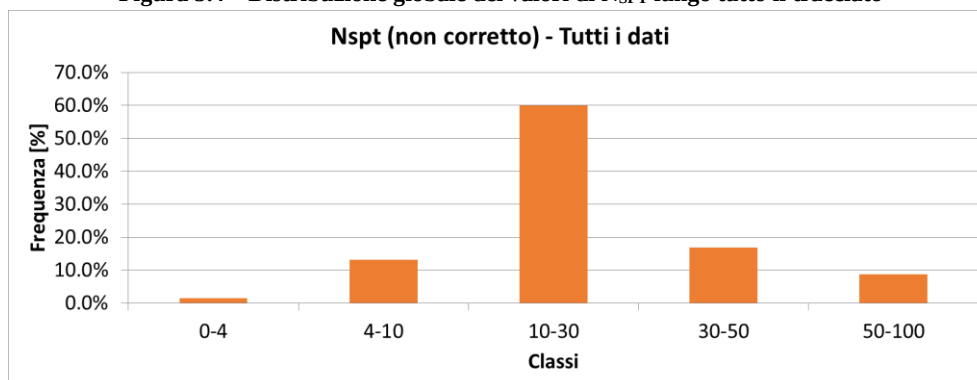


Figura 5.4 – Distribuzione globale dei valori di N_{SPT} lungo tutto il tracciato



5.5.3 Prove CPTU

La prova penetrometrica statica CPTU consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta elettrica dotata di piezocono, di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($V = 2 \text{ cm/s} \pm 0.5 \text{ cm/s}$), i cui dati vengono registrati ogni 2 cm di avanzamento. La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta, un penetrometro Pagani da 200 kN di spinta massima montato su sottocarro cingolato, che agisce su una batteria di aste (aste cave con il cavo di trasmissione dati all'interno) alla cui estremità inferiore è collegata la punta con piezocono.

5.5.4 Prove di permeabilità Lefranc

Sono state eseguite prove di permeabilità Lefranc a carico variabile data la natura dei terreni prevalentemente a grana fine-media. La prova è destinata a misurare la conducibilità idrica del terreno; a seconda della geometria realizzata in corrispondenza del tratto di foro prescelto e quindi della direzione del flusso che si instaura durante la prova, la permeabilità misurata sarà quella orizzontale (K_h), quella verticale (K_v) o una media tra le due ($K_h \cdot K_v$). Il coefficiente di permeabilità K (m/s) può essere determinato utilizzando la seguente formula:

$$K = A / (F \cdot T)$$

dove:

- ✓ A = area della sezione trasversale del foro al livello dell'acqua, cioè la sezione del rivestimento (m^2)
- ✓ F = fattore di forma che dipende dalla geometria della prova (m);
- ✓ T = tempo di riequilibrio (basic time-lag) (s)

La seguente tabella riepiloga i risultati delle prove di permeabilità in foro eseguite durante le perforazioni dei sondaggi (CV – prove Lefranc a carico variabile).

Tabella 5-2 – Riepilogo risultati prove Lefranc

Sondaggio	Profondità prova [m da pc]	k [m/s]	Sondaggio	Profondità media [m da pc]	k [m/s]
BH1	2.7	2.76E-06	BH14	3.25	1.32E-05
	8.7	1.14E-05		6.25	7.79E-06
BH2	2.8	1.37E-05	BH15	4.75	9.13E-07
	8.8	6.21E-06		10.25	1.46E-06
BH3	2.7	1.33E-06	BH16	3.5	9.06E-07
	9.0	5.60E-08		8.5	1.07E-07
BH4	3.0	1.54E-07	BH17	4	2.44E-06
	9.3	1.02E-06		7.5	3.96E-06
BH5	5.6	1.34E-06	BH19	4.5	2.75E-06
	10.3	2.67E-06		20	2.32E-06
BH7	4.3	7.07E-08	BH20	2.75	8.82E-06
	5.8	5.62E-06		8.75	5.30E-06
BH8	3.1	1.23E-06	BH21	4.75	1.20E-07
	8.7	1.33E-05		19.75	9.90E-08
BH9	2.8	1.79E-06	BH23	2.7	3.03E-06
	4.8	8.16E-07		8.7	4.82E-06
BH10	3.3	7.92E-06	BH24	3.3	4.37E-06
	8.8	1.07E-05		7.0	9.99E-07
BH11	5.8	4.17E-06	BH25	2.8	3.72E-07
	20.8	1.66E-05		5.7	8.68E-06
BH13	2.75	2.17E-07			
	8.75	1.46E-04			

5.5.5 Prove carico su piastra

La prova di carico su piastra è una tecnica di indagine non distruttiva che consente di determinare le proprietà di resistenza e il cedimento verticale di una determinata massa di terreno in sito. La resistenza viene valutata caricando il terreno con una piastra rigida circolare di diametro pari a 300 mm, e registrando, in un solo ciclo, sia il carico indotto che il corrispondente cedimento. Una indicazione della capacità portante del terreno, convenzionalmente,

può essere data dal modulo di deformazione M_d (Modulo di Young).

Tabella 5-3 – Riepilogo prove carico su piastra

Sondaggio	Coordinate WGS 84		Prof prova	M_d	M'_d
	Est	Nord	[m]	[MPa]	[MPa]
PZ2	486580.00	4499238.00	0.5	21	214
PZ3	491032.00	4498093.00	0.5	22	143
PZ4	493560.00	4497075.00	0.5	22	214
PZ5	493642.00	4496977.00	0.5	21	600

5.5.6 Prove pressiometriche Menard

La prova pressiometrica consiste nel misurare le deformazioni radiali provocate da una sonda cilindrica dilatabile inserita in foro di sondaggio e soggetta ad incrementi di pressione interna.

La sonda è inserita in un foro delle stesse dimensioni della sonda, per fornire una prova su un terreno quasi indisturbato.

La prova viene eseguita imponendo incrementi di carico mantenuti costanti per 60" e con letture intermedie a 30", misurando le dilatazioni della sonda e, quindi, le corrispondenti deformazioni volumetriche del terreno.

Le pressioni vengono lette in superficie da manometri di precisione dotati di scale differenziate, mentre le deformazioni vengono rilevate da un sistema volumetrico.

Ciascuno dei 10 incrementi costanti di pressione è mantenuto per un minuto e le misure di deformazione volumetrica sono registrate ad intervalli di 15, 30 e 60 secondi. La prova si conclude quando il volume iniettato durante la prova è pari a quello iniziale del foro.

Tabella 5-4 – Risultato dell'unica prova pressiometrica di tipo Menard eseguita

Sondaggio	Prof prova pressiometricaa [m]	Pressione limite PI [kPa]	Pressione limite netta P'I [kPa]	Modulo pressiometrico Ep [KPa]	Modulo di Young E [kPa]	Coesione non drenata Cu [kPa]
BH21	25	6500	5777	263051	398562	578

5.5.7 Indagini sismiche

Dalle indagini sismiche è stata determinata la velocità delle onde di taglio per la classificazione sismica ($V_{s,eq}$), utilizzata nel precedente capito per l'analisi sismica.

Tabella 5-5. Ubicazione e risultati delle prove per le indagini sismiche effettuate in fase di Progetto Definitivo (2020)

Prova	Data esecuzione	Coordinate UTM Zone 33 N		Vseq (m/s)	Categoria di Suolo
		E	N		
Masw_BH1	Febbraio 2020	485196.53	4499661.53	270	C
Masw_BH3	Febbraio 2020	486025.30	4499361.56	259	C
Masw_BH15	Febbraio 2020	490999.97	4498108.17	266	C
Masw_BH20	Febbraio 2020	492328.19	4497520.87	262	C
Masw_BH26	Febbraio 2020	483442.59	4501053.14	280	C
DH_6	Marzo 2020	486717.12	4499231.53	310	C
DH_8	Aprile 2020	486956.25	4499194.66	317	C
DH_12	Marzo 2020	488733.2	4499096.45	389	B
DH_13	Febbraio 2020	489298.47	4498860.68	343	C
DH_16	Febbraio 2020	491011.42	4498279.27	258	C
DH_19	Febbraio 2020	491708.79	4497812.38	270	C
DH_22	Maggio 2020	492653.58	4497374.83	240	C
DH_23	Febbraio 2020	493075.93	4497375.86	256	C
DH_24	Febbraio 2020	493463.04	4497057.17	231	C

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 34 di 110

5.6 PROVE DI LABORATORIO

Sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna geognostica in esame sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio sulle terre (laboratorio: SOCOTEC Srl: Centro Geotecnico Ingegneristico di Intervento e di Controllo sulle Strutture e sul Territorio, di Lainate, MI e SGAILAB – Laboratori e Ricerche S.r.l. di Morciano di Romagna, RN):

- Apertura del campione e descrizione;
- Determinazione caratteristiche fisiche e indici
- Analisi granulometrica
- Limiti di Atterberg
- Prove di taglio diretto
- Prove triassiali (drenate e non drenate)
- Prova edometrica

Complessivamente sono state effettuate le seguenti prove con i campioni prelevati durante la campagna relativa al Progetto Definitivo:

- Prova di taglio diretta: 39
- Prova Triassiale UU 23
- Prova Triassiale CID 18
- Prova edometrica: 15

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 35 di 110

6 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA GENERALE

6.1 PREMESSA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica generale del tracciato in esame, valutata sulla base dell'interpretazione di tutte le indagini geotecniche svolte in sito ed in laboratorio.

Dopo aver individuato le principali unità geotecniche intercettate lungo il tracciato, verranno interpretati i risultati delle indagini geotecniche sulla base dei criteri di seguito esposti e quindi verranno definiti i parametri geotecnici di progetto e la stratigrafia di riferimento sia lungo il tracciato, sia per le principali opere d'arte.

Nel profilo stratigrafico longitudinale (documenti dal NN1X.01.D.78.L6.BA0000.013 al NN1X.01.D.78.L6.BA0000.015) sono riportati in forma grafica i risultati delle indagini e sono mostrate le correlazioni stratigrafiche con indicazione delle unità geotecniche intercettate; è anche indicato l'andamento del livello di falda massimo rilevato da letture piezometriche con i dati aggiornati fino al 27/07/2020.

6.2 RICONOSCIMENTO DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Lungo il tracciato della Linea in esame, dalle indagini eseguite sono state intercettate le seguenti unità geologiche, già definite in precedenza e qui di seguito elencate a cui corrispondono due o più unità geotecniche di riferimento.

Unità geologica	Descrizione	Unità geotecnica di riferimento
-	Coltre vegetale e materiale antropico	Riporto, R
MQS: Sintema Masseria Acqua Santa	Ghiaie e sabbie fluviali. Ghiaie calcaree poligeniche fini con matrice piroclastica alternate a colluvioni vulcanoclastiche. Spessore medio 20m.	Sabbia, S
		Ghiaia, G
TPO: Travertini di Pontecagnano	Depositi fluvio-lacustri e travertini stratoidi da medi a fini. Non si escludono possibili passaggi eteropici con MQS, spessore medio 20m.	Argilla, A
		Limo, L
		Sabbia, S
		Ghiaia/ciottoli/travertini, G
BPa: Supersintema Battipaglia – Persano	Alternanze di ghiaie sabbiose, sabbie e peliti sabbiose. Spessore non inferiore a 30m.	Limo, L
		Argilla, A
		Sabbia, S
BPb: Supersintema Battipaglia – Persano	Complessi sabbioso-ghiaiosi e sabbia di spiaggia e dune litorali alternati a complessi pelitici e pelitici sabbiosi di laguna. Spessore non inferiore a 30m.	Sabbia, S
		Ghiaia, G

Per quanto riguarda le unità geotecniche, data la ricorrenza della medesima tipologia di materiale all'interno delle diverse unità geologiche, si è deciso di procedere ad una classificazione sulla base della granulometria e dei risultati delle prove penetrometriche (SPT); sulla base dei nuovi dati raccolti si mantiene la classificazione geotecnica indicata nel Progetto di Fattibilità Tecnico Economica, in cui si distinguevano le seguenti sub-unità geotecniche:

- **Argilla (A)**
 - Di scarsa consistenza (A1)
 - Di media consistenza (A2)
- **Limo (L)**
 - Di scarsa consistenza (L1)
 - Di media consistenza (L2)
 - Di elevata consistenza (L3)
- **Sabbia (S)**
 - Sabbia media (S)
 - Sabbia limosa (SL)
- **Ghiaia (G)**
 - Ghiaia e sabbia (G/S)

A seguito dell'interpretazione delle prove geotecniche in sito e dell'elaborazione dei risultati delle prove di laboratorio si procederà pertanto alla definizione delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle unità geotecniche. Le principali caratteristiche delle unità geotecniche intercettate, si presentano praticamente omogenee (nell'ambito della normale variabilità geotecnica) lungo tutto lo sviluppo del tracciato.

Si ricorda che la massima profondità investigata è 50.0 m in corrispondenza delle opere maggiori; le principali unità geotecniche che caratterizzano il tracciato sono quelle definite in precedenza, tuttavia si indica la presenza puntuale delle seguenti unità geotecniche che sono state comunque assimilabili alle unità geotecniche principali: Argille torbose (rinvenute in BH21 e BH22) e Argille Marnose (rinvenute nei sondaggi BH5 – BH6 – BH7 – BH8). Di queste ultime formazioni non si è proceduta ad una caratterizzazione specifica per mancanza di disponibilità di prove di laboratorio/in situ a loro dedicati.

6.3 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE

I criteri di interpretazione delle indagini geotecniche, descritti di seguito, tengono conto del fatto che:

- sono state eseguite prove dinamiche SPT;
- sono disponibili risultati di prove CPT;
- sono stati prelevati campioni rimaneggiati ed indisturbati ed effettuate prove di laboratorio;
- sono state eseguite indagini sismiche (Down Hole e Masw) per il rilievo delle velocità delle onde di taglio Vs.

Di seguito si indicano le correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici; i parametri stimati tramite formulazioni saranno poi confrontati con i risultati delle prove di laboratorio al fine di identificare il rango di valori che definiscono le caratteristiche di resistenza e deformabilità di ciascun materiale lungo il tracciato. In corrispondenza delle opere maggiori, si definiranno parametri specifici tenendo in conto dei risultati ottenuti dalle prove in-situ e di laboratorio dei sondaggi nell'area in esame.

6.3.1 Depositi incoerenti

Per i depositi prevalentemente incoerenti, i parametri geotecnici di resistenza al taglio e di deformabilità possono essere stimati sulla base dell'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

6.3.1.1 Densità relativa

Sono stati considerati i valori minimi di densità relativa ottenuti dalle varie correlazioni che di seguito vengono espresse.

Correlazione di Gibbs e Holtz

In accordo a quanto indicato da Gibbs e Holtz (1957) la densità relativa D_R può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente espressione:

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{(17 + 24 \cdot \sigma'_{v0})}}$$

Dove:

- ✓ σ'_{v0} è da dividere per 100 se si lavora in kPa

Usualmente si adotta la correlazione di Gibbs e Holtz valida per sabbie pulite da fini a grossolane, quarzose NC, non cementate, moderatamente compressibili, per qualunque valore di pressione efficace. Nel caso di depositi ghiaiosi il valore di DR (%) viene sovrastimato, nel caso di depositi limosi viene sottostimato. In presenza di ghiaia, il valore di $NSPT$ deve essere preso con grande cautela.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 38 di 110

Correlazione di Terzaghi & Peck

In accordo a quanto indicato da Terzaghi e Peck (1948) la densità relativa D_r può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente espressione:

$$D_R = (10.297 + N_{SPT} \cdot 2.4142) - (N_{SPT})^2 \cdot 0.0181$$

6.3.1.2 Angolo di resistenza al taglio

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio dalle prove SPT sono state utilizzate le correlazioni di Wolff, Kulhawy e Mayne, di seguito illustrate; a partire da queste correlazioni si è considerato il valore minimo.

6.3.1.2.1 Correlazioni dirette tra φ' e N_{SPT}

Peck, Hanson e Thornburn (1974)

La correlazione di Peck, Hanson e Thornburn (1974), è approssimabile con la seguente equazione (Wolff, 1989):

$$\varphi' = 27.1 + 0.3 \cdot C_N \cdot N_{SPT} - 0.00054 \cdot (C_N \cdot N_{SPT})^2 \quad [^\circ]$$

$$C_N = \frac{2}{1 + \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \quad \text{per le sabbie fini}$$

$$C_N = \frac{3}{2 + \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \quad \text{per le sabbie medie}$$

Schemertmann (1975)

La correlazione di Schemertmann (1975) corrisponde all'equazione seguente (Kulhawy e Mayne, 1980):

$$\varphi' = \arctan \left[\frac{N_{SPT}}{12.2 + 20.3 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \right]^{0.34}$$

6.3.1.2.2 Correlazioni dirette tra φ' e prove CPTU

Una correlazione diretta tra q_c , σ_{v0} e l'angolo di resistenza al taglio di picco φ' , è ben rappresentata dall'equazione

$$\varphi' = \arctan \left[0.1 + 0.38 \cdot \log \left(\frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) \right]$$

Un'altra correlazione diretta per la stima dell'angolo di resistenza al taglio è la seguente (Mayne, 2006):

$$\varphi' = 17.6^\circ + 11 \cdot \log \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sqrt{\sigma'_{v0} \cdot p_a}} \right)$$

6.3.1.3 Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi incoerenti possono essere stimate, in ordine di importanza:

- ✓ sulla base dei risultati delle indagini sismiche in sito (Down-Hole);
- ✓ dall'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.
- ✓ dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche CPT.

Il modulo di taglio iniziale (G_0) e quello di Young iniziale (E_0), associabili a piccole deformazioni, possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio (V_s) utilizzando le seguenti correlazioni:

$$G_o = \frac{\gamma_t}{9.81} \cdot (V_s)^2 \text{ (kPa)}$$

$$E_o = G_o \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$$

essendo:

γ_t = peso di volume naturale del terreno;

ν = coefficiente di Poisson del terreno (assunto pari a 0.3);

V_s = velocità delle onde di taglio in m/sec.

La velocità delle onde di taglio (V_s) può essere ricavata direttamente dai risultati delle prove geofisiche in foro di sondaggio o indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT attraverso la correlazione di Ohta e Goto (1978) o la correlazione di Yoshida e al. (1988).

Correlazione di Ohta e Goto (1978)

Il valore di V_s è valutato in funzione del numero di colpi, della profondità dal piano campagna, di un coefficiente f_A funzione dell'età geologica del deposito e di un coefficiente f_G funzione della granulometria.

$$V_s = 53.3 \cdot (N_{SPT})_{50\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G$$

essendo:

z = profondità dal p.c. in metri;

f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedasi la Tabella 6-1);

f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedasi la Tabella 6-2)

Tabella 6-1 Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito)

Olocene	Pleistocene
[attuale]	[circa 1.8 Ma]

F_A	1.0	1.303
-------	-----	-------

 Tabella 6-2 Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_G (funzione della granulometrica del deposito)

	Ghiaie	Sabbie ghiaiose	Sabbie grosse	Sabbie medie	Sabbie fini	Argille
F_G	1.45	1.15	1.14	1.09	1.07	1.00

Nel caso in esame è stato assunto f_A ed f_G in relazione al tipo di materiale ed all'età del deposito in base alla definizione definita nel profilo geologico.

Correlazione di Yoshida et al. (1988)

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot (\sigma'_v)^{0.14}$$

essendo:

C = fattore geologico funzione della litologia del terreno in base alla tabella seguente;

	Sabbia fine	25% Ghiaia	50% Ghiaia	Qualsiasi terreno
C	49	56	60	55

σ'_{v0} = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova

Il modulo di taglio iniziale (G_0) e quello di Young iniziale (E_0), associabili a piccole deformazioni, possono essere ricavati dai valori da prove CPT utilizzando le seguenti correlazioni:

Correlazione di Rix e Stokoe(1992)

Una relazione per la stima di G_0 da prove CPT è la seguente (rix e Stokoe, 1992):

$$\frac{G_0}{q_c} = 1634 \cdot \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} \right)^{-0.75}$$

con G_0 , q_c e σ'_{v0} in kPa.

I moduli di deformabilità “operativi” (E') da adottare per le opere di sostegno e per le fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E_0).

Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici “operativi” saranno assunti pari a 1/10 di quello iniziale.

6.3.2 Depositi coesivi

Per i depositi coesivi la caratterizzazione geotecnica viene fatta oltre che dall'interpretazione delle prove in sito anche dai risultati delle prove di laboratorio sui campioni indisturbati.

6.3.2.1 Classificazione

La classificazione di questi terreni avverrà essenzialmente sui risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- Analisi granulometrica;
- peso di volume naturale e secco;
- grado di saturazione;
- contenuto d'acqua naturale;
- indice dei vuoti iniziale;
- limiti di Atterberg.

6.3.2.2 Caratteristiche di resistenza

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza in tensioni efficaci dei depositi coesivi ci si è basati sui risultati delle prove di laboratorio che consistono in prove:

- Taglio diretto;
- Triassiali consolidate isotropicamente drenate e non drenate TxCID e TxCIU;
- Triassiali non consolidate non drenate TxUU;

La resistenza al taglio in condizioni non drenate è stata valutata sulla base delle misure in sito con prove CPTU con la seguente relazione:

$$C_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_k}$$

il coefficiente N_k ha valori compresi tra 5 e 21 e viene assunto di norma pari a 14 per penetrometro a punta elettrica e a 20 per penetrometro meccanico.

Per le prove SPT, la resistenza al taglio non drenata è stata valutata con la seguente relazione:

$$C_u = 4.5 \div 5.5 N_{SPT}$$

dove N_{spt} è il valore del numero dei colpi della prova SPT.

6.3.2.3 Riconoscimento stratigrafico da prove CPT

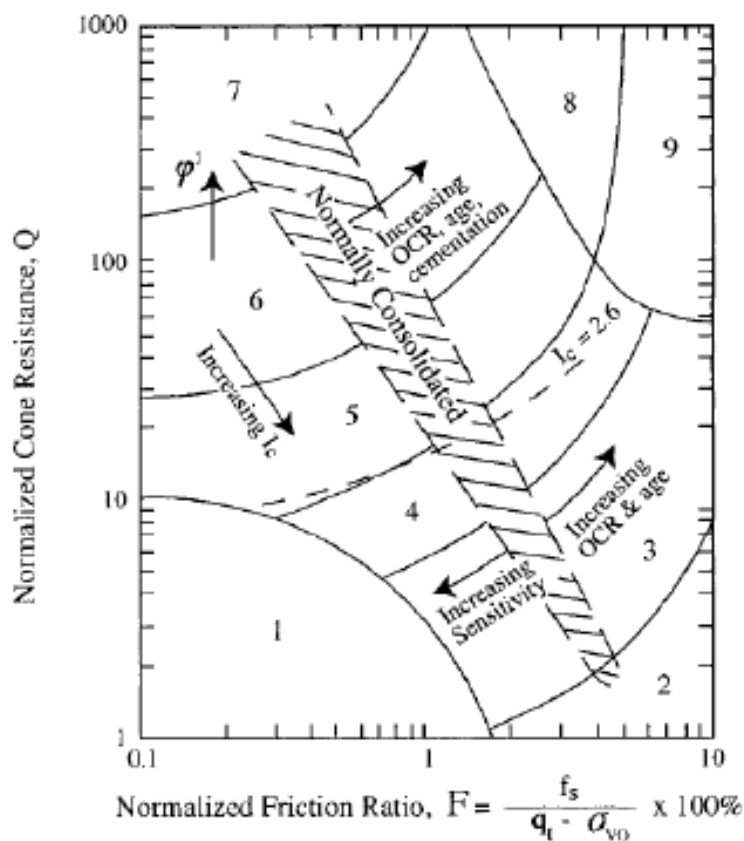
Per il penetrometro elettrico si può fare riferimento alla carta di Robertson e Wride (1998), rappresentata nella figura seguente, che ha in ascissa il rapporto d'attrito normalizzato e in ordinata la resistenza di punta normalizzata, entrambe le variabili in scala logarimica. La classificazione viene fatta attraverso il calcolo dell'indice del terreno I_c con la seguente relazione:

$$I_c = \sqrt{(\log F + 1.22)^2 + (\log Q - 3.47)^2}$$

dove F e Q valgono rispettivamente:

$$F = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \cdot 100$$

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$



In base all'indice del tipo di terreno I_c è possibile classificare la classe di appartenenza, tenendo in conto la seguente classificazione:

$I_c > 3,6$	classe 2	Terreno organico, torba
$2,95 < I_c < 3,6$	classe 3	Argille (da argille ad argille limose)
$2,60 < I_c < 2,95$	classe 4	Limi (da limi argillosi ad argille limose)
$2,05 < I_c < 2,60$	classe 5	Sabbie (da sabbie limose a limi sabbiosi)
$1,31 < I_c < 2,05$	classe 6	Sabbie (da sabbie pulite a sabbie limose)
$I_c < 1,31$	classe 7	Da sabbie ghiaiose a sabbie

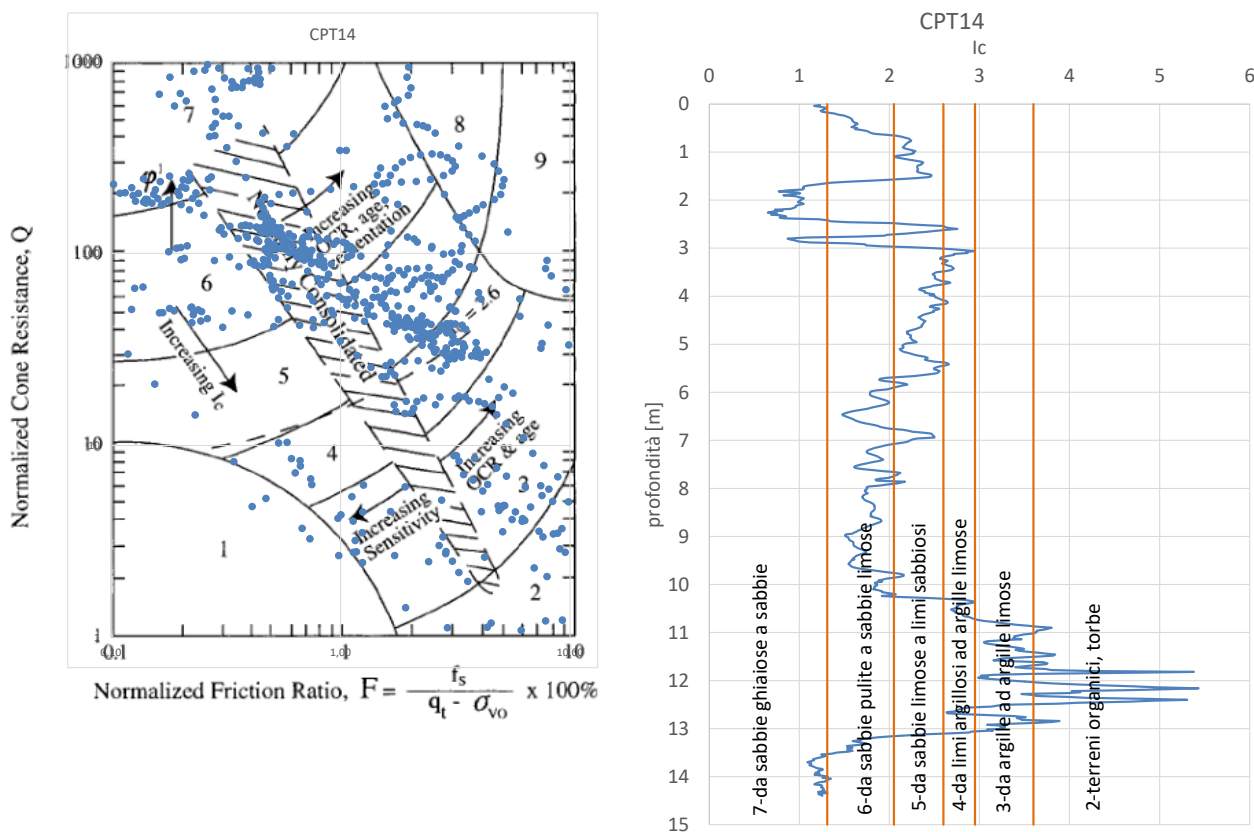
La classe 1 corrisponde a: “terreni sensitivi a grana fine”.

La classe 8 corrisponde a: “da sabbie molto dense a sabbie argillose fortemente sovraconsolidate o cementate”.

La classe 9 corrisponde a: “materiali fini granulari molto duri, fortemente sovraconsolidati o cementati”.

Un esempio di caratterizzazione della stratigrafia in base alle prove CPTu è riportata nel grafico sottostante considerando un CPT di riferimento.

Figura 6.1 – Interpretazione stratigrafica per la prova CPT14



6.3.2.4 Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi coesivi possono essere stimati, analogamente a quanto fatto per i depositi incoerenti, sulla base dei risultati delle indagini sismiche in sito (Down Hole) oppure da correlazioni di letteratura.

Come nel caso dei terreni incoerenti i moduli di deformabilità “operativi” (E') da adottare per le opere di sostegno e per le fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E_0).

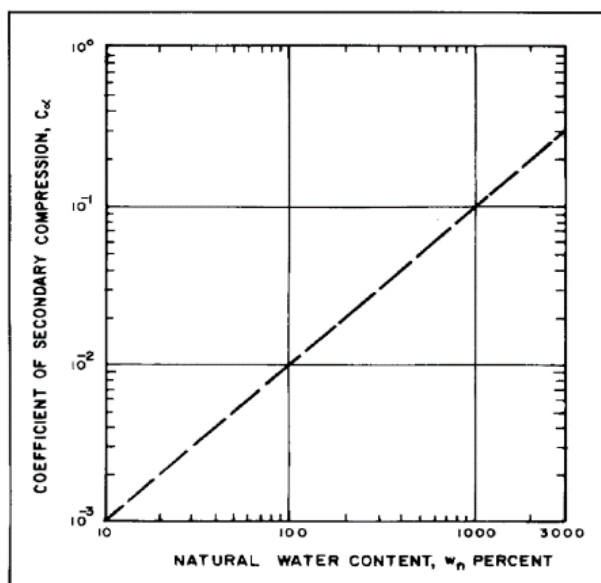
Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici “operativi” saranno assunti pari a 1/10 di quello iniziale.

6.3.2.5 Caratteristiche di consolidazione

Per la stima del coefficiente di consolidazione primaria C_v , si può fare riferimento ai valori ottenuti dalle risultanze delle prove edometriche, all’interpretazione delle prove penetrometriche CPT e a correlazioni empiriche in funzione del limite liquido riportata di seguito:

$$c_v = 0.009 (LL-0.1) [cm^2/s] \quad \text{da Navfac-DM7.1 (1971)}$$

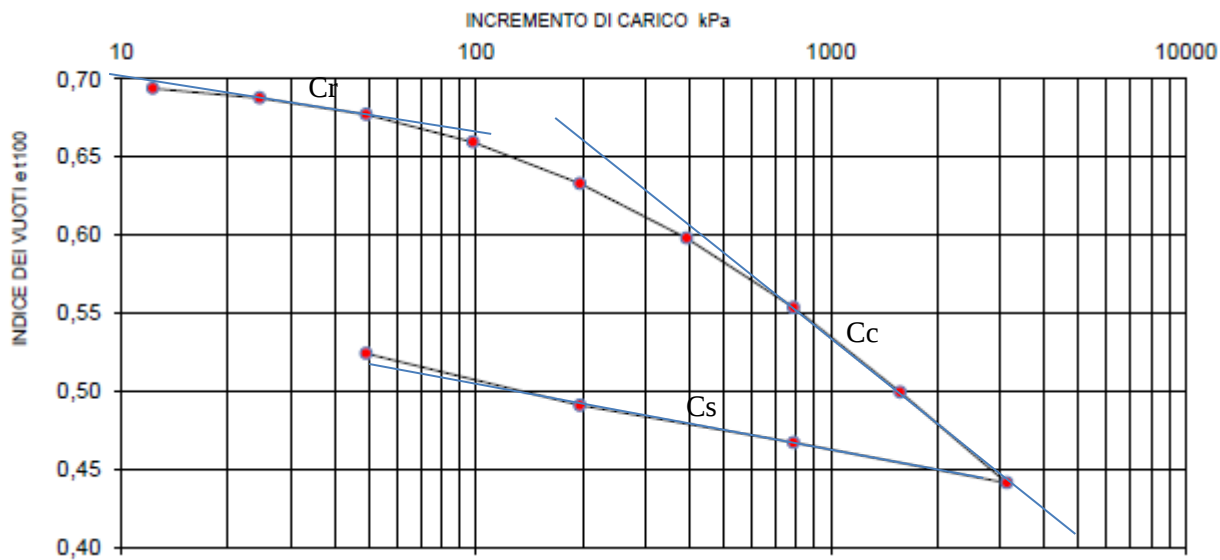
Il coefficiente di consolidazione secondaria, C_α , è stato stimato con la correlazione di Navfac-DM7.1 (1982) in funzione del contenuto d’acqua naturale w_n .



A partire dalle prove edometriche disponibili è possibile ricavare i seguenti parametri di compressibilità:

- l’indice di ricompressione C_r (lungo il ramo di ricarica iniziale)
- l’indice di compressibilità C_c (lungo la ‘retta di normal-consolidazione’)
- l’indice di rigonfiamento C_s (lungo i rami di scarico ed eventuale ricarica).

Figura 6.2 – Curva di compressibilità e definizione degli indici Cr, Cc e Cs per la prova edometrica BH2-campione SC1



6.4 UNITÀ R- TERRENI DI RIPORTO E COLTRE VEGETALE

Materiale eterogeneo di riporto costituito principalmente da terreno rimaneggiato (molto vario, composto da sabbia/limo e/o ghiaia e/o ciottoli). Composto talvolta da terreno vegetale pedogenizzato. Spesso sono presenti frammenti di laterizi o resti di conglomerati bituminosi.

Lo spessore di coltre vegetale presente a partire da p.c. è variabile da 0.5 m –1.0 m ed è costituita da materiale eterogeneo quale sabbie, ciottoli, vegetati. Talvolta è presente a partire dal p.c. materiale di riporto antropico dello spessore variabile tra 0.5 e 3.5 m, costituente il corpo di rilevati esistenti di viabilità e/o strutture adiacenti al tracciato.

Sono disponibili pochi valori di alcune prove SPT che hanno dato valori di N_{SPT} di circa 7 – 8 colpi/30 cm. Il dato tuttavia non è rappresentativo, pertanto si ipotizza un N_{SPT} compreso tra 5 e 25.

Non sono stati raccolti campioni di questo materiale e pertanto non sono state eseguite prove di laboratorio.

La caratterizzazione geotecnica di tale unità è quindi basata sulle conoscenze di materiali simili in condizioni analoghe, confermando grossomodo i parametri indicati in fase di PFTE (elaborati grafici NN1R00F10FZGE0006001A e NN1R00F10FZGE0006002A).

Per l'unità R comprendente coltre vegetale e riporto antropico, si possono assumere i seguenti intervalli di variabilità dei parametri geotecnici:

- $\gamma = 18 \div 20 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale
- $\varphi' = 30\text{-}35^\circ$ angolo di resistenza al taglio
- $c' = 0 \text{ kPa}$ coesione drenata
- $E_0 = 100 \div 150 \text{ MPa}$ modulo di deformazione elastico a piccole deformazioni.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 47 di 110

6.5 UNITÀ A – ARGILLA

Si tratta di argille generalmente non pure, spesso con una componente limosa più o meno presente e talvolta con la presenza di sabbia o ghiaia. Possono essere da mediamente consistenti a molto consistenti, con colore generalmente grigio (più o meno scuro) oppure verdastro o marrone, nella maggior parte dei casi si presentano umide.

Figura 6.3 – Esempio cassetta – Unità ARGILLA



*BH4 – profondità 25 – 30m: **descrizione 24.50 – 28.00m:** Argilla grigia molto consistente umida (Argilla Rigida) talora sabbiosa; **descrizione 28.00 – 30.00m:** Argilla ciottolosa (con diametro massimo di 7 cm) a struttura brecciata, molto addensata/consistente umida.*

6.5.1 Prove in situ - Analisi N_{spt}

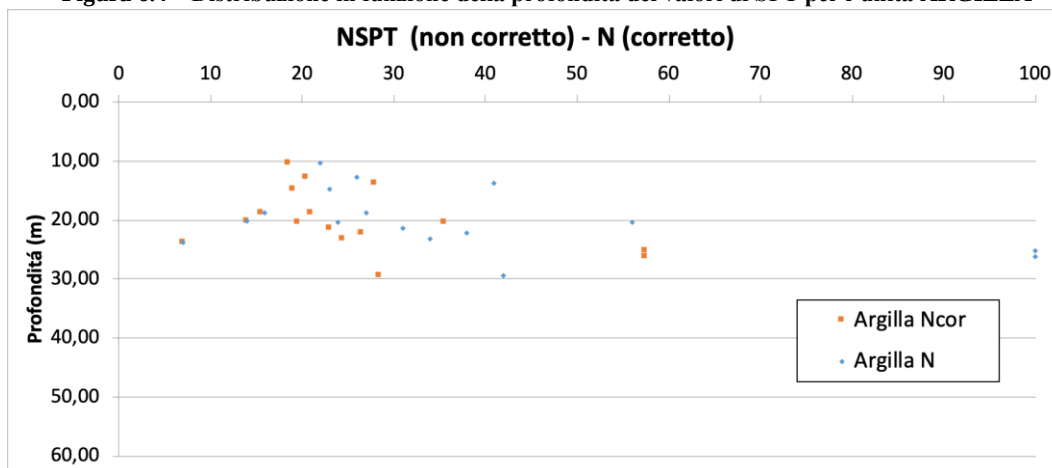
Nel grafico seguente, sono rappresentati i valori N_{SPT} in relazione alla profondità dove è stata effettuata la prova. Sono rappresentate due serie, una relativa al dato grezzo corrispondente al valore ottenuto in situ (per “Rifiuto” si è considerato un N_{SPT} pari a 100) ed un'altra con i valori “corretti”.

La correzione è applicata per tener conto del livello freatico e quindi dell'iterazione tra le particelle fini e l'acqua e che considera l'indebolimento della resistenza al taglio sotto l'effetto della pressione interstiziale in eccesso che si genera al momento del colpo (viene applicata solo quando la profondità della prova è maggiore del livello della falda misurato al momento dell'esecuzione del sondaggio).

Viene utilizzata la relazione di Terzaghi e Peck, per $N > 15$:

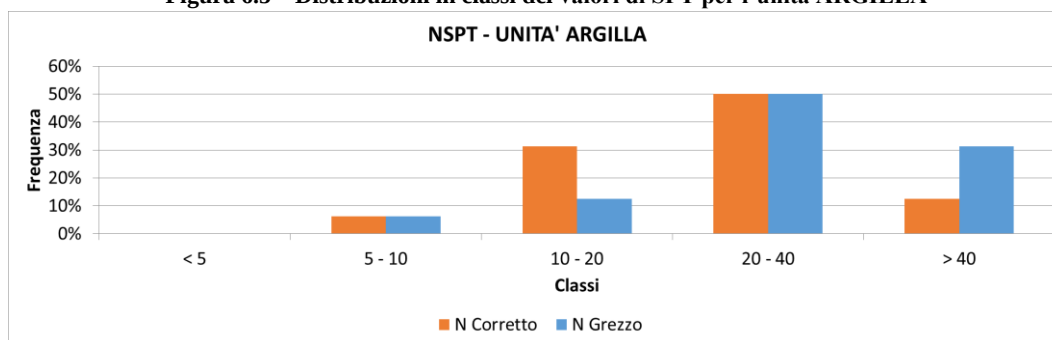
$$N = 15 + \frac{N' - 15}{2}$$

Figura 6.4 – Distribuzione in funzione della profondità dei valori di SPT per l'unità ARGILLA



Predominantemente le argille si trovano ad una profondità compresa tra 10 e 25 m.

Figura 6.5 – Distribuzioni in classi dei valori di SPT per l'unità ARGILLA



Su questa unità sono state eseguite 16 prove SPT, dando risultati compresi fra 5 e 56 colpi/30 cm (considerando i valori corretti), ad indicare una estrema variabilità nel grado di consistenza di questi materiali. Osservando la distribuzione percentuale in classi di Nspt (con riferimento ai valori corretti), è stato ritenuto valido distinguere dal punto di vista della geotecnica due sub-unità all'interno dell'unità "Argilla":

- Argille di scarsa consistenza caratterizzate da un $Nspt \leq 20$ (pari ad un 37%)
- Argille di media consistenza caratterizzate da un Nspt compreso tra 20-40 (pari ad un 50%)

Per la caratterizzazione generale di questa unità si è optato trascurare i dati riferiti a $Nspt > 40$ (corrispondente ad un 13%).

Nella Tabella 6-3 sono riepilogati i valori medi, min e massimo delle prove suddivise secondo la classificazione proposta.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 49 di 110

Tabella 6-3 – Riepilogo valori N_{spt} in base alla classificazione proposta per l'Unità ARGILLA

	Argille mediamente rigide $N_{spt} \leq 20$	Argille rigide-dure $20 < N_{spt} < 40$
Media	16	26
min	7	21
max	20	36
n	6	8
s.dev	8	14

6.5.2 Prove in situ - Analisi CPTU

Le prove CPTU sono state suddivise in base alla posizione del sondaggio ed al tipo di materiale incontrato in base all'analisi del valore I_c e dal confronto con il profilo geologico. In questo modo si è potuto ottenere un valore medio di resistenza alla punta penetrometrica (q_c) e all'attrito laterale (f_s) relativo all'unità analizzata, in questo caso "argilla".

Nella Figura 6.6 è possibile vedere l'andamento dei valori di q_c in funzione della profondità per le prove eseguite, mentre nella Tabella 6-4 – Valore medio resistenza alla punta ed attrito laterale per l'unità sono riepilogati i valori medi ottenuti.

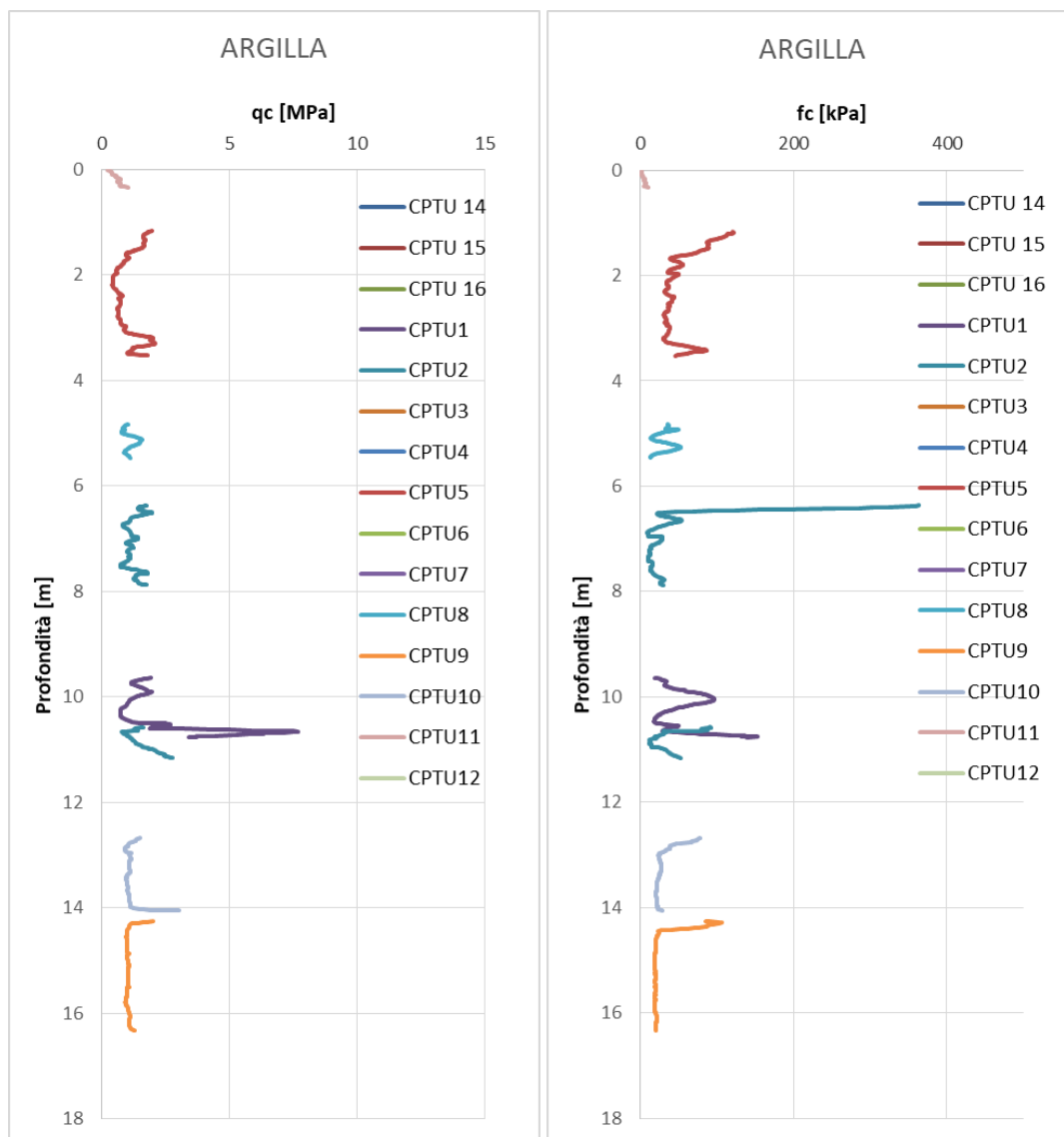
Figura 6.6 – Andamento della resistenza alla punta (q_c) ed attrito laterale (f_s) per l'unità ARGILLA


Tabella 6-4 – Valore medio resistenza alla punta ed attrito laterale per l'unità ARGILLA

	Unità ARGILLA
Media Q_c [MPa]	1.1
Media F_s [kPa]	35.0

6.5.3 Prove in situ - permeabilità

Non sono state effettuate prove di permeabilità nell'unità ARGILLA, pertanto si ipotizza una permeabilità simile a quella riscontrata nei limi, dato che l'estensione dei depositi argillosi è limitata, ed inoltre tale assunzione è di tipo cautelativo.

6.5.4 Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati (dove era maggiore il contenuto di fine), su cui sono state eseguite prove di laboratorio.

Dalle analisi granulometriche, il deposito è caratterizzato da:

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 0 e 3;
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 0 e 35;
- percentuale di limo generalmente compresa fra 18 e 46;
- percentuale di argilla generalmente compresa fra 35 e 69;

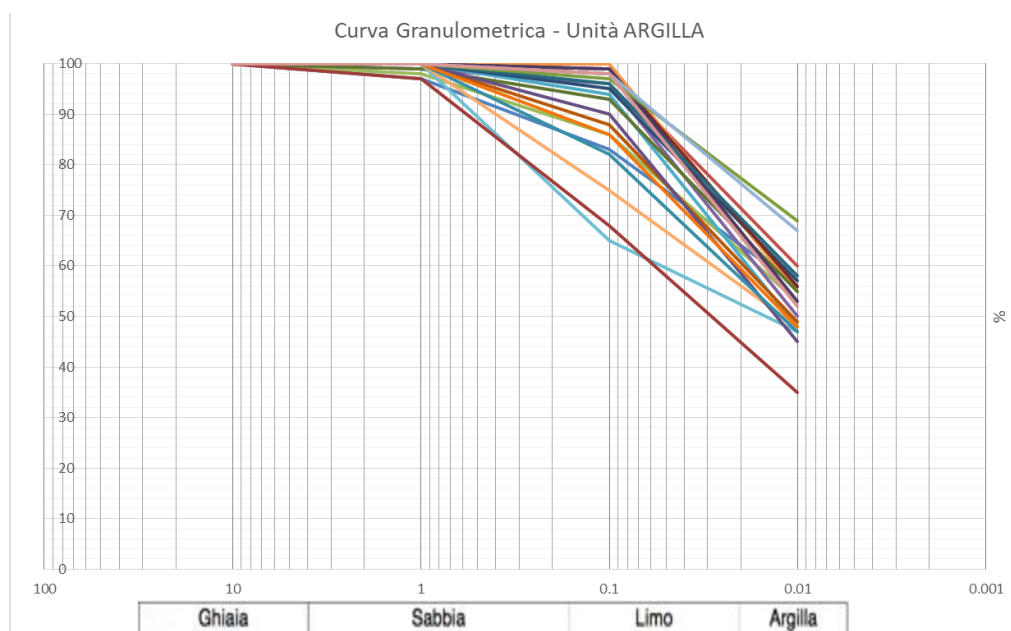
La Tabella 6-5 seguente riassume i dati medi relativi all'unità analizzata

Tabella 6-5 – Riepilogo composizione granulometrica media dell'unità ARGILLA

	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]
Media	0.5	9.7	37.0	52.8
Min	0.0	0.0	18.0	35.0
Max	3.0	35.0	46.0	69.0
n dati	21.0	21.0	21.0	21.0
St.Dev	1.0	9.9	7.8	7.5

Di seguito il grafico che rappresenta la distribuzione granulometrica dei campioni appartenenti all'unità ARGILLA. Non sono riportate le distribuzioni percentuali in funzione delle analisi sedimentologiche.

Figura 6.7. Composizione Granulometrica Unità ARGILLA



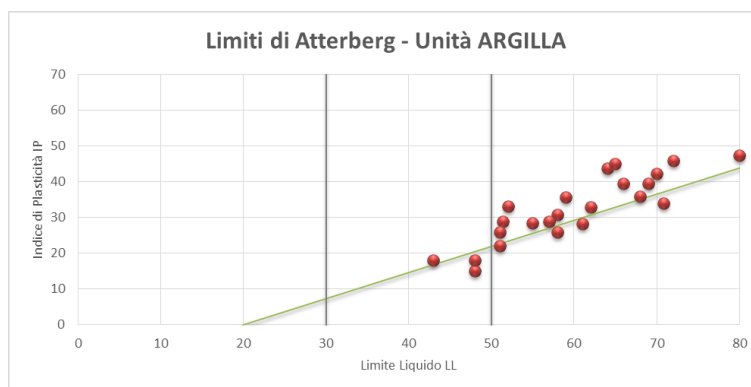
Per quanto riguarda i limiti di Atterberg, i test eseguiti hanno dato valori di limite liquido 43-87%, limite plastico 19-41% e indice plastico 15-56%. Il contenuto naturale d'acqua è tra 20 e 47, i risultati sono riassunti nella Tabella 6-6 seguente.

Tabella 6-6. Granulometria e limiti di Attemberg per l'unità ARGILLA.

	Limite Liquidità wl [%]	Limite Plasticità wp [%]	Limite ritiro wr [%]	Indice Plasticità IP	Indice Consistenza Ic	Indice Attività Ia	Contenuto acqua w [%]
Media	61.9	28.0	14.5	33.7	0.9	0.6	31.8
Min	43.0	19.0	14.0	15.0	0.6	0.4	20.4
Max	87.0	41.0	15.0	56.0	1.2	1.0	47.0
n dati	25	25	2	25	20	21	24
St.Dev	11.2	5.2	0.7	10.2	0.2	4.2	8.0

L'indice di consistenza varia tra 0.6 (media consistenza / consistenza plastica) e 1.0 (alta consistenza / consistenza solida-semisolida).

Figura 6.8 – Carta di plasticità di Casagrande per l'unità ARGILLA



Si deduce che questa unità è maggiormente caratterizzata da Argille inorganiche di alta plasticità.

Nella Tabella 6-7 sono invece riportati i valori del peso di volume naturale ottenuto dalle prove di laboratorio; come si può vedere essi ricadono nell'intervallo tra 15.9 e 20.3 kN/m³, con un valore medio pari a 18.4 kN/m³.

Tabella 6-7. Caratterizzazione fisica per l'unità ARGILLA da prove di laboratorio.

	γ kN/m ³	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	e %	n %	Sr %
Media	18.4	25.1	14.1	18.5	0.9	49.7	96.0
Min	15.9	2.7	11.0	16.6	0.6	37.7	86.4
Max	20.3	27.1	16.0	19.7	1.3	99.0	100.0
n dati	21	25	11	11	20	12	19
St.Dev	1.1	4.7	1.7	1.0	0.2	16.7	3.9

6.5.5 Caratteristiche di resistenza

Dal laboratorio sono disponibili i risultati di prove di taglio diretto e prove di compressione triassiale che hanno dato valori medi di coesione drenata tra 16.5 e 24.2 kPa ed angolo di resistenza al taglio $21.3 \div 24.7^\circ$. È disponibile un unico valore di coesione non drenata (122 kPa).

Tabella 6-8. Prove di laboratorio sull'unità ARGILLA.

	Prova di Taglio CD		Prova Triassiale UU		Prova Triassiale CIU				Prova Triassiale CID	
	c'	ϕ	Cu	ϕ	Cu	ϕ_u	c'	ϕ'	c'	ϕ
	[kPa]	[°]	[kPa]	[°]	[kN/m2]	[°]	[kN/m2]	[°]	[kPa]	[°]
Media	24.2	24.7	122.0	-			16.5	23.7	23.9	21.3
Min	22.0	21.0	122.0				7.0	19.0	23.1	19.9
Max	25.5	27.2	122.0				23.0	25.9	24.6	22.2
n dati	3	3	1				4	4	3	3
St.Dev	1.9	3.3	-				7.5	3.2	0.8	1.2

Nelle figure seguenti sono graficati i valori di angolo di attrito interno e di coesione efficace in relazione alla profondità per le prove di taglio diretto e prova triassiale CID.

Figura 6.9. Valori dell'angolo di resistenza al taglio per Unità ARGILLA.

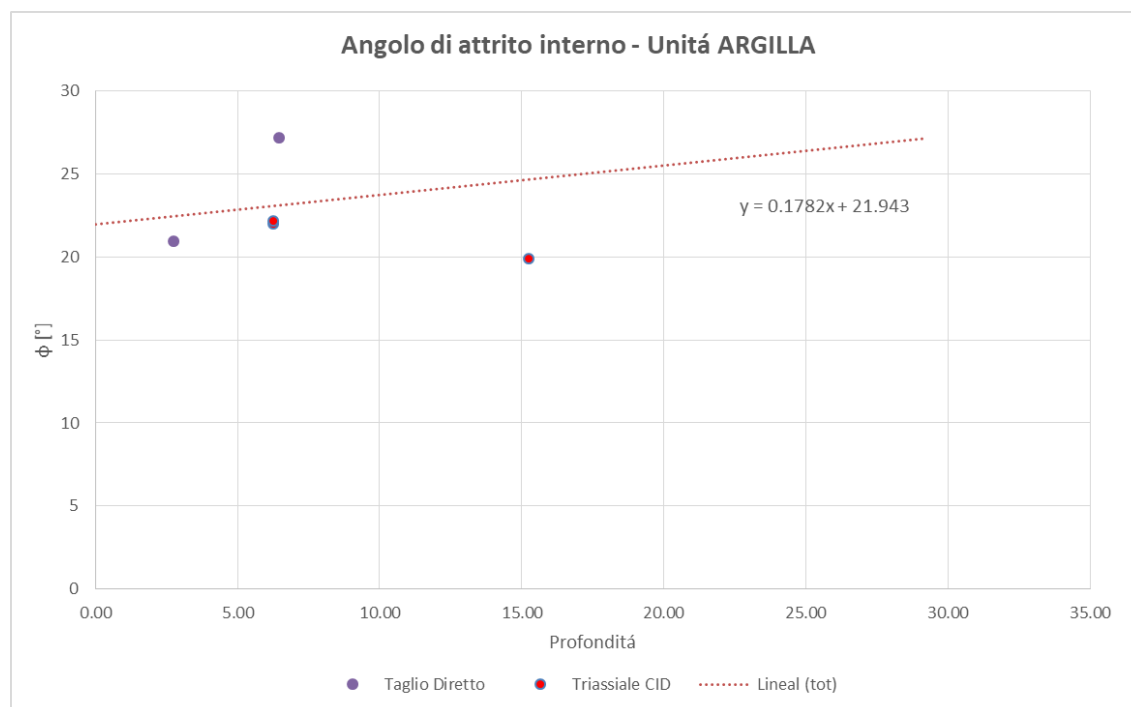
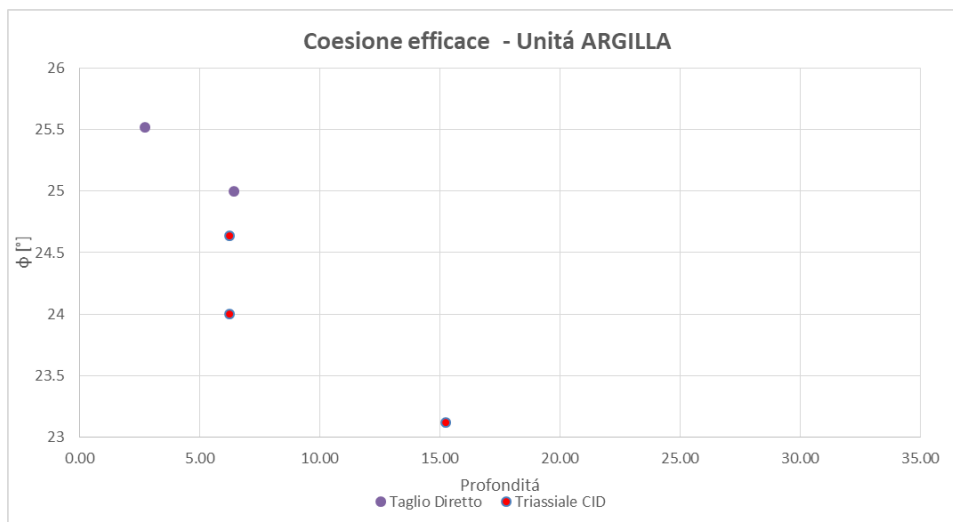


Figura 6.10. Valori della coesione efficace per Unità ARGILLA.


6.5.6 Caratteristiche di deformabilità

Per la caratterizzazione in termini di deformabilità, ci si basa principalmente sui risultati delle indagini sismiche (Down-Hole e Masw). In particolare si è considerato un rango di Vs compreso tra il valor medio ± 1 deviazione standard.

I risultati provenienti da prove DH si riferiscono a gli strati di argilla incontrati a profondità comprese tra 14 e 30 m, mentre per le prove MAWS la profondità di riferimento è compresa tra 10 e 20 m.

Tabella 6-9 – Riepilogo velocità medie prove MASW e DH, unità ARGILLA

	MASW (10-20m)	DH (14-30m)
	V [m/s]	V [m/s]
med	268	344
min	254	327
max	288	361
st.dev	18	24

Tabella 6-10 – Riepilogo valori medi di G0 e E0 da prove MASW e DH, unità ARGILLA

	MASW (10-20m)	DH (14-30m)
Vs [m/s]	250 ÷ 286	320 ÷ 360
G0 [MPa]	118 ÷ 154	193 ÷ 244
E0 [MPa]	306 ÷ 400	502 ÷ 635

6.5.7 Correlazioni utilizzate

Per i materiali coesivi, l'unica correlazione utilizzata si riferisce alla Coesione non drenata, in base alla relazione per la stima della C_u dai valori di SPT indicata in precedenza (tenendo in conto il valore medio ± 1 deviazione standard), la Figura 6.11 e Tabella 6-11 riepilogano i dati ottenuti.

Figura 6.11 – Distribuzione valori C_u ottenuti da SPT, unità ARGILLA ($\min=4.5 \cdot N_{SPT}$; $\max=5.5 \cdot N_{SPT}$)

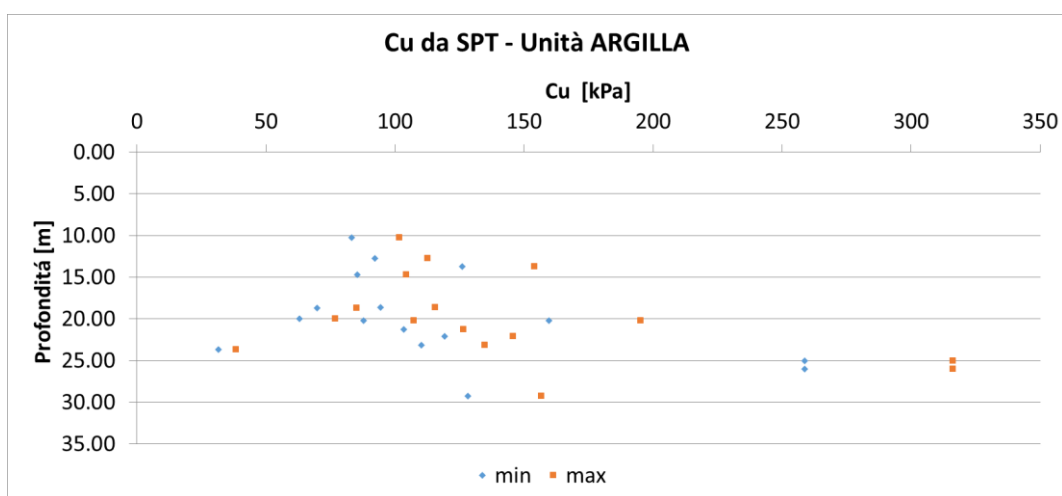


Tabella 6-11 - Sintesi valori della coesione non drenata da SPT per Unità ARGILLA

	Cu_argilla Soft-Firm	Cu_argilla Stiff-Hard
Nspt di riferimento medio (min-max)	16 (8-20)	26 (20-34)
Cu media (min-max) [kPa]	72 (36-90)	117 (90-153)

A partire delle prove CPTU si ottiene una C_u media di 77 kPa (variabile tra 70-80 kPa).

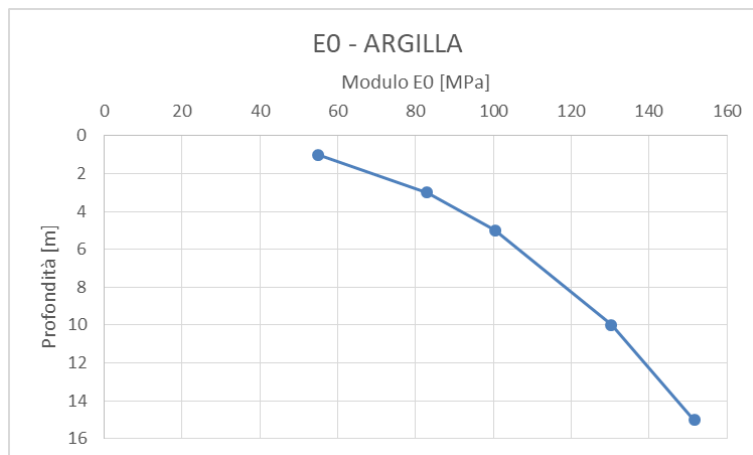
Di seguito si riportano i valori di G_0 ed E_0 ottenuti da prove CPTU, calcolando la media su un intervallo 1 – 15 m, con profondità media di 7.8 m.

Tabella 6-12 – Modulo G_0 da formula di Rix e Stokoe – Unità ARGILLA

	G_0 [MPa]	E_0 [MPa]
Media	40	104
Min	21	66
Max	58	142
St.Dev	14.68	38.17

Dal modulo G0 è possibile ricavare E0, che viene graficato in funzione della profondità nella figura seguente.

Figura 6.12 – Andamento modulo E0 in funzione della profondità – Unità ARGILLA



6.5.8 Sintesi dei risultati per l'unità ARGILLA

In questo paragrafo si sintetizzano tutti i risultati per l'unità ARGILLA e si identificano gli intervalli dei parametri geo-meccanici.

L'intervallo dei valori per il peso di volume è stato definito considerando i risultati da prove di laboratorio che restituiscono valori compresi tra 15.9 e 20.3 kN/m³ con un valor medio di 18.4 kN/m³; si assume per questa unità, Argilla, il seguente intervallo di valori:

- $\gamma = 16 \div 20 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale

Per l'angolo di resistenza al taglio si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio:

- $\phi' = 21.0 \div 27.2^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio CD
- $\phi' = 19.0 \div 25.9^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio TxCIU
- $\phi' = 19.9 \div 22.2^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio TxCID

Per l'unità Argilla, si definisce il seguente range di valori di angolo di attrito in modo da definire un intervallo centrato sul valore medio pari a 21°:

- $\phi' = 19 \div 23^\circ$ angolo di resistenza al taglio

Per la coesione drenata si fa riferimento ai risultati delle prove di laboratorio dalle quali si riscontra una variabilità tra 7.0 ÷ 25.5 kPa. Si assume, trascurando i valori massimi e minimi poco significativi, il seguente intervallo di valori della coesione drenata:

- $c' = 10 \div 20 \text{ kPa}$ coesione drenata

Per la coesione non drenata si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio e in sito:

- $C_u = 122 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove di laboratorio
- $C_u = 72 \div 117 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove SPT
- $C_u = 73 \div 80 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove CPTU

Si assume quindi per l'unità ARGILLA, dando priorità ai valori da prove in sito per definire il limite inferiore di intervallo, il seguente range di valori di coesione non drenata:

- $C_u = 70 \div 120 \text{ kPa}$ coesione non drenata

Dai risultati delle prove sismiche (Down-Hole e Masw) e dall'analisi ottenuta correlando le prove CPTU con la velocità delle onde di taglio (V_s) si ottengono i seguenti valori di E_0 (valore medio $\pm$ dev.St.):

- $E_0 = 306 \div 400 \text{ MPa}$ da prove MASH (prof 10-20m)
- $E_0 = 502 \div 635 \text{ MPa}$ da prove DH (prof 14-30m)
- $E_0 = 66 \div 142 \text{ MPa}$ da prove CPTU (prof media 7.8, max 15m)

Quindi si definisce il seguente rango:

- $E_0 = 300 \div 400 \text{ MPa}$

E si stimano i seguenti intervalli di valori per il modulo di deformazione "operativo" pari a:

- $E = E_0 / 5 \Rightarrow 60 \div 80 \text{ MPa}$ per le opere di sostegno e per le fondazioni;
- $E = E_0 / 10 \Rightarrow 30 \div 40 \text{ MPa}$, nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati.

Si stima che i valori ottenuti di coesione drenata e non drenata e di modulo di deformazione siano associati alle

Argille di media consistenza (A2); per caratterizzare le argille di scarsa consistenza (A1) si utilizzeranno degli intervalli superiormente limitati dai valori minimi degli intervalli qui stimati.

Non avendo a disposizione dati di prove di permeabilità, si associa a questa unità un valore medio di permeabilità pari al valor minimo assegnato ai Limi, $5,6 \cdot 10^{-8}$ m/s (valore compreso tra l'intervallo di permeabilità caratteristico dei Depositi a bassa permeabilità, 10^{-9} e 10^{-7} m/s).

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 59 di 110

6.6 UNITÀ L – LIMI

Limi con una grande varietà di caratteristiche, si presentano sporadicamente puri, spesso accompagnati da argille, talvolta con sabbie oppure ghiaie. Colore variabile, generalmente nelle tonalità marroni (dall'avana-giallastro al marrone scuro), talvolta olivastri o grigi. Anche la consistenza è molto variabile, da bassa a medio alta.

Figura 6.13 – Esempio cassetta – Unità LIMO



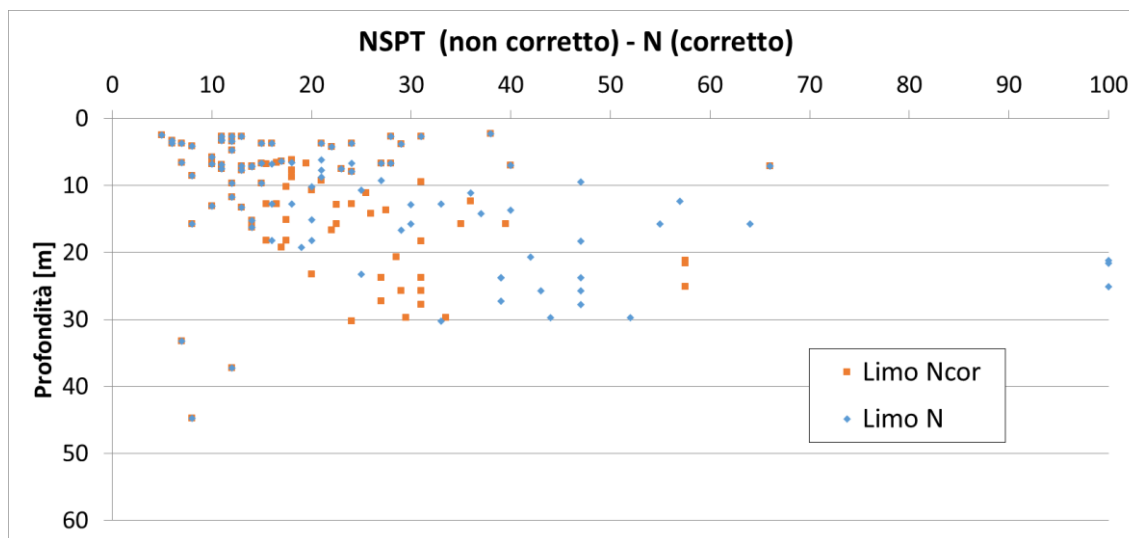
*BH11 – profondità 20 – 25 m: **descrizione 20.00 – 38.50 m:** Limi debolmente argillosi e limi argillosi di colore grigio-verdastro con resti di gusci di fossili, poco consistenti, molto comprimibili, non plastici, umidi.*

6.6.1 Prove in situ - Analisi N_{spt}

Nel grafico seguente, sono rappresentati i valori di N_{SPT} ottenuti nell'unità geotecnica dei LIMI in relazione alla profondità dove è stata effettuata la prova. Sono rappresentate due serie: una relativa al dato grezzo (al "rifiuto" si è associato un valore di N_{SPT} = 100) ed un'altra con i valori "corretti" per tenere in conto l'influenza del livello freatico (si veda la relazione utilizzata nel paragrafo 6.4).

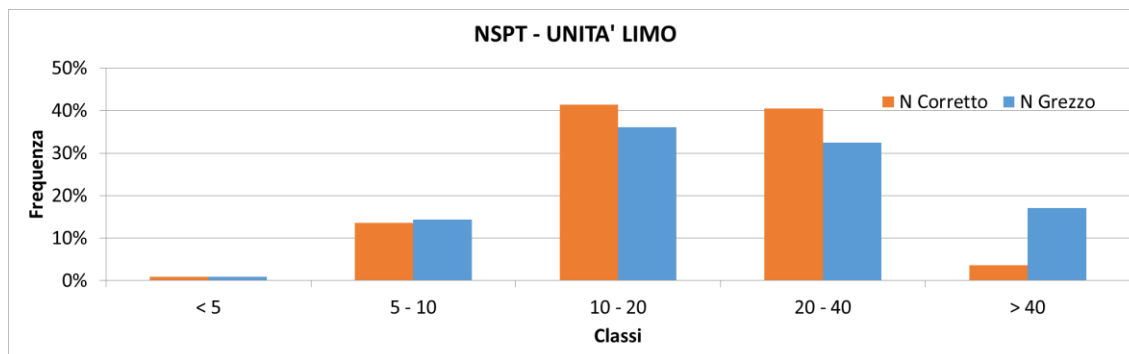
La Figura 6.14 e la Figura 6.15 rappresentano graficamente la distribuzione dei valori corretti e non corretti delle prove SPT effettuate sull'unità "LIMO".

Figura 6.14 – Distribuzione in funzione della profondità dei valori di SPT per l'unità LIMO



Predominantemente i limi si rinvencono fino a 25-30 m di profondità.

Figura 6.15 – Raggruppamento in classi dei valori di SPT per l'unità LIMO



I 111 risultati delle prove disponibili hanno dato valori di Nspt compresi fra 5 e 66 colpi/30 cm considerando le correzioni, ad indicare un comportamento variabile. Pertanto i risultati sono stati suddivisi in tre classi, in funzione dei risultati delle prove penetrometriche:

- | | |
|----------------------------------|--|
| • Limi di bassa consistenza (L1) | Nspt ≤ 10 (corrispondente ad un 14%) |
| • Limi di media consistenza (L2) | Nspt compreso tra 10-20 (corrispondente ad un 41%) |
| • Limi di alta consistenza (L3) | Nspt compreso tra 20-40 (corrispondente ad un 41%) |

I valori di NSPT>40 (pari ad un 4%) non si sono presi in considerazione. Nella Tabella 6-13 sono riepilogati i valori medio, minimo e massimo delle prove Nspt suddivise secondo la classificazione precedente.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 61 di 110

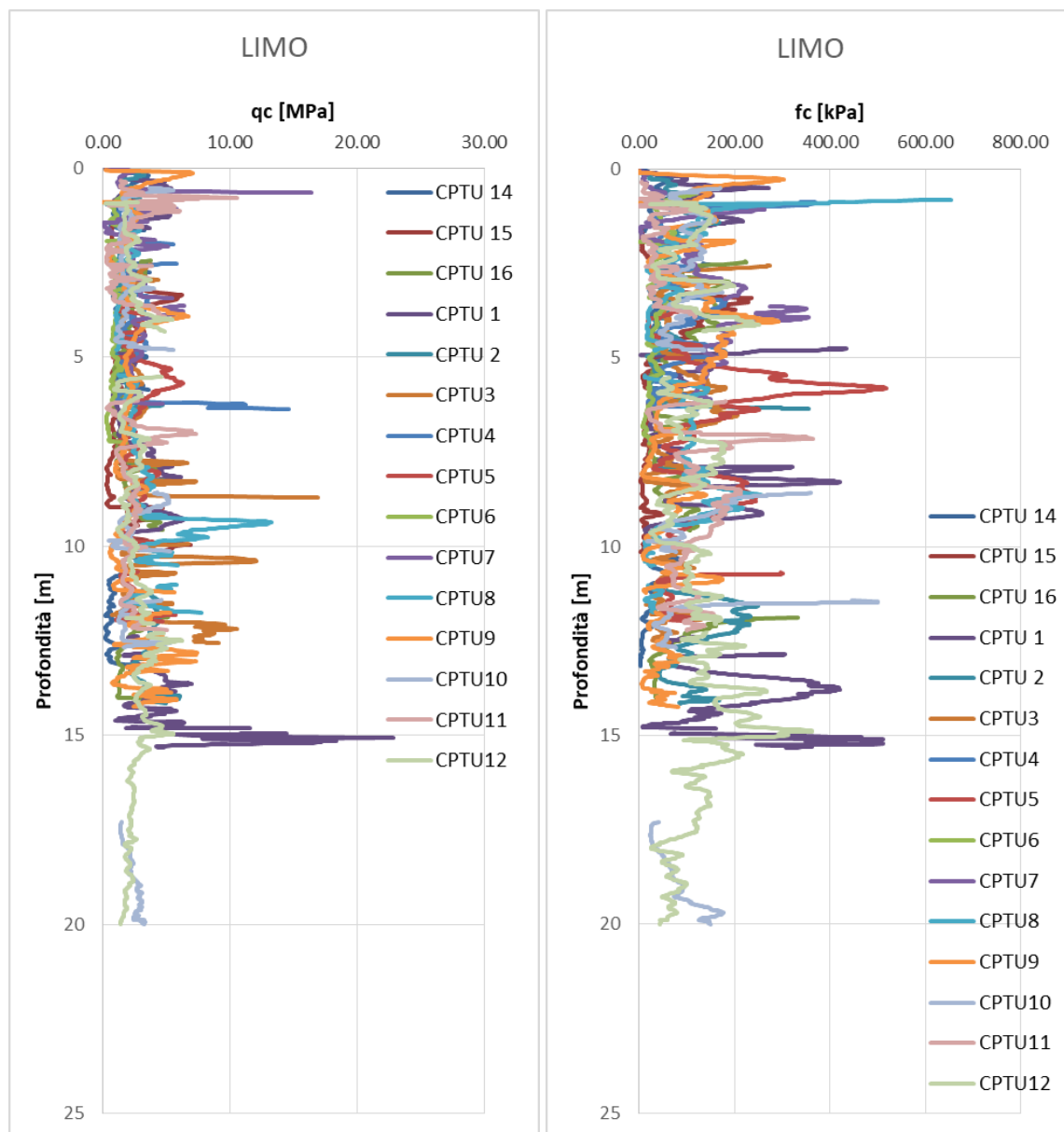
Tabella 6-13 – Riepilogo valori N_{spt} in base alla classificazione proposta per l'Unità LIMO

	L1 ($N_{spt} < 10$)	L2 ($10 < N_{spt} < 20$)	L3 ($20 < N_{spt} < 40$)
Media	8	15	28
min	5	11	21
max	10	20	40
n	16	46	45
s.dev	3	7	14

6.6.2 Prove in situ - Analisi CPTU

Le prove CPTU sono state suddivise in base alla posizione del sondaggio ed al tipo di materiale incontrato in base all'analisi del valore I_c e dal confronto con il profilo geologico. In questo modo si è potuto ottenere un valore medio di resistenza alla punta penetrometrica (q_c) e all'attrito laterale (f_s) relativo all'unità analizzata, in questo caso LIMO.

Nella Figura 6.16 è possibile vedere l'andamento dei valori di q_c ed f_s in funzione della profondità per le prove eseguite, mentre nella Tabella 6-14 sono riepilogati i valori medi ottenuti.

Figura 6.16 – Andamento della resistenza alla punta (q_c) per l'unità LIMO (prove PD e PFTE)

 Tabella 6-14 – Valore medio resistenza alla punta e f_c per l'unità LIMO

	Unità LIMO
Media Q_c [MPa]	2.3
Media F_s [kPa]	89.9

6.6.3 Prove in situ – permeabilità

Le prove Lefranc di permeabilità effettuate sull'unità LIMO hanno dato valori di permeabilità compresi fra $5.6 \cdot 10^{-8}$ m/s e $1.3 \cdot 10^{-5}$ m/s (valore medio pari a $3.5 \cdot 10^{-6}$ m/s). In tabella Tabella 6-15 si riassumono i risultati.

Tabella 6-15. Coefficiente di permeabilità da prove Lefranc sull'unità LIMO.

	K [m/s]
Media	3.55E-06
Min	5.60E-08
Max	1.33E-05
n dati	26
St.Dev	4.05E-06

6.6.4 Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati, su cui sono state eseguite prove di laboratorio. Dalle analisi granulometriche, il deposito è caratterizzato da:

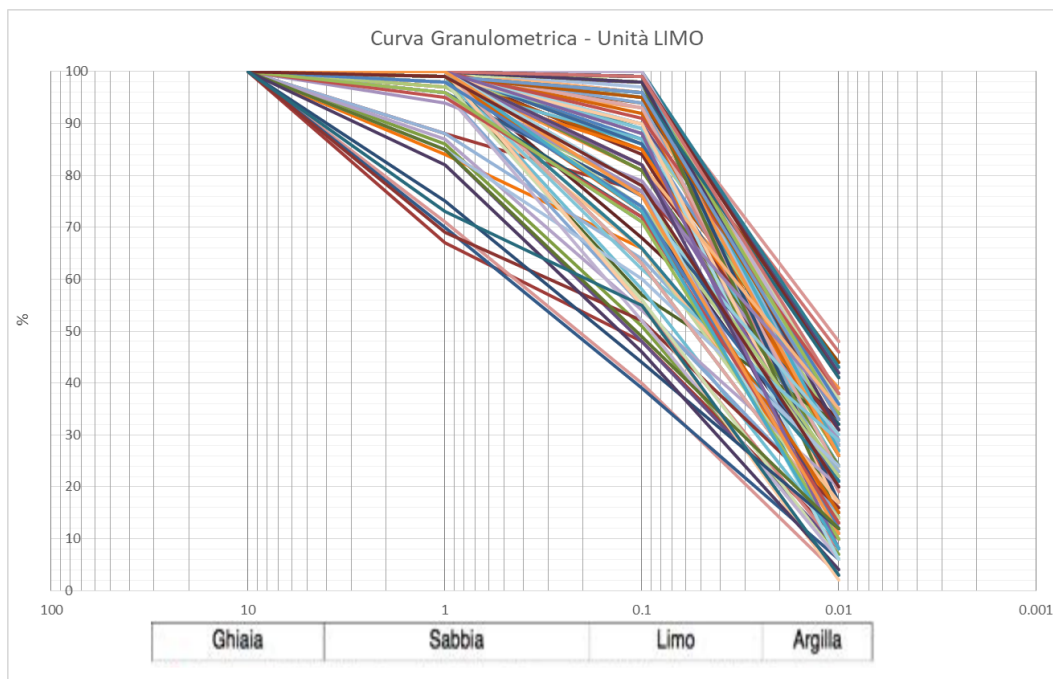
- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 0 e 33;
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 3 e 45;
- percentuale di limo generalmente compresa fra 25 e 84;
- percentuale di argilla generalmente compresa fra 2 e 48.

La tabella seguente riassume i dati medi relativi all'unità analizzata.

Tabella 6-16 – Riepilogo composizione granulometrica media dell'unità LIMO

	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]
Media	3.7	16.8	55.7	23.9
Min	0	0	25	2
Max	33	45	84	48
n dati	106	109	109	109
St.Dev	7.5	12.8	12.1	11.5

Di seguito il grafico che rappresenta la distribuzione granulometrica dei campioni appartenenti all'unità LIMO.

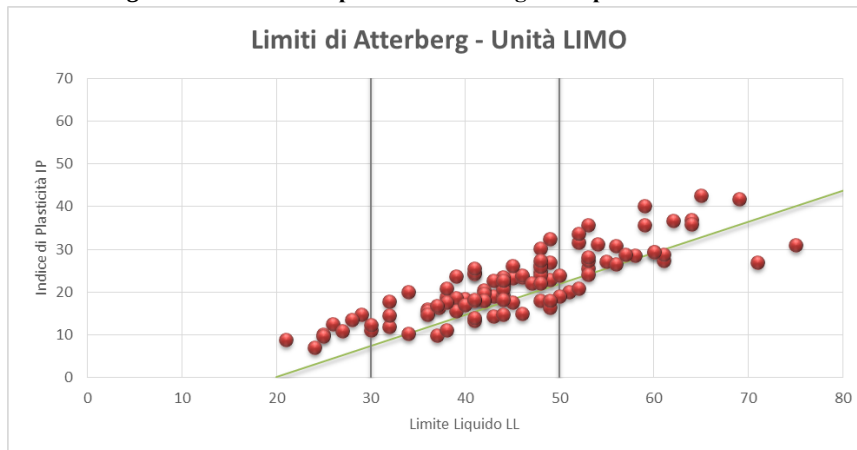
Figura 6.17. Composizione granulometrica unità LIMO


Per quanto riguarda i limiti di Atterberg, i test eseguiti hanno dato valori di limite liquido 21-76%, limite plastico 12-44% e indice plastico 7-43%. Il contenuto naturale d'acqua è tra 12 e 60, i risultati sono riassunti nella tabella Tabella 6-17 seguente:

Tabella 6-17 – Riepilogo analisi limiti di Atterberg, unità LIMO

	Limite Liquidità wl [%]	Limite Plasticità wp [%]	Limite ritiro wr [%]	Indice Plasticità IP	Indice Consistenza Ic	Indice Attività Ia	Contenuto acqua w [%]
Media	45,3	22,3	8,8	22,0	-	1,0	30,1
Min	21,0	12,0	4,0	7,1	0,1	0,4	11,6
Max	75,0	44,0	16,0	42,7	1,4	11,2	59,9
n dati	103	103	6	103	86	96	102
St.Dev	10,6	5,8	4,7	7,7	0,3	1,1	9,7

Figura 6.18 – Carta di plasticità di Casagrande per l'unità LIMO



Dal grafico sovrastante si evince che nei campioni definiti “limo” è presente una forte componente di frazione argillosa (dall’analisi granulometrica risulta che i campioni di “limo” possono comprendere fino ad un 48% di argilla).

Tabella 6-18. Caratterizzazione fisica per l'unità L da prove di laboratorio.

	γ [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	e	n [%]	Sr [%]
Media	18,4	25,8	14,5	18,8	0,8	47,7	93,8
Min	15,5	23,3	10,2	16,0	0,4	26,7	83,0
Max	21,5	26,9	19,2	21,8	1,6	100,0	100,0
n dati	101	117	81	81	101	88	94
St.Dev	1,4	0,4	2,0	1,3	0,3	15,6	4,1

6.6.5 Caratteristiche di resistenza

Inoltre in laboratorio sono disponibili i risultati di prove di taglio diretto e triassiali drenate che hanno prodotto i seguenti risultati medi: dato coesione drenata di 12.6 ÷ 23.0 kPa ed angolo di resistenza al taglio 21.8÷25.7° per quanto riguarda la prova di taglio diretta.

Tabella 6-19 – Riepilogo dati prove di laboratorio, unità LIMO

	Prova di Taglio CD		Prova Taglio Residuo		Prova Triassiale UU		Prova Triassiale CIU				Prova Triassiale CID	
	c' [kPa]	ϕ [°]	c' [kPa]	ϕ [°]	Cu [kPa]	ϕ [°]	Cu [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	ϕ [°]	c' [kPa]	ϕ [°]
Media	19.3	26.3	12.6	25.7	95.6		25.3	22.2	23.0	23.5	19.1	24.2
Min	5.4	21.8	12.6	25.7	41.7		25.3	22.2	10.0	20.0	10.1	22.1
Max	50.0	38.5(*)	12.6	25.7	185.5		25.3	22.2	36.0	25.6	25.0	29.0
n dati	28	30	1	1	19		1	1	2	3	12	12
St.Dev	10.2	4			38.9				18.6	3.1	5.3	2.0

(*) i valori appartenenti al rango superiore ($>30^\circ$) sono riconducibili alla componente sabbiosa inclusa nei campioni di limo sabbioso e/o limo con sabbia associati all'unità limo.

Nelle figure seguenti sono graficati i valori di angolo di attrito interno e di coesione efficace in relazione alla profondità per le prove di taglio diretto e prova triassiale CID.

Figura 6.19 – Distribuzione valori angolo di attrito interno, unità LIMO

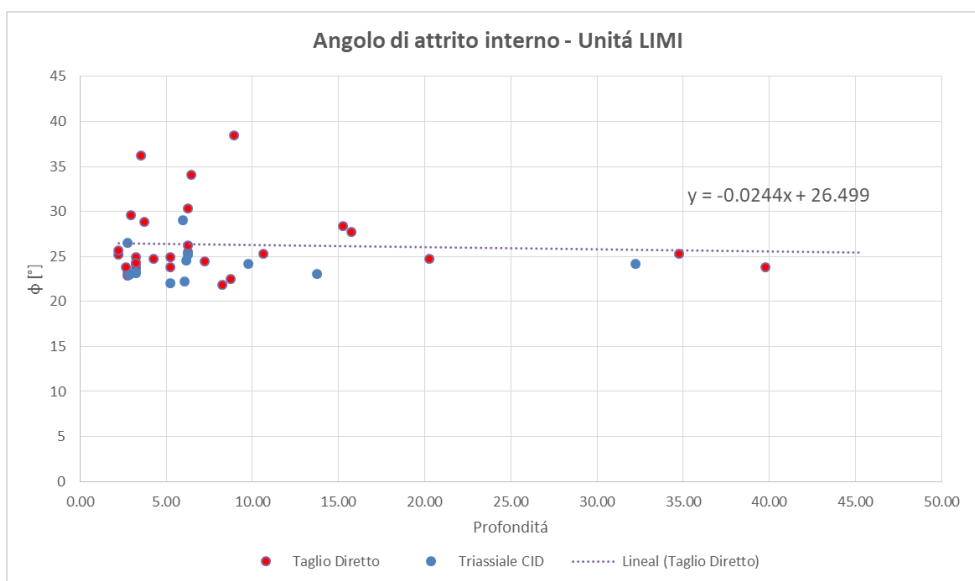
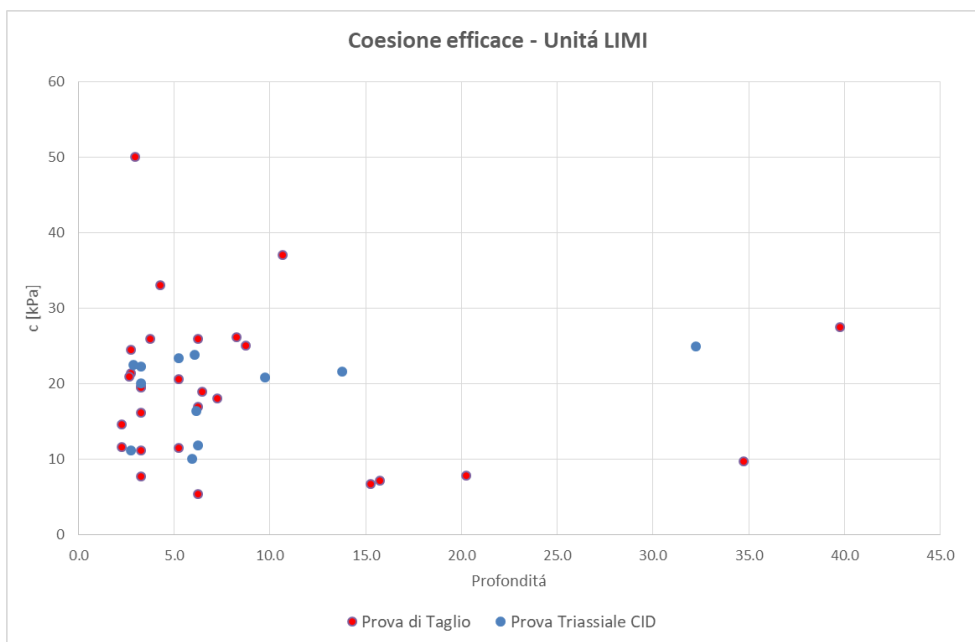


Figura 6.20 – Distribuzione valori coesione efficace, unità LIMO



	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 67 di 110

6.6.6 Caratteristiche di deformabilità

Per la caratterizzazione in termini di deformabilità, ci si basa principalmente sui risultati delle indagini sismiche (Down-Hole e Masw). In particolare si è considerato un rango di Vs compreso tra il valor medio ± 1 deviazione standard.

Tabella 6-20 – Riepilogo velocità medie prove MASW e DH, unità LIMO

		MASW		DH	
		z < 30 m		z < 30 m	30 < z < 50 m
med		231		267	421
min		136		227	354
max		470		373	571
st.dev		93		47	77

Tabella 6-21 – Riepilogo valori medi di G0 e E0 da prove MASW e DH, unità LIMO

		MASW		DH	
		z < 30 m		z < 30 m	30 < z < 50 m
Vs [m/s]		137 ÷ 324		220 ÷ 315	344 ÷ 498
G0 [MPa]		33 ÷ 182		84 ÷ 172	205 ÷ 430
E0 [MPa]		85 ÷ 472		218 ÷ 446	533 ÷ 1119

A partire delle prove edometriche si può ricavare il Coefficiente di Compressibilità C_c (vedasi **Figura 6.2**) ottenendo:

	Cc
med	0.29
min	0.19
max	0.55
St.Dev	0.10

6.6.7 Correlazioni e confronto con dati di laboratorio

In base alla relazione per la stima della Cu dai valori di SPT indicata nel paragrafo 6.3.2.2, la Figura 6.21 e la Tabella 6-22, riepilogano i dati ottenuti.

Figura 6.21 – Distribuzione valori Cu ottenuti da SPT

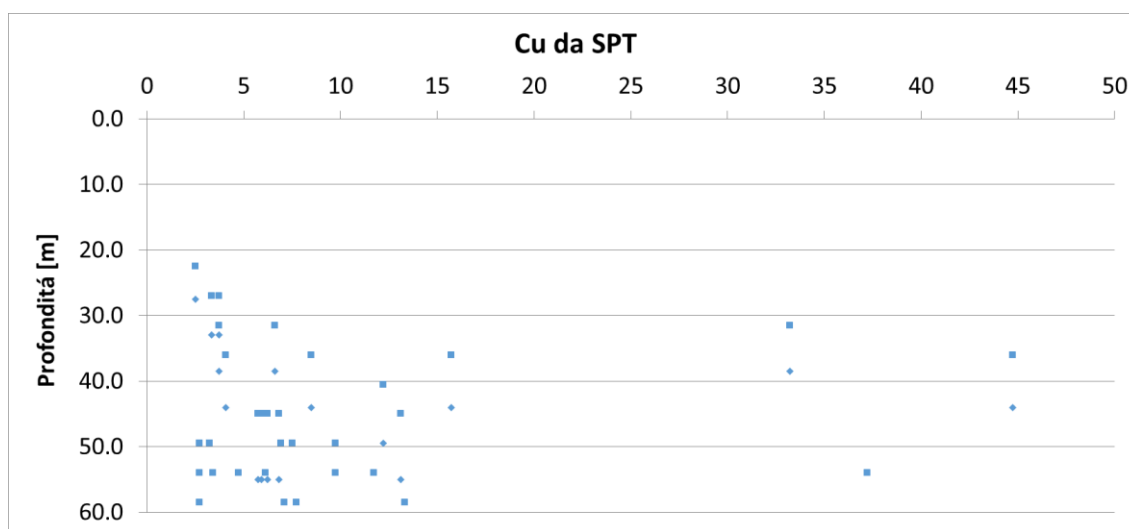


Tabella 6-22 - Sintesi valori della coesione non drenata da SPT per Unità LIMO

	Cu_limo Soft	Cu_limo Firm-stiff	Cu_limo Hard
Nspt di riferimento medio (min-max)	8 (5 - 11)	15 (10 - 20)	28 (20 - 40)
Cu media (min-max) [kPa]	36 (22.5 - 49.5)	67.5 (45 - 90)	126 (90 - 180)

A partire delle prove CPTU si ottiene una Cu media di 163 kPa (variabile tra 160 e 170 kPa), (la prof media è 6.6 m, e varia tra prof medie comprese tra 3.3 e 10.8 m, per la stima si è considerato un intervallo tra 1 e 12 m).

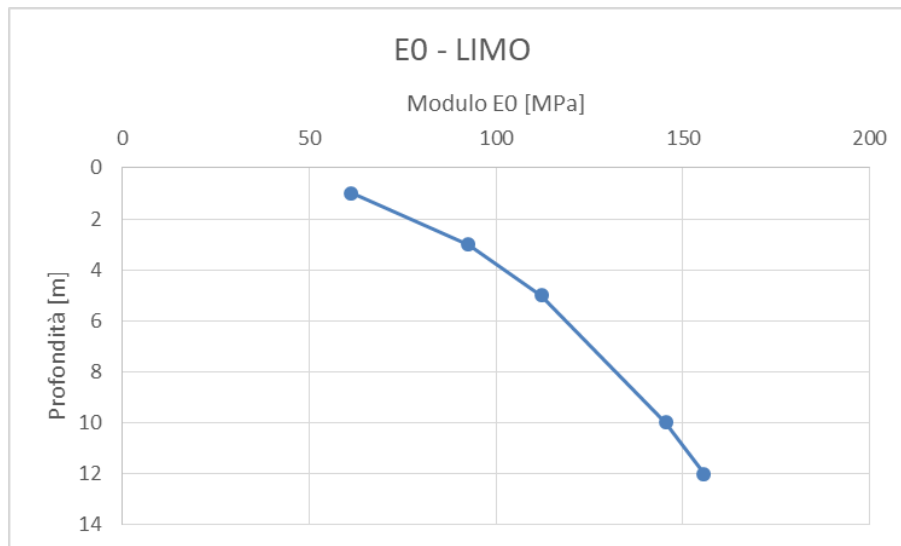
Valori di G0 ed E0 ottenuti da prove CPTU, calcolando la media su un intervallo 1 – 12 m (prove CPTU hanno come range di profondità medie 3.3 – 10, con profondità media di 6.6 m):

Tabella 6-23 – Modulo G0 da formula di Rix e Stokoe – Unità LIMO

	G0 rix [MPa]	E0 [MPa]
Media	44	113
Min	24	75
Max	60	152
St.Dev	14.84	38.60

Nella figura seguente viene graficato il valore di E0 in funzione della profondità.

Figura 6.22 – Andamento modulo E0 in funzione della profondità – Unità LIMO



6.6.8 Sintesi dei risultati per l'unità LIMO

In questo paragrafo si indica la sintesi dei risultati per l'unità LIMO e si identificano gli intervalli dei parametri geo-meccanici.

L'intervallo dei valori per il peso di volume è stato definito considerando i risultati da prove di laboratorio che restituiscono valori compresi tra 15.5 e 21.5 kN/m³ con un valor medio di 18.4 kN/m³; si assume per questa unità, LIMO, il seguente intervallo di valori:

- $\gamma = 17.0 \div 19.8 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale

Per l'angolo di resistenza al taglio si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio:

- $\phi' = 21.8 \div 29.6^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio CD (escludendo i risultati $>30^\circ$)
- $\phi' = 20.0 \div 25.6^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio TxCIU
- $\phi' = 22.1 \div 29.0^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio TxCID

Per l'unità LIMO, si definisce il seguente rango di valori di angolo di attrito in modo da definire un intervallo centrato sul valore medio pari a 23.5° (compreso tra il valore minimo e medio delle prove di taglio diretto e coincidente con il valor medio delle prove triassiali CIU):

- $\phi' = 22 \div 25^\circ$ angolo di resistenza al taglio

Per la coesione drenata si fa riferimento ai risultati delle prove di laboratorio dalle quali si riscontra una variabilità tra 5.4÷50.0 kPa. Si assume, trascurando cautelativamente i valori massimi, il seguente intervallo di valori della coesione drenata:

- $c' = 5 \div 30 \text{ kPa}$ coesione drenata

Per la coesione non drenata si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio e in sito:

- $c_u = 25 \div 185 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove di laboratorio
- $c_u = 22 \div 180 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove SPT
- $c_u = 160 \div 166 \text{ kPa}$ coesione non drenata da prove CPT

Si assume quindi per per l'unità LIMO, , il seguente range di valori di coesione non drenata:

- $C_u = 20 \div 180 \text{ kPa}$ coesione non drenata

Dai risultati delle prove sismiche (Down-Hole e Masw) e tramite correlazioni basate su prove CPTU e velocità delle onde di taglio (Vs) si ottengono i seguenti valori di E0 (valore medio $\pm$ dev.St.):

- $E_0 = 85 \div 472 \text{ MPa}$ da prove MASH prof 0-10m
- $E_0 = 218 \div 446 \text{ MPa}$ da prove DH per $z < 30$
- $E_0 = 533 \div 1119 \text{ MPa}$ da prove DH per $30 < z < 50$
- $E_0 = 75 \div 152 \text{ MPa}$ da prove CPTU prof media 6.6m (prof medie da 3 a 10m)

Quindi si definisce il seguente rango:

- $E_0 = 85 \div 1000 \text{ MPa}$

E si stimano i seguenti intervalli di di valori per il modulo di deformazione "operativo" pari a:

- $E = E_0 / 5 \Rightarrow 15 \div 200 \text{ MPa}$ per le opere di sostegno e per le fondazioni;
- $E = E_0 / 10 \Rightarrow 8 \div 100 \text{ MPa}$, nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati.

In corrispondenza dell'unità in esame sono state eseguite le prove di permeabilità tipo Lefranc dalle quali si ottiene il seguente valore medio della permeabilità, che indica depositi con permeabilità medio-bassa (compresa tra 10^{-7} e 10^{-6} m/s):

- $k = 3.5 \cdot 10^{-6}$ m/s m/s coefficiente di permeabilità

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 72 di 110

6.7 UNITÀ S - SABBIA

Le sabbie principalmente si dividono in due sub-unità: sabbie con una componente fine argillosa-limosa, e sabbie medie, con componente ghiaiosa talvolta. Si presentano da moderatamente consistenti a mediamente consistenti-consistenti. Generalmente presentano colore sulla tonalità marrone (da chiaro/avana a scuro) oppure grigio, da debolmente a molto umide.

Figura 6.23 – Esempio cassetta – Unità SABBIA



Sondaggio BH1- profondità 15-20 m – descrizione 15.30 – 22.00m: Sabbie con ghiaia medio e medio grossolana e sabbie medie con ghiaia medio grossolana ciottolose. I ciottoli si presentano arrotondati così come le ghiaie medio grossolane, da addensate a molto addensate (conglomerati) per lo più calcaree debolmente umide.

*Sondaggio BH4 – profondità 15-20 m, **descrizione 13.00-24.00 m:** Sabbie fini con laminazioni piano parallele di colore ocre, molto umide, da poco a moderatamente addensate. Sono presenti tracce e patine di ossidazione di colore arancio. Sono altresì presenti ghiaie grossolane centimetriche arrotondati, poco frequenti. A 23,00 m dal p.c. si rinvencono frammenti di travertino fitoclastico.*

6.7.1 Prove in situ - Analisi SPT

Nel grafico seguente, sono rappresentati i valori di N_{SPT} in relazione alla profondità dove è stata effettuata la prova. Sono rappresentate due serie, una relativa al dato grezzo ed un'altra con i valori “corretti”. Nel caso di materiali granulari, oltre alla correzione relativa al livello freatico, è stato considerato il fattore correttivo CN per tenere in conto della profondità a cui è stata eseguita la prova.

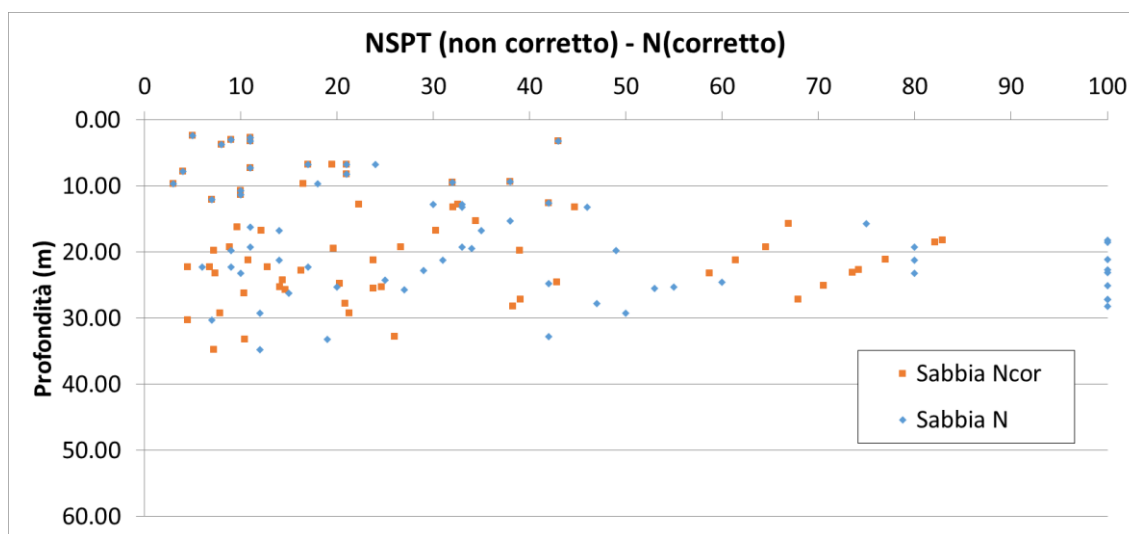
$$N_{corretto} = C_N \cdot N$$

Dove:

$$C_N = \left(\frac{1}{\left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right)^2} \right) \quad \text{per } \sigma'_v > 100 \text{ KN/m}^2$$

La Figura 6.24 e la Figura 6.25 rappresentano graficamente la distribuzione dei valori corretti e non corretti delle prove SPT effettuate sull'unità SABBIA (68 risultati in totale).

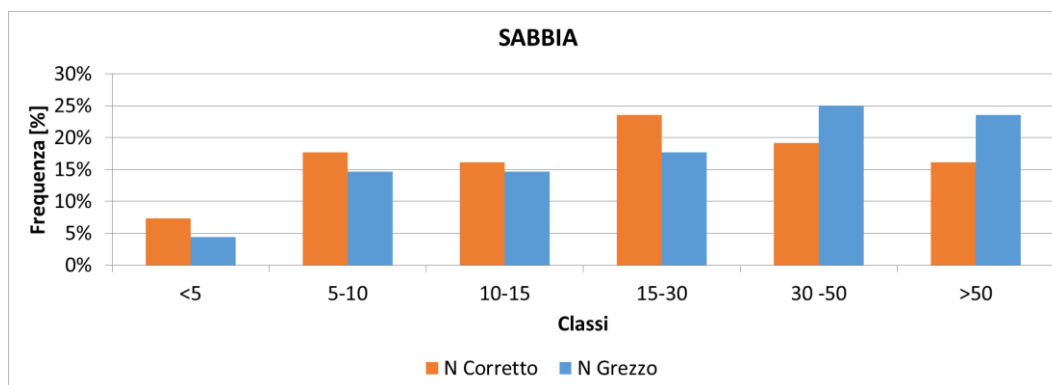
Figura 6.24 – Distribuzione in funzione della profondità dei valori di SPT per l'unità SABBIA



Dalle prove SPT si sono ottenuti valori di Nspt corretto compresi fra 3 e 83 colpi/30 cm, ad indicare un'estrema variabilità nel grado di addensamento dei depositi sabbiosi, anche dipendendo dalla composizione granulometrica. Si è proceduto a suddividere i risultati in due classi, in base al contenuto di particelle fini:

- Sabbie fini con una rilevante componente di fini (sabbie limoso - argillose)
- Sabbie medie - grossolane

Figura 6.25 - Distribuzioni in classi dei valori di SPT per l'unità SABBIA



Nella Tabella 6-24 sono riepilogati i valori medi, min e massimo delle prove Nspt suddivise secondo la

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 74 di 110

classificazione precedente, tenendo in conto i valori corrispondenti al rango di N_{spt} caratteristico delle due sub-unità.

Tabella 6-24 – Riepilogo valori N_{spt} in base alla classificazione tenendo in conto della presenza di materiale fine. Unità SABBIA

	Sabbie fini (limoso /argillose)	Sabbie medio-grossolane
Rango caratteristico	15-30 (43%)	30-50 (21%)
Media	21	37
Min	16	32
Max	26	45
n dati	13	8
St.Dev	11	16

6.7.2 Prove in situ – Analisi CPTU

Le prove CPTU sono state suddivise in base alla posizione del sondaggio ed al tipo di materiale incontrato, ottenuto dall'analisi del valore I_c e dal confronto con il profilo geologico. In questo modo si è potuto ottenere un valore medio di resistenza alla punta penetrometrica (q_c) e di attrito laterale (f_s) relativo all'unità analizzata, in questo caso SABBIA.

Nella Figura 6.26 è possibile vedere l'andamento dei valori di q_c e f_s in funzione della profondità per le prove eseguite, mentre nella Tabella 6-25 sono riepilogati i valori medi ottenuti.

Figura 6.26 – Andamento della resistenza alla punta (qc) per l'unità SABBIA (prove PD e PFTE)

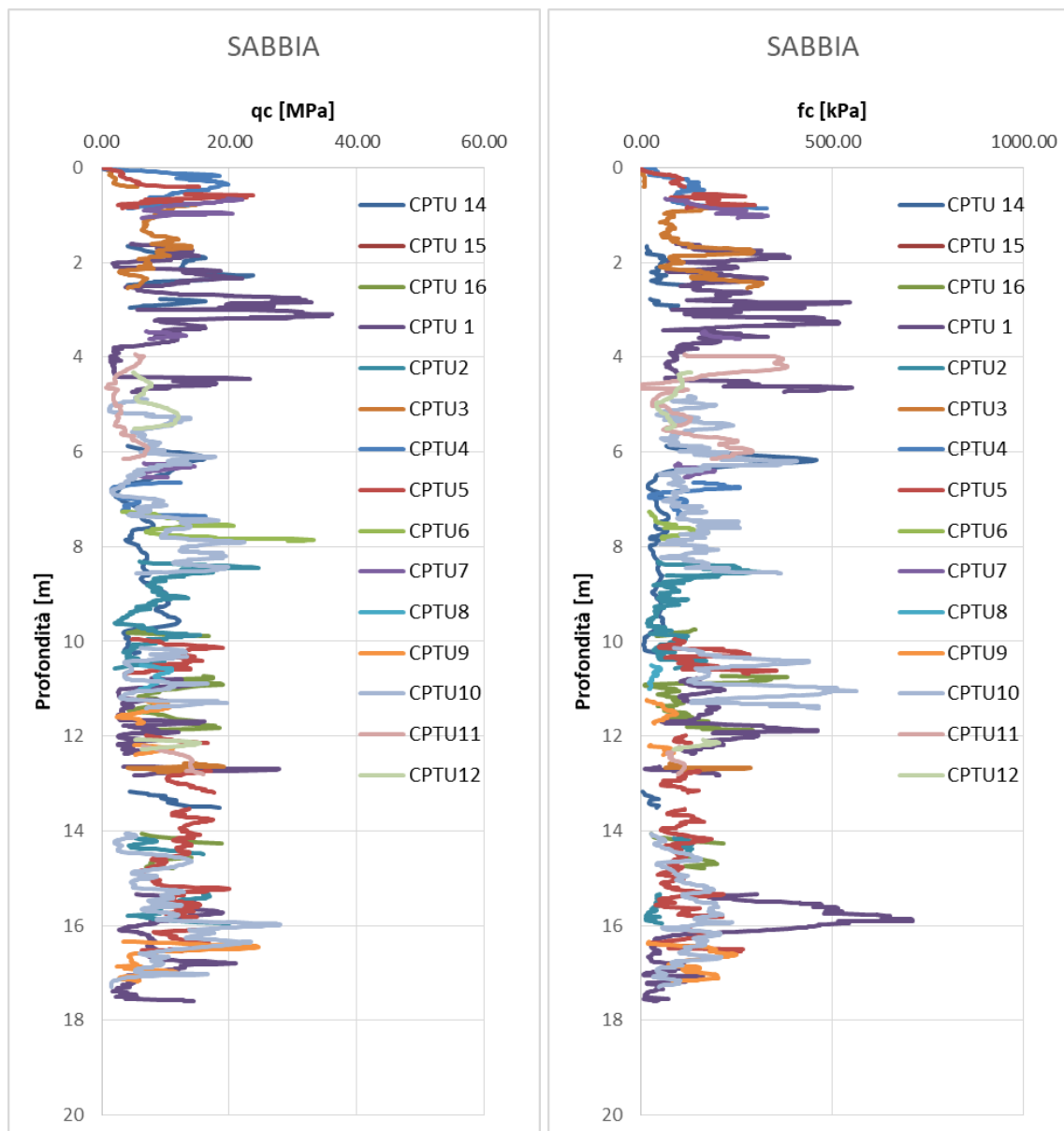


Tabella 6-25 – Valore medio resistenza alla punta qc e fc per l'unità SABBIA

	Unità SABBIA
Media Qc [MPa]	9.3
Media Fs [kPa]	112.0

6.7.3 Prove in situ – Permeabilità

In corrispondenza dell'unità in esame sono disponibili prove di permeabilità tipo Lefranc, che hanno dato valori di permeabilità compresi fra $1.2 \cdot 10^{-7}$ m/s e $1.3 \cdot 10^{-5}$ m/s; distinguendo le due sub-unità identificate, si possono definire i seguenti valori medi: $2.3 \cdot 10^{-6}$ m/s per le sabbie fini e $5.7 \cdot 10^{-6}$ m/s per le sabbie medio-grossolane.

Tabella 6-26. Coefficiente di permeabilità da prove Lefranc sull'unità SABBIA

	SL (sabbie fini)	S (sabbie medio-grosslane)
	K [m/s]	K [m/s]
Media	2.26E-06	5.72E-06
Min	1.20E-07	2.32E-06
Max	7.79E-06	1.37E-05
n dati	6	4
St.Dev	2.91E-06	5.38E-06

6.7.4 Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati su cui sono state eseguite prove di laboratorio. Dalle analisi granulometriche, il deposito è caratterizzato da:

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 0 e 39;
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 36 e 93;
- percentuale di limo generalmente compresa fra 7 e 41;
- percentuale di argilla generalmente compresa fra 0 e 26.

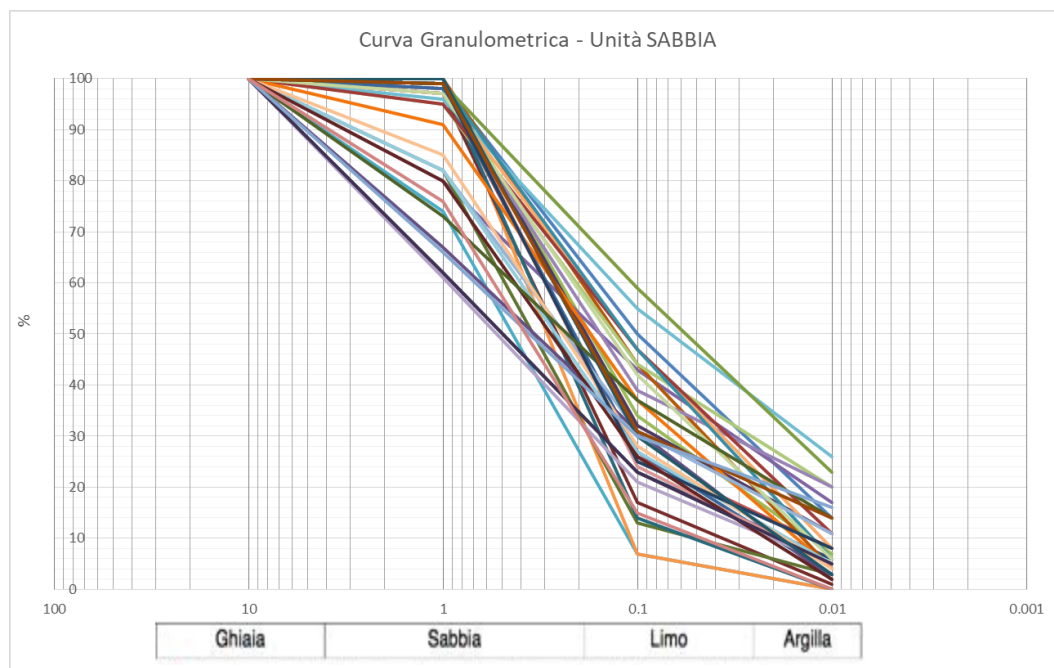
La Tabella 6-27 seguente riassume i dati medi relativi all'unità analizzata.

Tabella 6-27 – Riepilogo distribuzione granulometrica media unità SABBIA

	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]
Media	11.5	57.1	23.4	8.1
Min	0	36	7	0
Max	39	93	41	26
n dati	36	36	36	36
St.Dev	13.2	15.1	9.2	6.9

Di seguito il grafico che rappresenta la distribuzione granulometrica dei campioni appartenenti all'unità SABBIA

Figura 6.27. Composizione granulometrica unità SABBIA



Sui campioni di sabbia con un contenuto importante di particelle fini si sono potuti definire i limiti di Atterberg; i test eseguiti hanno dato valori di limite liquido 43-87%, limite plastico 19-41% e indice plastico 15-56%. Il contenuto naturale d'acqua è tra 20 e 47, i risultati sono riassunti nella Tabella 6-28 seguente:

Tabella 6-28. Granulometria e limiti di Attemberg per l'unità SABBIA (SL).

	Limite Liquidità wl [%]	Limite Plasticità wp [%]	Limite ritiro wr [%]	Indice Plasticità IP	Indice Consistenza Ic	Indice Attività Ia	Contenuto acqua w [%]
Media	34.2	21.8	5.0	12.3	0.7	1.2	28.3
Min	18.0	12.0	5.0	3.0	0.0	0.3	9.0
Max	55.0	43.0	5.0	21.0	1.3	3.2	149.6
n dati	18	18	1	18	16	17	30
St.Dev	11.8	8.7		5.0	0.4	0.7	26.2

Nella Tabella 6-29 sono invece riportati i valori del peso di volume naturale ottenuto dalle prove di laboratorio, come si può vedere essi ricadono nell'intervallo tra 16.1 e 21.4 kN/m³, con un valore medio pari a 19.1 kN/m³.

Tabella 6-29. Caratterizzazione fisica per l'unità SABBIA da prove di laboratorio

	γ kN/m ³	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	e	n %	Sr %
Media	19.1	26.0	16.0	19.7	0.7	38.7	85.2
Min	16.1	24.9	10.8	16.4	0.3	24.2	50.5
Max	21.4	26.5	19.4	21.7	1.3	57.0	99.0
n dati	25	37	22	22	24	22	25
St.Dev	1.5	0.3	2.3	1.5	0.3	8.5	11.8

6.7.5 Caratteristiche di resistenza

Inoltre sono disponibili i risultati di prove di taglio diretto e prove a compressione triassiale che hanno dato valori di coesione drenata tra 3 ÷ 19 kPa (media 7.7 kPa) ed angolo di resistenza al taglio 25.9 ÷ 31.6° (media 28.9°) per la prova di taglio diretto.

Tabella 6-30. Prove di laboratorio sull'unità SABBIA

	Prova di Taglio CD		Prova Triassiale CIU			
	c [kPa]	ϕ [°]	Cu [kN/m ²]	ϕ [°]	C' [kN/m ²]	ϕ' [°]
Media	7.7	28.9				30.5
Min	3.0	25.9				-
Max	19.0	31.6				-
n dati	14	14				1
St.Dev	4.1	1.6				-

Figura 6.28. Valori dell'angolo di resistenza al taglio per Unità SABBIA

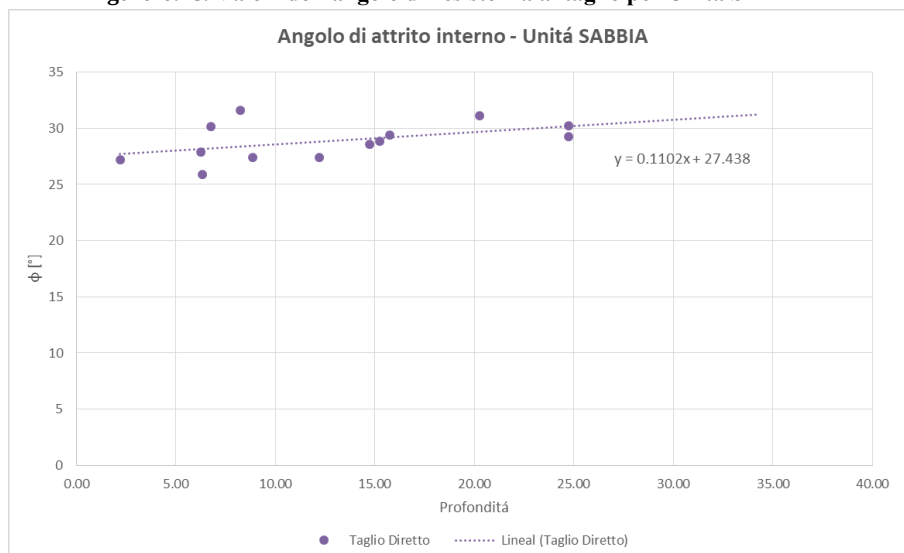
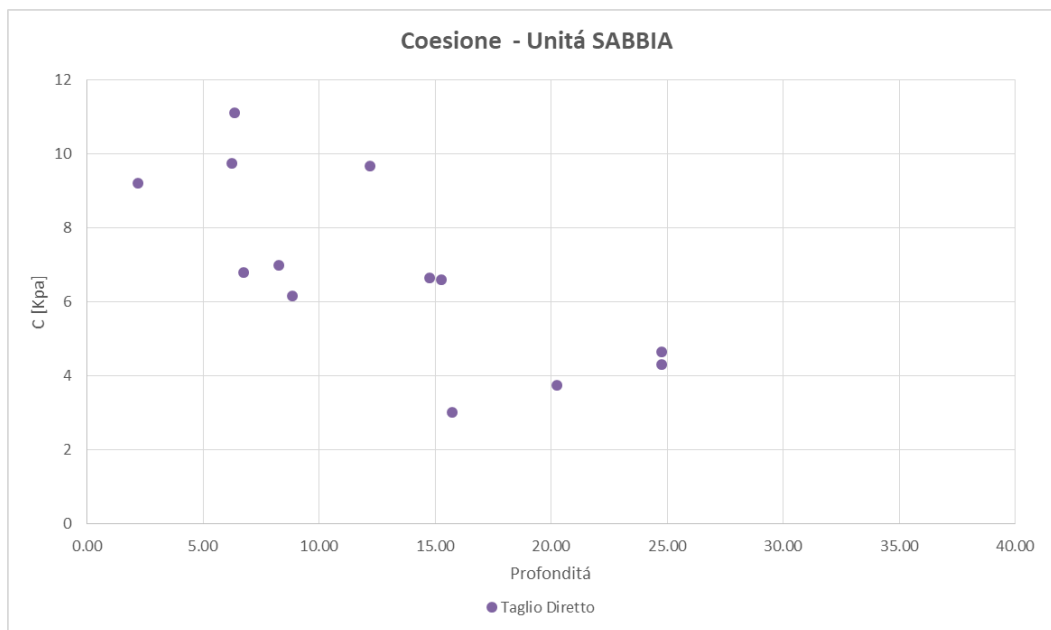


Figura 6.29. Valori della coesione efficace per l'unità SABBIA



6.7.6 Caratteristiche di deformabilità

Per la caratterizzazione in termini di deformabilità, ci si basa principalmente sui risultati delle indagini sismiche (Down-Hole e Masw). Inoltre nel seguente paragrafo si fa riferimento alle correlazioni di Ohta e Goto (1978) e Yoshida et al (1988) basate sui risultati dell'Nspt.

Dalle prove sismiche Down-Hole eseguite in questi terreni, si osservano velocità delle onde di taglio (V_s) comprese tra 311 m/s e 448 m/s, generalmente crescenti con la profondità; questi valori sono abbastanza superiori a quelli dall'interpretazione delle prove SPT, compresi tra 174 e 300 m/s. Da questi valori si stima un intervallo di valori del modulo di deformazione a taglio iniziale (G_0) ed elastico iniziale (a piccole deformazioni) (E_0) (valori ottenuti facendo media $\pm$ dev.st).

Sia nelle prove DH che in quelle MAWS, i risultati si riferiscono ad una profondità massima di 30 m.

Tabella 6-31 – Riepilogo velocità medie prove MASW e DH, unità SABBIA

	MASW (10-30 m)	DH (0-30 m)
	V [m/s]	V [m/s]
med	380	340
min	301	198
max	428	470
st.dev	69	106

Tabella 6-32 – Riepilogo valori medi di G0 e E0 da prove MASW e DH, unità SABBIA

	MASW	DH
	(10-30 m)	(0-30 m)
Vs [m/s]	311 ÷ 428	234 ÷ 446
G0 [MPa]	177 ÷ 336	101 ÷ 366
E0 [MPa]	461 ÷ 874	262 ÷ 951

6.7.7 Correlazioni e confronto con i dati di laboratorio

Di seguito vengono riportati i risultati delle correlazioni per i materiali granulari espone nel paragrafo 7.3.

Per la stima della densità relativa in funzione del Nspt si sono utilizzate le correlazioni di Gibbs & Holz (G & H) e di Terzaghi (T), ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 6-33 – Riepilogo correlazioni densità relativa, unità SABBIA

	Sabbia limosa/argillosa		Sabbia medio-grossolana	
	G & H	T	G & H	T
Media]	0.74	0.5	0.91	0.75
Min	0.5	0.5	0.7	0.7
Max	0.9	0.7	1.0	0.9
n dati	7	7	9	9
St.Dev	0.1	0.1	0.1	0.1

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori ottenuti dalle relazioni per il calcolo dell'angolo di attrito in funzione del Nspt.

Tabella 6-34 – Riepilogo risultati correlazioni per l'angolo d'attrito, unità SABBIA

	Sabbia limosa/argillosa		Sabbia media	
	φ Peck	φ schemert	φ Peck	φ schemert
Media	33.5	41.2	36.8	45.1
Min	30.2	33.2	33.7	41.0
Max	35.9	45.4	39.5	48.0
n dati	7	7	9	9
St.Dev	1.8	4.0	1.9	2.3

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 81 di 110

Nella tabella seguente è invece determinato il valore dell'angolo di attrito dal valore di q_c medio ottenuto dall'analisi delle prove CPTU relative all'unità SABBIA. Il valore proposto si riferisce ad una profondità media di 20 m.

Tabella 6-35 – Determinazione angolo di attrito a partire da prove CPTU

	ϕ 1(CPTU)	ϕ 2 (CPTU)
Valore medio ad una profondità di 20 m	37.6	37.9

Infine, i dati ottenuti dalle prove MASW e DH sono stati confrontati con i risultati ottenuti dalle correlazioni per la determinazione della velocità attraverso le formule di Ohta e Yoshida (a partire da N_{spt}) e di Rix e Stokoe (a partire da CPTU). Una volta determinata la V_s è possibile stimare i parametri di deformazione G_0 e E_0 .

Tabella 6-36 – Determinazione V_s , G_0 e E_0 da prove in situ N_{spt} , unità SABBIA

	Sabbie fini, Limoso Argillose							Sabbie medio-grossolane					
	Ohta			Yoshida				Ohta			Yoshida		
	Vs [m/s]	G0 [MPa]	E0 [MPa]	Vs [m/s]	G0 [kPa]	E0 [kPa]		Vs [m/s]	G0 [kPa]	E0 [kPa]	Vs [m/s]	G0 [kPa]	E0 [kPa]
Media	222.0	92	239	197.1	72	187		248.3	114	296	258.3	123	320
min	179.6	59	154	173.8	55	144		226.0	94	244	237.3	103	269
max	264.5	128	334	235.7	102	265		287.0	151	393	300.9	166	432
n. dati	13	13	13	7	7	7		8	8	8	9	9	9
St. Dev	30.4	24	64	23.1	17	45		18.6	18	46	22.3	22	57

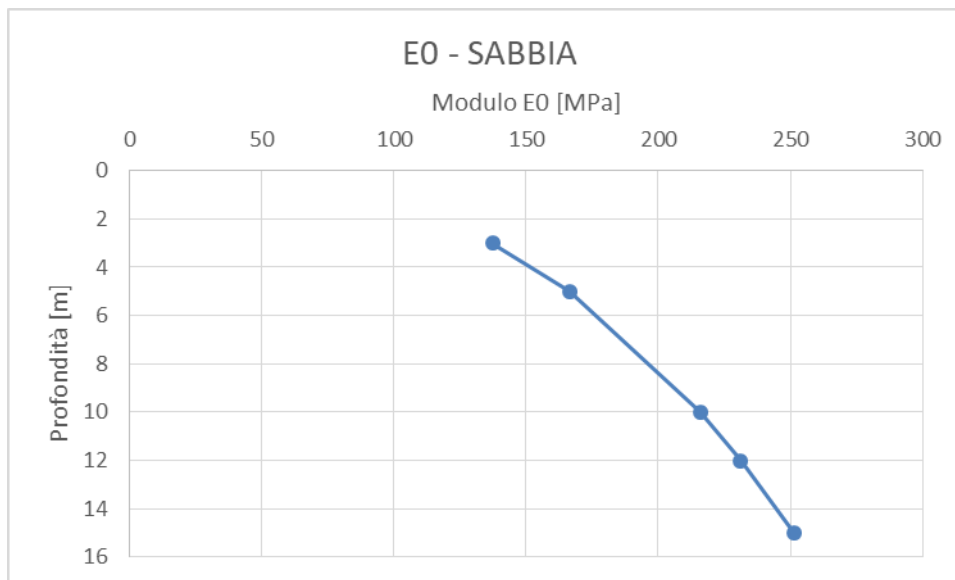
I valori di G_0 ed E_0 ottenuti a partire da prove CPTU, calcolando la media su un intervallo 3 – 15m (le prove CPTU hanno come range di profondità medie 2.3 – 14, con profondità media di 8.4 m) sono i seguenti:

Tabella 6-37 – Modulo G_0 da formula di Rix e Stokoe – Unità SABBIA

	G_0 [MPa]	E_0 [MPa]
Media	74	192
Min	54	142
Max	93	243
St.Dev	19.5	50.7

Nella figura seguente viene graficato il valore di E_0 in funzione della profondità.

Figura 6.30 – Andamento modulo E_0 in funzione della profondità – Unità SABBIA



6.7.8 Sintesi dei risultati per l'unità SABBIA

Questo paragrafo raccoglie la sintesi dei risultati per l'unità Sabbia ed indica gli intervalli dei parametri meccanici.

L'intervallo dei valori per il peso di volume è stato definito considerando i risultati da prove di laboratorio che restituiscono valori compresi tra 16.1 e 21.4 kN/m³. Si assume per questa unità, Sabbia, il seguente intervallo di valori:

- $\gamma = 17.6 \div 20.6 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale

Per l'angolo di resistenza al taglio si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio e in sito:

- $\phi' = 25.9 \div 31.6^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove di laboratorio
- $\phi' = 30.2 \div 39.5^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove SPT usando correlazione di Peck

Per questa unità si ritengono significativi i seguenti intervalli, definiti dai risultati delle prove di laboratorio per quanto riguarda il limite inferiore (valore minimo per le sabbie limose, e valore medio per le sabbie medie) e dai risultati delle correlazioni (valori minimi della Tabella 6-34) per stabilire i limiti superiori.

- ϕ' (sabbia limosa/argillosa, SL) = $26 \div 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio
- ϕ' (sabbia media, S) = $29 \div 33^\circ$ angolo di resistenza al taglio

Per la coesione drenata si fa riferimento ai risultati delle prove di laboratorio dalle quali si riscontra una variabilità tra 3÷19 kPa. Si assume, trascurando cautelativamente i valori massimi ottenuti dai campioni dove è prevalente la frazione fine, il seguente intervallo di valori della coesione drenata per la sub-unità SL:

- $c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$ coesione drenata

Dai risultati delle prove sismiche (Down-Hole e Masw) e dall'analisi ottenuta correlando N_{spt} con la velocità delle onde di taglio (V_s) si ottengono i seguenti valori di E_0 (valore medio $\pm$ dev.St.):

- $E_0 = 150 \div 430 \text{ MPa}$ da correlazioni N_{spt} per $z < 30 \text{ m}$
- $E_0 = 461 \div 874 \text{ MPa}$ da prove MASH per prof 10-30 m
- $E_0 = 262 \div 951 \text{ MPa}$ da prove DH per $z < 36 \text{ m}$
- $E_0 = 142 \div 243 \text{ MPa}$ da prove CPTU prof medie da 2 a 15m

Quindi si definisce il seguente rango:

- $E_0 = 200 \div 800 \text{ MPa}$

E si stimano i seguenti intervalli di valori per il modulo di deformazione "operativo" pari a:

- $E = E_0 / 5 \Rightarrow 40 \div 160 \text{ MPa}$ per le opere di sostegno e per le fondazioni;
- $E = E_0 / 10 \Rightarrow 20 \div 80 \text{ MPa}$, nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati.

In corrispondenza dell'unità in esame sono state eseguite prove di permeabilità tipo Lefranc dalle quali si ottiene i seguenti valori medi della permeabilità:

- $k = 2.3 \text{ E}^{-06} \text{ m/s}$ per le sabbie fini
- $k = 5.7 \text{ E}^{-06} \text{ m/s}$ per le sabbie medio-grossolane

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 84 di 110

6.8 UNITÀ GHIAIA

Rientrano in questa categoria i materiali granulari di grosse dimensioni quali ghiaie e piccoli ciottoli, spesso con presenza di sabbia.

Figura 6.31 – Esempio cassetta, unità GHIAIA



Sondaggio BH3- profondità 20-25 m – **descrizione 17.00 – 25.00 m:** Ghiaie medie e medio grossolane eterometriche, sabbiose moderatamente addensate ad addensate debolmente umide, umide.

6.8.1 Prove in situ - Analisi SPT

In corrispondenza di questa unità sono disponibili i risultati di 37 prove SPT che hanno dato valori compresi fra 18 e 100 colpi/30 cm (Figura 6.32 e Figura 6.33).

Figura 6.32 – Distribuzione in funzione della profondità dei valori di SPT per l'unità GHIAIA

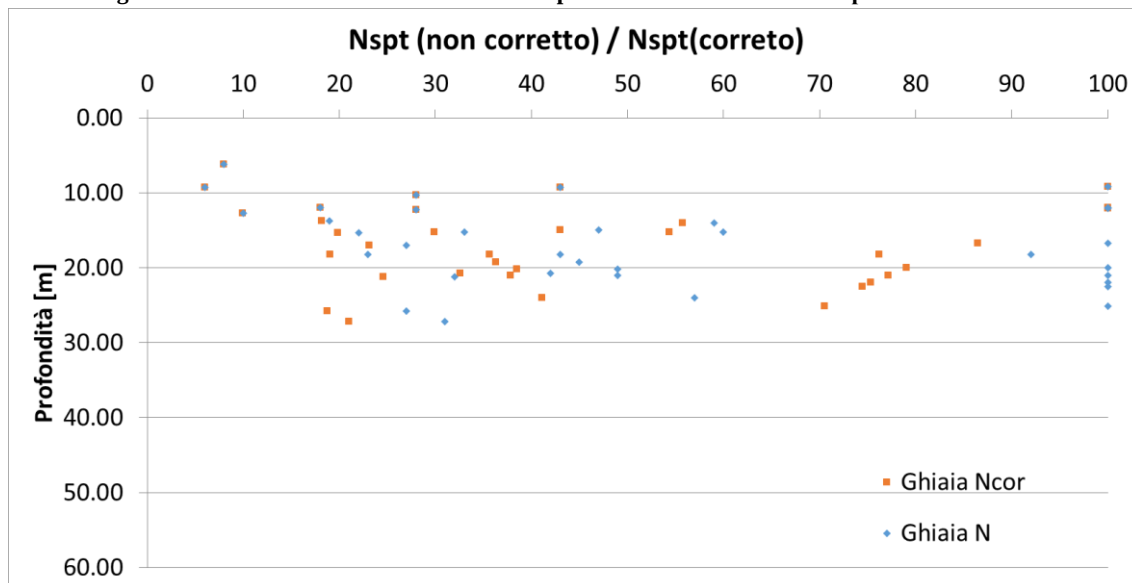
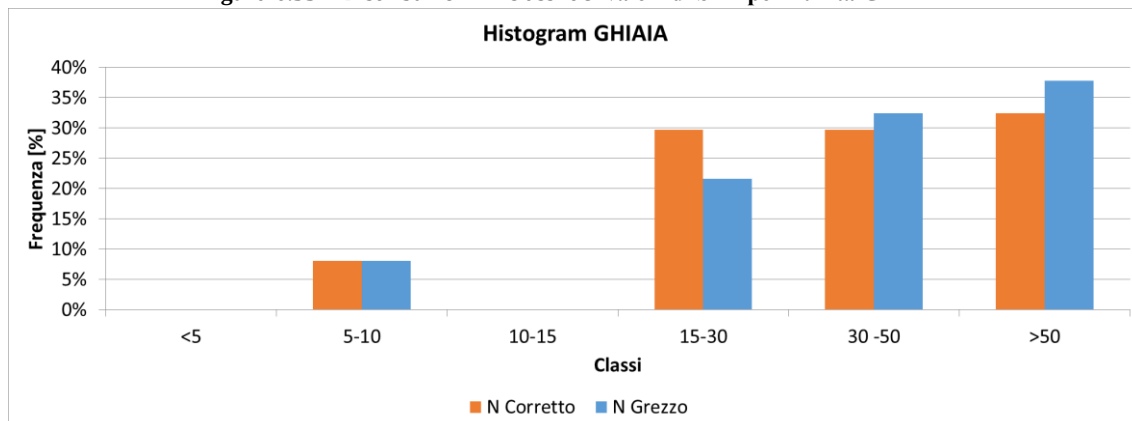


Figura 6.33 – Distribuzioni in classi dei valori di SPT per l'unità GHIAIA



	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 86 di 110

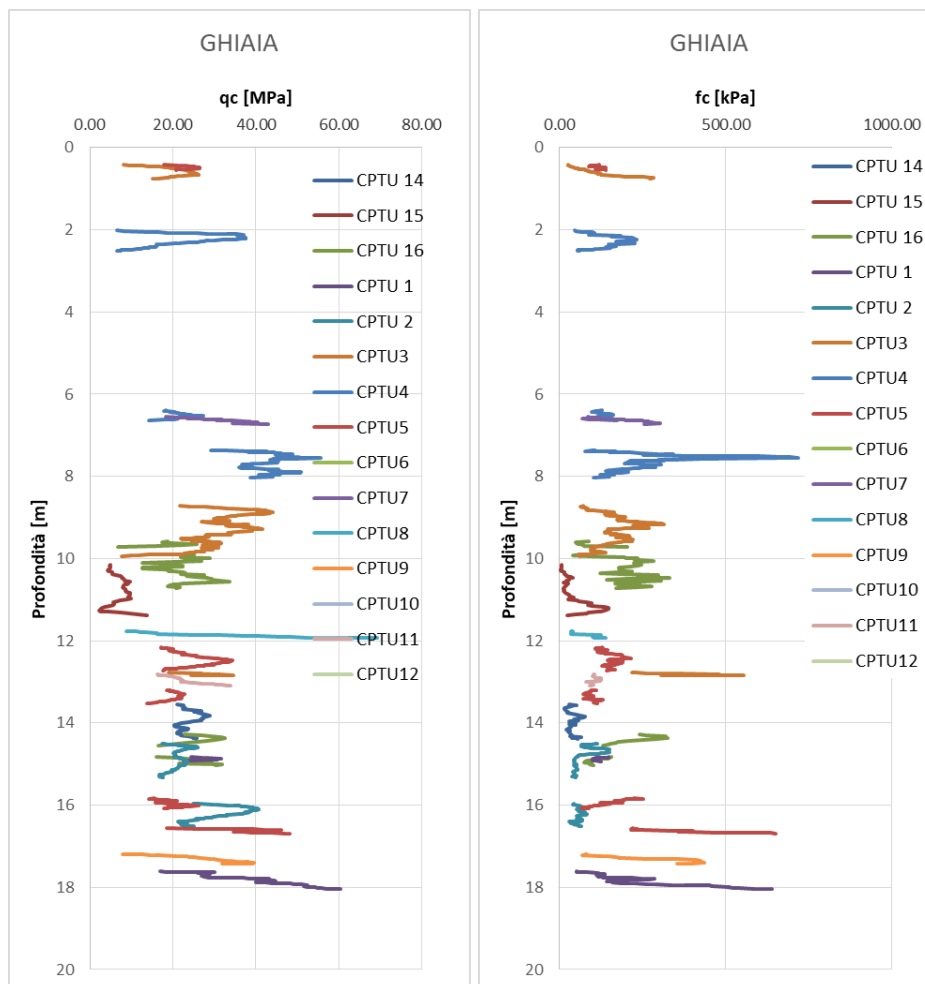
Tabella 6-38 – Riepilogo valori Nspt caratteristici per l'Unità GHIAIA

	Ghiaia
Rango caratteristico	30-50 (30%)
Media	40
Min	33
Max	49
n dati	8
St.Dev	5

6.8.2 Prove in situ – Analisi CPTU

Le prove CPTU sono state suddivise in base alla posizione del sondaggio ed al tipo di materiale incontrato, ottenuto dall'analisi del valore I_c e dal confronto con il profilo geologico. In questo modo si è potuto ottenere un valore medio di resistenza alla punta penetrometrica (q_c) e all'attrito laterale (f_s) relativo all'unità analizzata, in questo caso GHIAIA.

Nella Figura 6.34 è possibile vedere l'andamento dei valori di q_c ed f_s in funzione della profondità per le prove eseguite, mentre nella Tabella 6-39 sono riepilogati i valori medi ottenuti.

Figura 6.34 – Andamento della resistenza alla punta (q_c) per l'unità GHIAIA (prove PD e PFTE)

 Tabella 6-39 – Valore medio resistenza alla punta e f_s per l'unità GHIAIA

	Unità GHIAIA
Media Q_c [MPa]	26.0
Media F_s [kPa]	145.9

6.8.3 Prove in situ – Permeabilità

In corrispondenza dell'unità in esame sono disponibili due prove di permeabilità tipo Lefranc, che hanno dato valori di permeabilità di $1.1 \cdot 10^{-5}$ m/s e $1.5 \cdot 10^{-4}$ m/s; si ottiene quindi un valore medio della permeabilità pari a $7.8 \cdot 10^{-5}$ m/s, riconducibile ad un deposito a permeabilità medio-alta.

6.8.4 Caratterizzazione fisica da prove di laboratorio

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati su cui sono

state eseguite prove di laboratorio. Dalle analisi granulometriche, questa unità è caratterizzata da:

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 34 e 81;
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 13 e 39;
- percentuale di limo generalmente compresa fra 4 e 37;
- percentuale di argilla generalmente compresa fra 0 e 10

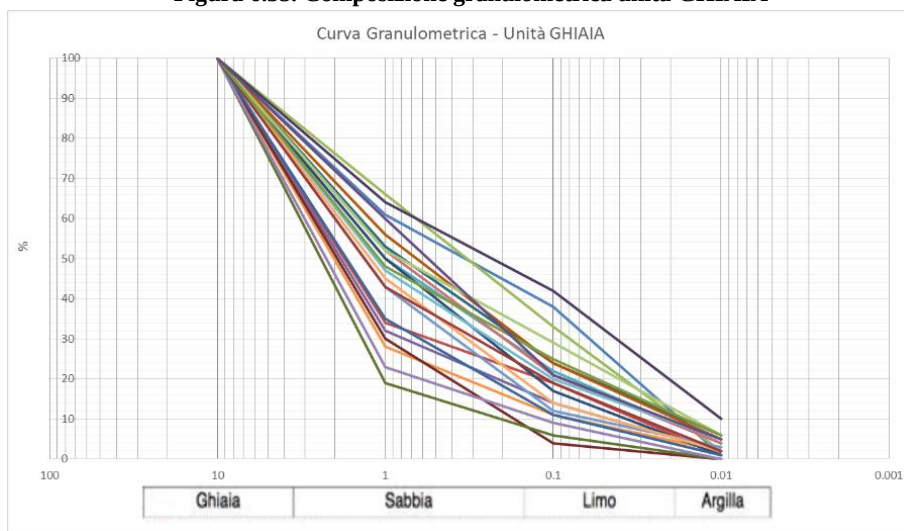
La seguente Tabella 6-40 riassume i dati medi relativi all'unità analizzata:

Tabella 6-40 – Riepilogo distribuzione granulometrica media unità GHIAIA

	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]
Media	55.0	25.3	16.7	3.4
Min	34	13	4	0
Max	81	39	37	10
n dati	22	22	22	20
St.Dev	13.3	6.9	8.3	2.5

Di seguito il grafico che rappresenta la distribuzione granulometrica dei campioni appartenenti all'unità GHIAIA.

Figura 6.35. Composizione granulometrica unità GHIAIA



Nei campioni contenenti una certa percentuale di fini, si è eseguita una caratterizzazione fisica per definire i limiti di Atterberg; i test eseguiti hanno dato valori di limite liquido compreso tra 15-39%, limite plastico 12-21% e indice plastico 1.3-24%. Il contenuto naturale d'acqua è tra 15 e 24, i risultati sono riassunti nella Tabella 6-41 seguente:

Tabella 6-41. Granulometria e limiti di Attemberg per la componente di fini compresa nell'unità GHIAIA

	Limite Liquidità wl [%]	Limite Plasticità wp [%]	Indice Plasticità IP	Indice Consistenza Ic	Indice Attività Ia	Contenuto acqua w [%]
Media	21.6	14.8	6.9	0.6	1.5	19.9
Min	15.0	12.0	1.3	0.6	0.6	15.4
Max	39.0	21.0	24.0	0.6	2.8	24.4
n dati	14	14	14	2	13	2
St.Dev	6.4	2.7	5.9	0.0	0.6	6.4

Nella Tabella 6-42 sono invece riportati i valori del peso di volume naturale ottenuto da prove di laboratorio (valore medio pari a 18.6 kN/m³), ed altri parametri per la caratterizzazione fisica (indice dei vuoti e, porosità n, ..).

Tabella 6-42. Caratterizzazione fisica per l'unità GHIAIA da prove di laboratorio

	γ kN/m ³	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	e	n %	Sr %
Media	18.6	26.1	15.5	19.4	0.7	39.5	78.8
Min	18.5	25.3	15.0	19.0	0.6	38.3	65.6
Max	18.7	26.9	16.0	19.8	0.8	40.7	92.0
n dati	2	22	2	2	3	2	2
St.Dev	0.1	0.3	0.7	0.6	0.1	1.7	18.7

6.8.5 Caratteristiche di resistenza

Per questa unità, è disponibile un'unica prova di laboratorio di taglio diretto, che ha fornito i seguenti risultati:

Tabella 6-43. Prove di laboratorio sull'unità GHIAIA

Prova di Taglio CD		
	c [kPa]	ϕ [°]
Media	8.1	28.6
n dati	1	1

6.8.6 Caratteristiche di deformabilità

Per la caratterizzazione in termini di deformabilità, ci si basa principalmente sui risultati delle indagini sismiche (Down-Hole e Masw). Dalle prove sismiche Down-Hole eseguite in questi terreni., si osservano velocità delle onde

di taglio (V_s) comprese tra 220 m/s e 600 m/s, generalmente crescenti con la profondità. Da questi valori si stimano valori del modulo di deformazione a taglio iniziale (G_0) ed elastico iniziale (a piccole deformazioni) (E_0):

Tabella 6-44 – Riepilogo velocità medie prove MASW e DH, unità GHIAIA

	MASW	DH	
	$z < 30$ m	$z < 30$ m	$30 < z < 50$ m
med	400	426	506
min	166	345	437
max	691	500	575
st.dev	180	61	98

Tabella 6-45 – Riepilogo valori medi di G_0 e E_0 da prove MASW e DH, unità GHIAIA

	MASW	DH	
	$z < 30$ m	$z < 30$ m	$30 < z < 50$ m
V_s [m/s]	220 ÷ 580	365 ÷ 487	408 ÷ 604
G_0 [MPa]	89 ÷ 616	244 ÷ 435	306 ÷ 668
E_0 [MPa]	230 ÷ 1602	634 ÷ 1131	796 ÷ 1738

6.8.7 Correlazioni e confronto con i dati di laboratorio

Di seguito vengono riportate i risultati delle correlazioni per i materiali granulari esposte nel paragrafo 7.3.

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori ottenuti dalle relazioni per il calcolo della densità relativa in funzione del N_{spt} (G & T = Gibbs & Holts, T = Terzaghi).

Tabella 6-46 – Riepilogo correlazioni densità relativa, unità GHIAIA

	G & H	T
Media	0.9	0.8
Min	0.7	0.7
Max	1.1	0.9
n dati	12	12
St.Dev	0.1	0.1

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori ottenuti dalle relazioni per il calcolo dell'angolo di attrito in funzione del N_{spt} .

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 91 di 110

Tabella 6-47 – Riepilogo risultati correlazioni per l'angolo d'attrito, unità GHIAIA

	ϕ Peck	ϕ schemert
Media	37.7	45.5
Min	33.5	39.2
Max	40.6	49.7
n dati	12	12
St.Dev	2.3	3.2

Nella tabella seguente è invece determinato il valore dell'angolo di attrito dal valore di q_c medio ottenuto dall'analisi delle prove CPTU relative all'unità GHIAIA. Il valore proposto si riferisce ad una profondità media di 20 m.

Tabella 6-48 – Determinazione angolo di attrito a partire da prove CPTU

	ϕ 1(CPTU)	ϕ 2 (CPTU)
Valore medio ad una profondità di 20 m	43.2	43.0

I dati ottenuti dalle prove MASW e DH sono stati confrontati con i risultati delle correlazioni per la determinazione della velocità attraverso le formule di Ohta e Yoshida (a partire da N_{spt}) e di Rix e Stokoe (a partire da CPTU). Una volta determinata la V_s è possibile stimare i parametri di deformazione G_0 e E_0 .

Tabella 6-49 – Determinazione V_s , G_0 e E_0 da prove in situ N_{spt} , unità GHIAIE (con SABBIA)

	Ohta			Yoshida		
	V_s [m/s]	G_0 [kPa]	E_0 [kPa]	V_s [m/s]	G_0 [kPa]	E_0 [kPa]
Media	251.4	118	306	302.6	168	438
min	182.2	61	158	280.6	144	376
max	283.8	148	384	325.3	194	505
n. dati	11	11	11	12	12	12
St. Dev	33.0	28	73	15.6	17	45

I valori di G_0 ed E_0 ottenuti a partire da prove CPTU, calcolando la media su un intervallo 5 – 20m (le prove CPTU hanno come range di profondità medie 5.6 - 17.3, con profondità media 12 m) sono i seguenti:

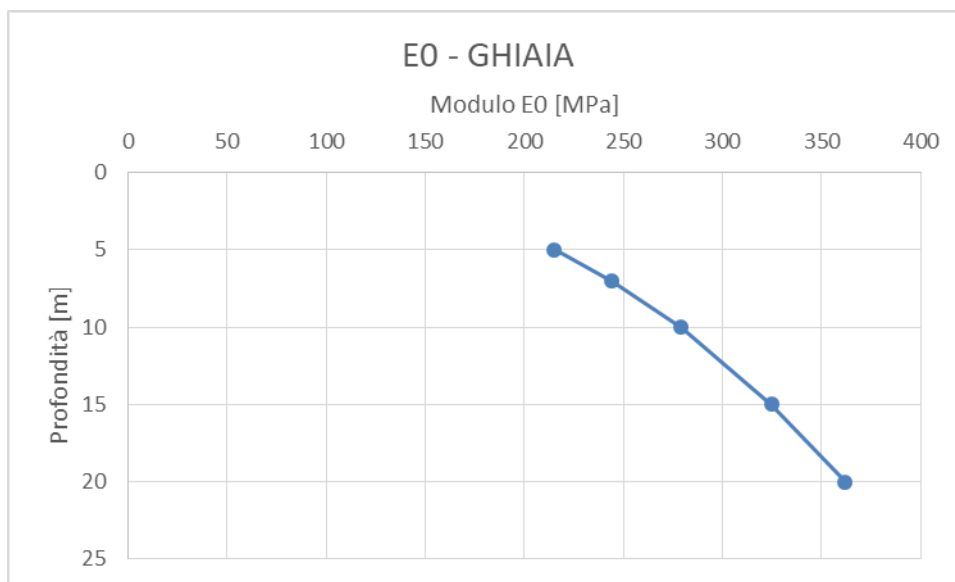
	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 92 di 110

Tabella 6-50 – Modulo G0 da formula di Rix e Stokoe – Unità GHIAIA

	G0 [kPa]	E0 [kPa]
Media	113	295
Min	89	231
Max	137	358
St.Dev	24.3	63.2

Nella figura seguente viene graficato il valore di E0 in funzione della profondità.

Figura 6.36 – Andamento modulo E0 in funzione della profondità – Unità GHIAIA



6.8.8 Sintesi dei risultati per l'unità GHIAIA

Qui di seguito si presenta la sintesi dei risultati per l'unità GHIAIA e la definizione degli intervalli dei parametri meccanici.

L'intervallo dei valori per il peso di volume è stato definito considerando i risultati da prove di laboratorio che restituiscono un valore medio di 18.6 kN/m^3 ; per questa unità si assume il seguente intervallo di valori:

- $\gamma = 18 \div 19 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale

Per l'angolo di resistenza al taglio si sono ottenuti i seguenti intervalli di valori da prove di laboratorio e in sito:

- $\varphi' = 28.6^\circ$ angolo di resistenza al taglio dell'unica prova di laboratorio effettuata
- $\varphi' = 33.5 \div 40.6^\circ$ angolo di resistenza al taglio da prove SPT (utilizzando la correlazione di Peck)

Si assume quindi per l'unità Ghiaia, il seguente range di valori di angolo di attrito (corrispondente ai valori minimo e medio dei risultati delle correlazioni):

- $\varphi' = 33.5 \div 37.7^\circ$ angolo di resistenza al taglio

Per la coesione drenata si assume un valore nullo ($c' = 0$).

Dai risultati delle prove sismiche (Down-Hole e Masw) e dall'analisi ottenuta correlando N_{spt} con la velocità delle onde di taglio (V_s) si ottengono i seguenti valori di E_0 (valore medio $\pm$ dev.St.):

- | | |
|--|-------------------------------|
| $E_0 = 375 \div 500 \text{ MPa}$ da correlazioni N_{spt} | per $z < 30 \text{ m}$ |
| $E_0 = 230 \div 1602 \text{ MPa}$ da prove MASH | per prof. da 12 a 30m |
| $E_0 = 634 \div 1131 \text{ MPa}$ da prove DH | per $z < 30 \text{ m}$ |
| $E_0 = 796 \div 1738 \text{ MPa}$ da prove DH | per $30 < z < 50 \text{ m}$ |
| $E_0 = 231 \div 358 \text{ MPa}$ da prove CPTU | prof. medie prove da 5 a 17 m |

Quindi si definisce il seguente rango:

- $E_0 = 300 \div 1500 \text{ MPa}$

E si stimano i seguenti intervalli di valori per il modulo di deformazione "operativo" pari a:

- $E = E_0 / 5 \Rightarrow 60 \div 300 \text{ MPa}$ per le opere di sostegno e per le fondazioni;
- $E = E_0 / 10 \Rightarrow 30 \div 150 \text{ MPa}$, nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati.

In corrispondenza dell'unità in esame sono state eseguite prove di permeabilità tipo Lefranc dalle quali si ottiene una permeabilità media pari a

- $k = 7.8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ coefficiente di permeabilità

6.9 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Nella seguente tabella si sintetizzano i valori dei parametri geotecnici di progetto per le unità geotecniche intercettate.

	Peso di volume naturale	Angolo di resistenza al taglio	Coesione drenata	Coesione non drenata	Modulo di deformazione elastico a piccole deformazioni	Nspt caratteristico	Permeabilità mediia
	γ	φ'	c'	C_u	$E_0^{(1)}$		k
	[kN/m ³]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[colpi/30 cm]	[m/s]
Riporto R⁽²⁾	18-20	31-33	-	-	100-150	5-25	~1.00 E ⁻⁰⁵
Argilla scarsa consistenza A1⁽³⁾	16-18	19-21	5-10	20-40	100-300 z<30 m	<5	5.6 E ⁻⁰⁸
Argilla media consistenza A2⁽⁴⁾	18-20	19-23	10-20	70-120	300-400 z<30 m	5-40	5.6 E ⁻⁰⁸
Limo scarsa consistenza L1⁽⁵⁾	17-19	22-25	2-5	20-50	85-200 z<30 m 200 – 600 30<z<50 m	<10	3.5 E ⁻⁰⁶
Limo media consistenza L2⁽⁵⁾	17-19	22-25	10-15	45-90	200-350 z<30 m 350-850 30<z<50 m	10-20	3.5 E ⁻⁰⁶
Limo alta consistenza, L3⁽⁵⁾	17-19	22-25	15-30	90-180	400-470 z<30 m 470-1000 30<z<50m	20-40	3.5 E ⁻⁰⁶
Sabbia Limosa SL⁽⁶⁾	18-20	26-30	0-5	-	200-400 z<36 m	15-30	1.2 E ⁻⁰⁷ - 3.6 E ⁻⁰⁶
Sabbia media S⁽⁶⁾	18-20	29-33	-	-	400-800 z<36 m	30-50	3.6 E ⁻⁰⁶ - 1.4 E ⁻⁰⁵
Ghiaia/sabbia G/S⁽⁷⁾	18-19	33-37	-	-	300-800 z<30 m 800-1500 30<z<50 m	30-50	7.8 E ⁻⁰⁵ - 1.5 E ⁻⁰⁴

Note:

⁽¹⁾ I moduli di deformabilità “operativi” (E') da adottare per le opere di sostegno e per le fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E_0). Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici “operativi” saranno assunti pari a 1/10 di quello iniziale. Nel caso di unità profonde, attraverso le prove DH, si sono distinti due ranghi: uno per profondità fino a 30 m, ed uno per profondità da 30 a 50 m.

⁽²⁾ Per caratterizzare il Riporto, non avendo a disposizione ulteriori dati, si sono tenuti in conto i parametri proposti in Fase di PFTE, si rimanda al paragrafo 6.4

⁽³⁾ Con riferimento ai parametri proposti in Fase di PFTE, si considera che la caratterizzazione ottenuta analizzando i dati a disposizione riguardanti le Argille sia appropriata unicamente per descrivere le Argille di media consistenza A2. Per questo motivo, si associano alle argille di scarsa consistenza A1 degli intervalli di parametri il cui estremo superiore grossomodo coincide con il limite inferiore della parametrizzazione ottenuta analizzando i dati disponibili.

⁽⁴⁾ Si rimanda al paragrafo 6.5.8 per la giustificazione dei parametri associati alla sub-unità A2.

⁽⁵⁾ Si rimanda al paragrafo 6.6.1 per la giustificazione dei parametri associati alle sub-unità L1,L2,L3. I valori di C_u si basano sulla Tabella 6-22. I valori di Modulo Elastico indicati dal PFTE sono stati confermati in base alle correlazioni basate sulle indagini geofisiche, quindi si sono confermati tali ranghi.

⁽⁶⁾ Si rimanda al paragrafo 6.7.1 per la giustificazione dei parametri associati alle sub-unità SL e S. I valori di c' si basano sulla Tabella 6-30. Si sono incrementati i valori di Modulo Elastico con rispetto a quelli indicati nel PFTE (e che all'incirca coincidono con i risultati delle correlazioni di *Ohta e Goto* e di *Yoshida et al.*) per tenere in conto dei risultati delle indagini geofisiche (prove Down-Hole e Masw).

⁽⁷⁾ Si rimanda al paragrafo 6.8.8 per la giustificazione dei parametri associati alla unità di ghiaia / sabbia G/S. I valori di angolo di attrito si basano sulle correlazioni a partire da N_{spt} , visto il limitato numero di prove di laboratorio eseguite su questa unità. Si sono incrementati i valori di Modulo Elastico con rispetto a quelli indicati nel PFTE (e che all'incirca coincidono con i risultati delle correlazioni di *Ohta e Goto* e di *Yoshida et al.*) per tenere in conto dei risultati delle indagini geofisiche (prove Down-Hole e Masw).

La stima dei parametri di progetto relativi alla Linea Storica tengono in conto di tutte le indagini eseguite ed analizzate nel contesto della relazione Geotecnica Generale redatta nell'ambito del Progetto Definitivo del Completamento della Metropolitana di Salerno, tratta Arechi – Pontecagnano Aeroporto. In questo modo la caratterizzazione di ogni unità si basa sul maggior numero di risultati disponibili, offrendo valori più rappresentativi.

I valori delle proprietà geotecniche indicati sono da intendersi come range di valori guida per la progettazione; resta inteso che nelle analisi geotecniche di dettaglio delle opere maggiori andranno calibrati sulla base delle condizioni geotecniche locali, delle specifiche situazioni locali, oltre che rapportati alla tipologia di opere (fondazioni pali o opere di sostegno) ed alle ipotesi di calcolo assunte.

7 FALDA

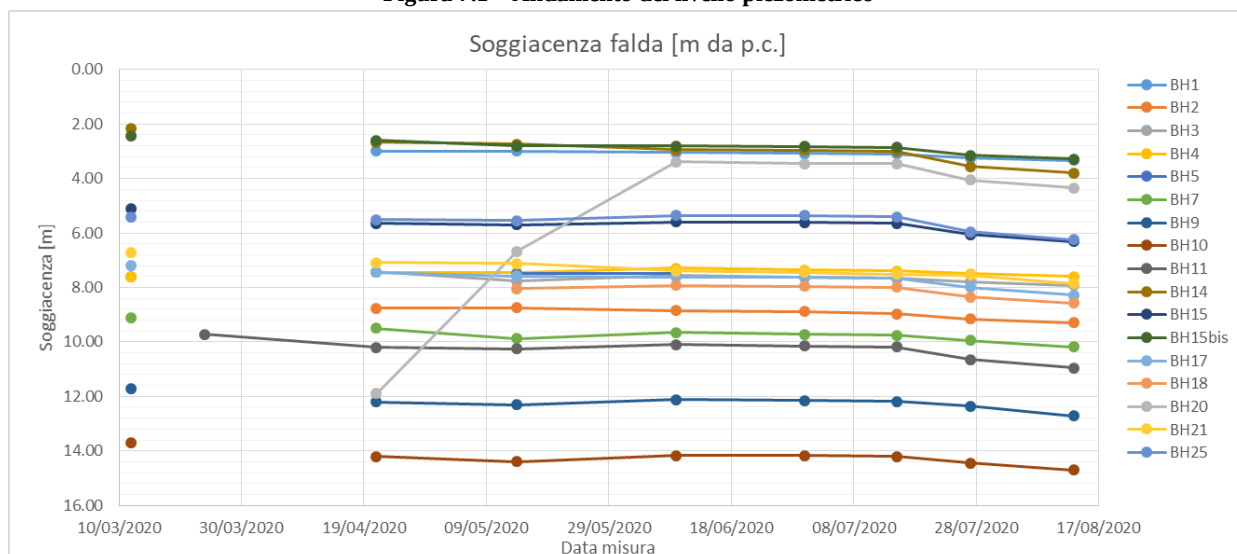
Nella seguente tabella si riportano le letture piezometriche disponibili a partire dai piezometri installati durante la campagna del progetto definitivo. Al momento della stesura del presente elaborato il periodo di monitoraggio copre 6 mesi, da marzo ad agosto 2020; per quanto fin'ora rilevato non si osservano oscillazioni importanti del livello di falda ad eccezione dello strumento installato in BH20 che ha presentato un innalzamento significativo della quota di falda (da circa -12m della prima lettura, a -4 m delle ultime letture a giugno e agosto - Probabilmente la prima lettura non è significativa).

Tabella 7-1 – Letture piezometriche effettuate

ID	pk	Quota profilo PD	12/03/2020	24/03/2020	21/04/2020	14/05/2020	09/06/2020	30/06/2020	15/07/2020	27/07/2020	13/08/2020
Piezometro	[m]	[m slm]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]	[m da pc]
BH1	0+011.5	6.20			3.00	3.00	3.05	3.08	3.10	3.25	3.34
BH2	0+540.4	12.61			8.76	8.75	8.85	8.89	8.96	9.15	9.30
BH3	0+910.0	12.85	7.60		7.43	7.77	7.54	7.62	7.67	7.78	7.92
BH4	1+247.0	15.11	7.60		7.45	7.44	7.29	7.36	7.40	7.50	7.59
BH5	1+555.0	17.85				7.50	7.50	7.59	7.62	8.00	8.28
BH7	1+785.0	21.27	9.13		9.50	9.87	9.65	9.72	9.76	9.95	10.19
BH9	2+395.0	24.28	11.70		12.20	12.30	12.12	12.15	12.18	12.35	12.71
BH10	3+150.0	27.39	13.70		14.20	14.40	14.17	14.18	14.21	14.45	14.71
BH11	3+570.0	23.96		9.72	10.20	10.25	10.10	10.15	10.19	10.65	10.95
BH14	5+785.0	27.14	2.15		2.67	2.74	2.94	2.96	3.00	3.55	3.79
BH15	6+075.0	28.68	5.10		5.65	5.69	5.60	5.61	5.65	6.05	6.31
BH15bis	6+075.0	30.41	2.45		2.60	2.80	2.80	2.82	2.85	3.15	3.28
BH17	6+290.0	30.71	7.20		7.44	7.58	7.61	7.63	7.66	8.00	8.29
BH18	6+835.0	32.06				8.04	7.92	7.95	7.99	8.35	8.58
BH20	7+594.6	39.83			11.90	6.68	3.38	3.45	3.45	4.05	4.34
BH21	7+843.6	36.75	6.70		7.09	7.12	7.40	7.45	7.51	7.55	7.86
BH25	8+955.0	46.06	5.40		5.51	5.54	5.35	5.36	5.41	5.95	6.24

I valori di soggiacenza della falda si mantengono praticamente costanti con una variazione compresa in generale tra 0.05-0.5m, presentando un abbassamento nelle ultime misure, legata probabilmente al periodo estivo. Le letture sono graficate nella figura seguente.

Figura 7.1 – Andamento del livello piezometrico



	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 97 di 110

8 LIQUEFAZIONE

Il presente capitolo illustra le valutazioni effettuate in merito alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni di fondazione in relazione alla pericolosità sismica dei siti relativamente alla Linea Storica, ovvero i lavori inseriti all'interno del Lotto 01 del Progetto Definitivo del collegamento della Linea metropolitana di Salerno.

Lo studio descrive i risultati delle analisi di suscettibilità alla liquefazione dei terreni costituenti il sottosuolo, sviluppate attraverso l'interpretazione delle indagini eseguite relative al PFTE e ai nuovi dati relativi alle indagini svolte per questa fase progettuale, comprendenti indagini SPT, CPTU e Down Hole.

Di seguito viene riportato la teoria che segue l'analisi del rischio di liquefazione e vengono riportati i risultati delle analisi effettuate per il Lotto 00, in particolare le verifiche inerenti alle opere superficiali.

La liquefazione è un fenomeno per cui durante un sisma la rigidità e la resistenza del terreno possono ridursi significativamente. Ad essa sono associati la perdita di resistenza al taglio o l'accumulo di deformazioni plastiche che avvengono in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, a causa delle azioni cicliche e dinamiche che si verificano in condizioni non drenate. Tali fenomeni sono legati allo sviluppo di sovrappressioni interstiziali che, se positive, causano una diminuzione della tensione media efficace nel terreno ed una riduzione della resistenza al taglio. Questa riduzione può essere una condizione temporanea o può indurre una condizione di collasso definitiva.

Il fenomeno della liquefazione è profondamente influenzato dal numero dei cicli N del terremoto, dalla densità relativa D_r e dalla granulometria del terreno. Un terreno incoerente, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere di N (cicli del terremoto).

Il raggiungimento della condizione di liquefazione può dare origine ad effetti di varia natura, quali, nei casi più eclatanti:

- affondamento di edifici nel terreno;
- scorrimento di pendii;
- collasso di terrapieni, rilevati stradali e opere di terra in genere;
- collasso di palificate per perdita di connessione laterale;
- zampillio di copiosi getti d'acqua e di sabbia con formazione dei caratteristici coni eruttivi;
- collasso di opere di sostegno per sovrappinta del terreno a monte.

In questo contesto, il problema principale che si pone in fase di progettazione è la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o

lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limoso-argillosa. In altre parole, è necessario valutare il potenziale di liquefazione del terreno ove devono essere realizzate le opere in progetto.

Le NTC18 al paragrafo 7.11.3.4.2 affermano che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field minori di 0.1 g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in tabella seguente nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ e nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

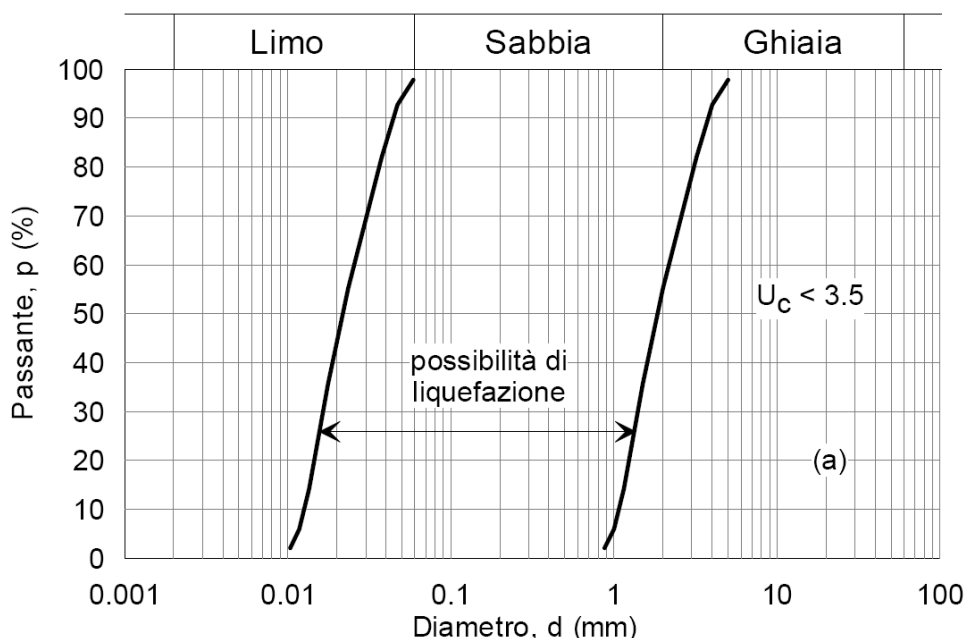


Figura 8.1 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per $U_c < 3.5$

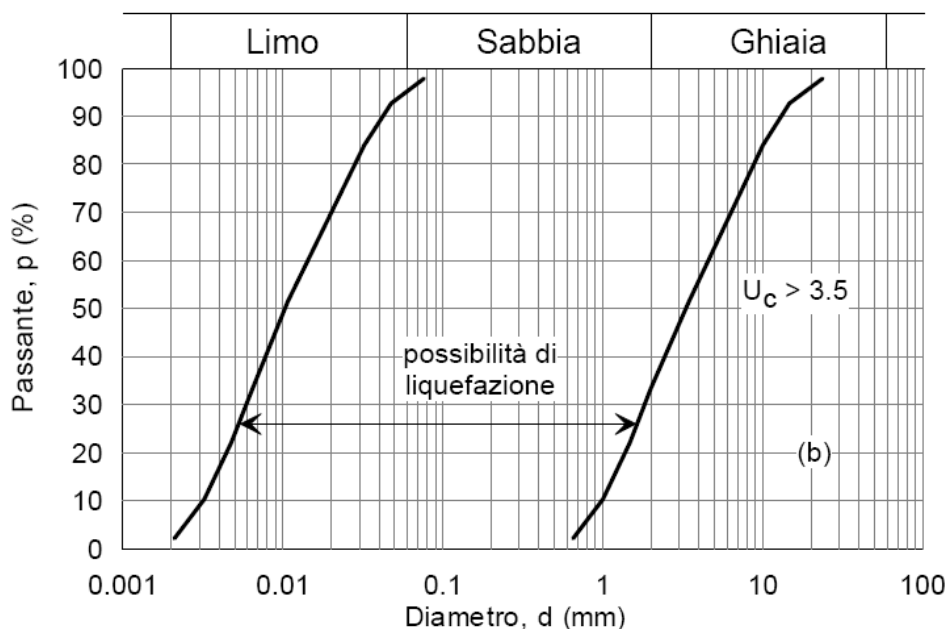


Figura 8.2 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per $U_c > 3.5$

Per il sito in esame, sulla base di quanto riportato nei capitoli precedenti, risulta che:

- l'evento sismico atteso è di magnitudo di progetto pari a $M = 6.8$;
- le accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field sono superiori a 0.1 g, raggiungendo massimi di 0.212 (valore massimo, cautelativamente utilizzato per la verifica delle opere superficiali);
- La falda risulta sempre ubicata nei primi 5-7 m da piano campagna, pertanto inferiore a 15 m dal piano campagna;
- in alcune zone sono presenti strati sabbiosi e/o limo-sabbiosi di bassa plasticità con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} < 30$.

Quindi per quanto previsto da normativa vigente, non è possibile escludere a priori la liquefazione; è necessario eseguire le dovute verifiche con i dati a disposizione relativi a prove SPT, CPTU e Down-hole.

Per il tracciato in esame la stima del potenziale rischio di liquefazione è stata eseguita sulle unità geotecniche ritenute suscettibili alla liquefazione, ovvero le unità S (sabbia) e SL (Sabbia Limosa), per una profondità massima di 20 m dal pc.

Si è considerato come valore limite una percentuale di fine (L+A) inferiore al 67% nei campioni prelevati in corrispondenza delle verticali indagate: per valori superiori di fine si riduce al minimo la suscettibilità delle particelle alla liquefazione poiché al diminuire della dimensione delle particelle aumentano i legami intramolecolari.

In particolare, per la definizione dei tratti di tracciato e la potenza dello strato interessato dal fenomeno della liquefazione sono stati usati i seguenti criteri:

- sono stati trascurati gli strati di terreno Sabbioso o Sabbioso Limoso al di sopra del livello massimo di falda (considerando inoltre un franco minimo di 0.5 m rispetto alla misura ottenuta dal profilo geologico) non essendo sabbie sature (7.11.3.4.1 NTC2018);
- in corrispondenza delle verticali dove le analisi granulometriche effettuate nei campioni prelevati hanno fornito valori della percentuale di fine superiore al 67% non sono state effettuate le verifiche ed è stato considerato assente il rischio a liquefazione. In accordo alla Classificazione Unificata, di validità generale, sviluppata dal Bureau of Reclamation e il Corps of Engineers, a favore di sicurezza escludiamo a priori le granulometrie con frazione passante al vaglio 0.075 mm maggiori dei 2/3 della curva (per cui $L+A > \text{del } 67\%$), perché non liquefacibile (Tab. 11.4);

Tab. 11.4 - Valutazione della Probabilità di liquefazione in funzione della classificazione dei suoli /depositi - Frazione passante al vaglio 0,075 mm min

MAGGIORI DIVISIONI	CLASSE	TIPO DI SUOLO	PROBABILITÀ DI LIQUEFAZIONE
Frazione passante al vaglio 0,075 mm ≤ al 50%	Ghiaie pulite Niente o poco fine	GW Ghiaie ben graduate Mistura di sabbia e ghiaia	Da bassa a moderata
		GP Ghiaie graduate male Mistura di sabbia e ghiaia	Bassa
	Ghiaie con fine	GM Ghiaie limose Mistura di ghiaia sabbia e limo	Moderata
		GC Ghiaie argillose Mistura di ghiaia sabbia e limo	Bassa
	Sabbie pulite Niente o poco fine	SW Sabbie ben graduate, sabbie ghiaiose	Alta
		SP Sabbie graduate male, sabbie ghiaiose	Da moderata ad alta
	Sabbie con fine	SM Sabbie limose Mistura di sabbia e limo	Da moderata ad alta
		SC Sabbie argillose Mistura di sabbia e argilla	Da bassa a moderata
Frazione passante al vaglio 0,075 mm > al 50%	Limi ed argille	ML Limi inorganici con plasticità da bassa a media, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose, argille magre	Da bassa
	Limite di liquidità < 50%	CL Argille inorganiche con plasticità da bassa a media, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose, argille magre	Non liquefacibile
		OL Limi organici ed argille limose organiche a bassa plasticità	Non liquefacibile
	Limite di liquidità > 50%	MH Limi inorganici, sabbie fini micacee o suoli limosi	Non liquefacibile
		CH Argille inorganiche ad alta plasticità, argille grasse	Non liquefacibile
		OH Argille organiche da media ad alta plasticità, limi organici	Non liquefacibile

- nel caso di percentuale di fine inferiore al 67% sono state eseguite le verifiche con i criteri in seguito esposti.

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 101 di 110

Per rimanere dal lato della sicurezza, si è stimato il potenziale rischio di liquefazione in base a tutti i risultati delle indagini sismiche Down-Hole disponibili, nonostante si siano riscontrati valori della velocità delle onde di taglio Vs anche superiori a 215 m/s (ed i corrispondenti valori della velocità delle onde di taglio normalizzata Vs1 sono superiori a 200 m/s).

A tal fine, le analisi sono state condotte valutando le prove SPT, le prove CPTU e le indagini sismiche Down-Hole riguardanti le unità litologiche interessate.

8.1 INDICE POTENZIALE LIQUEFAZIONE

L'indice del potenziale di liquefazione, da valutare all'interno della verticale indagata, è definito dalla seguente espressione:

$$IPL = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

in cui F(z) è una funzione che per FSL (Fattore Sicurezza Liquefazione) > 1 assume il valore zero e per FSL ≤ 1 ne è il complemento ad 1, e w(z) vale:

$$w(z) = 10^{-10 \cdot (z/z_{crit})}$$

La profondità zcrit è quella oltre la quale sono da escludersi fenomeni di liquefazione, che si può assumere pari a 20.0 m.

Nella tabella seguente sono indicate le classi di severità del rischio in funzione del valore dell'indice del potenziale di liquefazione calcolato per zcrit = 20.0 m.

Tabella 8-1 – Indice di liquefazione e livello associato di rischio (Sommez 2003)

IPL ≈ 0	NULLO
0 < IPL ≤ 2	BASSO
2 < IPL ≤ 5	MODERATO
5 < IPL ≤ 15	ALTO
IPL > 15	MOLTO ALTO

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 102 di 110

8.2 RISULTATI

Nel seguito sono riportate le analisi di liquefazione eseguite per le opere d'arte superficiali in cui sono stati intercettati terreni appartenenti alle unità geotecniche **Sabbie [S]** e **Sabbie Limose [SL]** sotto falda.

Ai fini dell'analisi a liquefazione, nell'elaborazione delle prove si è considerato:

- il livello di falda indicato nel profilo geotecnico longitudinale con un ulteriore franco di 0.5 m;
- il contenuto di fine (FC) misurato da analisi granulometrica di laboratorio nei campioni analizzati disponibili.

Per tutte le opere analizzate bisogna fare le seguenti precisazioni:

Per l'interpretazione mediante l'analisi dei valori di SPT si è associato uno spessore caratteristico al valore di SPT a disposizione, in modo da calcolare l'Indice Potenziale Liquefazione tenendo conto dello spessore degli strati sabbiosi o sabbioso/limosi in cui la prova veniva effettuata.

Per quanto riguarda le prove CTPU esse non sempre raggiungono la profondità critica oltre la quale il fenomeno della liquefazione può considerarsi nullo (ovvero $z > 20$ m), i risultati quindi sono parziali e non esaustivi. Verranno riportati i risultati relativi alla profondità investigata.

Per quanto riguarda l'interpretazione delle prove DH, pur raggiungendo sempre i 20 m, il problema è legato alla velocità delle onde di taglio. In terreni poco consistenti si avranno onde di taglio basse, anche in terreni con elevato contenuto di fine e quindi poco suscettibili al fenomeno della liquefazione. Questo può portare ad avere FS bassi anche in strati limosi o argillosi e di conseguenza IPL elevati.

8.2.1 Risultati prove lungo il tracciato

Di seguito vengono analizzati i risultati per le prove CPTU, SPT e DH dei sondaggi effettuati lungo la linea.

8.2.1.1 Risultati prove CPTU

Di seguito vengono riportati i risultati relativi a tutte le prove CPTU disponibili lungo il tracciato.

Per tutte le prove si è utilizzato un valore massimo di accelerazione pari a 0.212, ovvero il valore massimo possibile considerando lo Stato Limite Ultimo SLV lungo tutto la tratta.

Nella tabella seguente viene indicato il valore di IPL ottenuto per ogni prova e la classe corrispondente. Come si può notare tutte le prove ricadono nella categoria 0-5 “rischio di liquefazione compreso tra nullo e moderato”.

	Falda	IPL	
CPTU_1	8	1,8	BASSO
CPTU_2	6	4,1	MODERATO
CPTU_3	6	3,2	MODERATO
CPTU_4	6	0,5	BASSO
CPTU_5	10	0,3	NULLO
CPTU_6	6	0,2	NULLO
CPTU_7	8	0,0	NULLO
CPTU_8	8	4,4	MODERATO
CPTU_9	7	4,2	MODERATO
CPTU_10	7	0,7	BASSO
CPTU_11	7	0,1	NULLO
CPTU_12	5	0,6	BASSO
CPTU_14	9	1,0	BASSO
CPTU_15	7	2,6	MODERATO
CPTU_16	8	0,6	BASSO

Tabella 8-2 – Riepilogo risultati prove CPTU

	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 104 di 110

8.2.1.2 Risultati prove DH

Di seguito vengono riportati i risultati relativi a tutte le prove DH disponibili lungo il tracciato.

Tabella 8-3 – Riepilogo risultati prove DH

	Falda	IPL	
BH6_DH	6	6,4	ALTO
BH8_DH	7	0,0	NULLO
BH12_DH	6	0,0	NULLO
BH13_DH	9	0,0	NULLO
BH16_DH	5	0,0	NULLO
BH19_DH	6	2,0	BASSO
BH22_DH	7	12,9	ALTO*
BH23_DH	6	0,0	NULLO
BH24_DH	5	0,0	NULLO

*Valore cautelativo, stimato considerando la presenza di sabbie e limi sabbiosi fino alla profondità di 16 m.

8.2.1.3 Risultati prove SPT

Di seguito vengono riportati i risultati relativi a tutte le prove SPT disponibili lungo il tracciato.

Tabella 8-4 – Riepilogo risultati prove SPT

Sond	IPL	
BH1	no oriz sabb	
S1_SerieS	0.5	BASSO
BH2	0	NULLO
BH3	1.4	BASSO
BH4	3	MODERATO
BH5	5.8	ALTO
BH6	no SPT	
S2_SerieS	NO SPT IN SABBIA	
BH7	0	NULLO
BH8	0.9	BASSO
BH9	0	NULLO
BH10	0	NULLO
S3_SerieS	No Sabbia	
BH11	1.7	BASSO
BH12	no SPT	
BH13	0	NULLO
S4_SerieS	NO SPT IN SABBIA	
BH14	0	NULLO
S5_SerieS	No SPT	
BH15	2.8	MODERATO
BH16	2.9	MODERATO
BH17	NO SPT IN SABBIA	
BH18	NO SPT IN SABBIA	
BH19	2.6	MODERATO
BH20	0	NULLO
BH21	0	NULLO
BH22	NO SPT	
S6_SerieS	4.1	MODERATO
BH23	0.8	BASSO
BH24	NO SPT IN SABBIA	
BH25	NO SPT IN SABBIA	

Linea Storica
 Relazione geotecnica generale

 COMMESSA
 NN1X

 LOTTO
 01 D 78

 CODIFICA
 RG

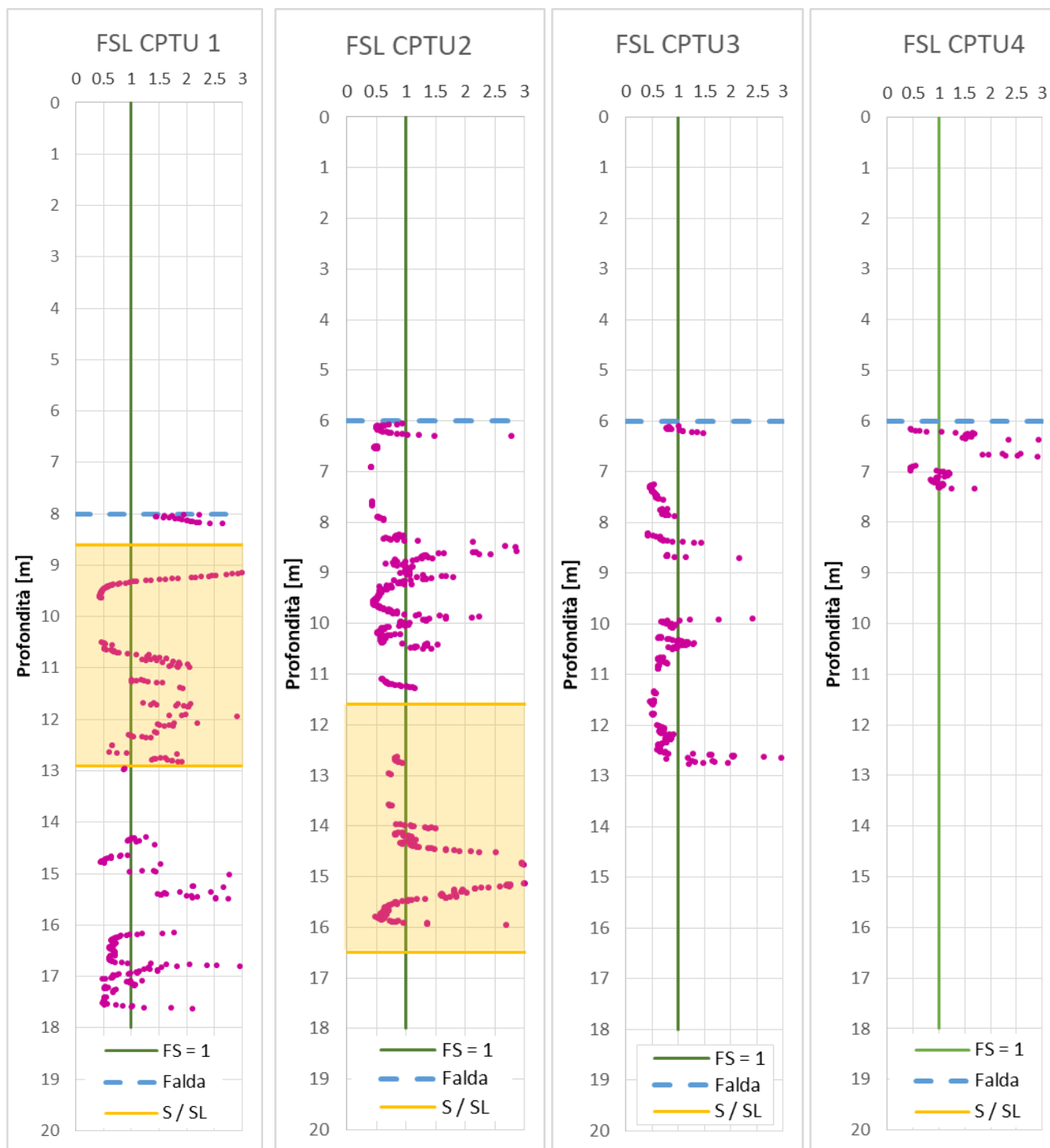
 DOCUMENTO
 BA0000 012

 REV.
 B

 FOGLIO
 106 di 110

8.2.1.4 Grafici prove CPTU

Di seguito vengono indicati i grafici corrispondenti all'andamento del FSL nelle prove CPTU disponibili.



Linea Storica
Relazione geotecnica generale

COMMESSA
NN1X

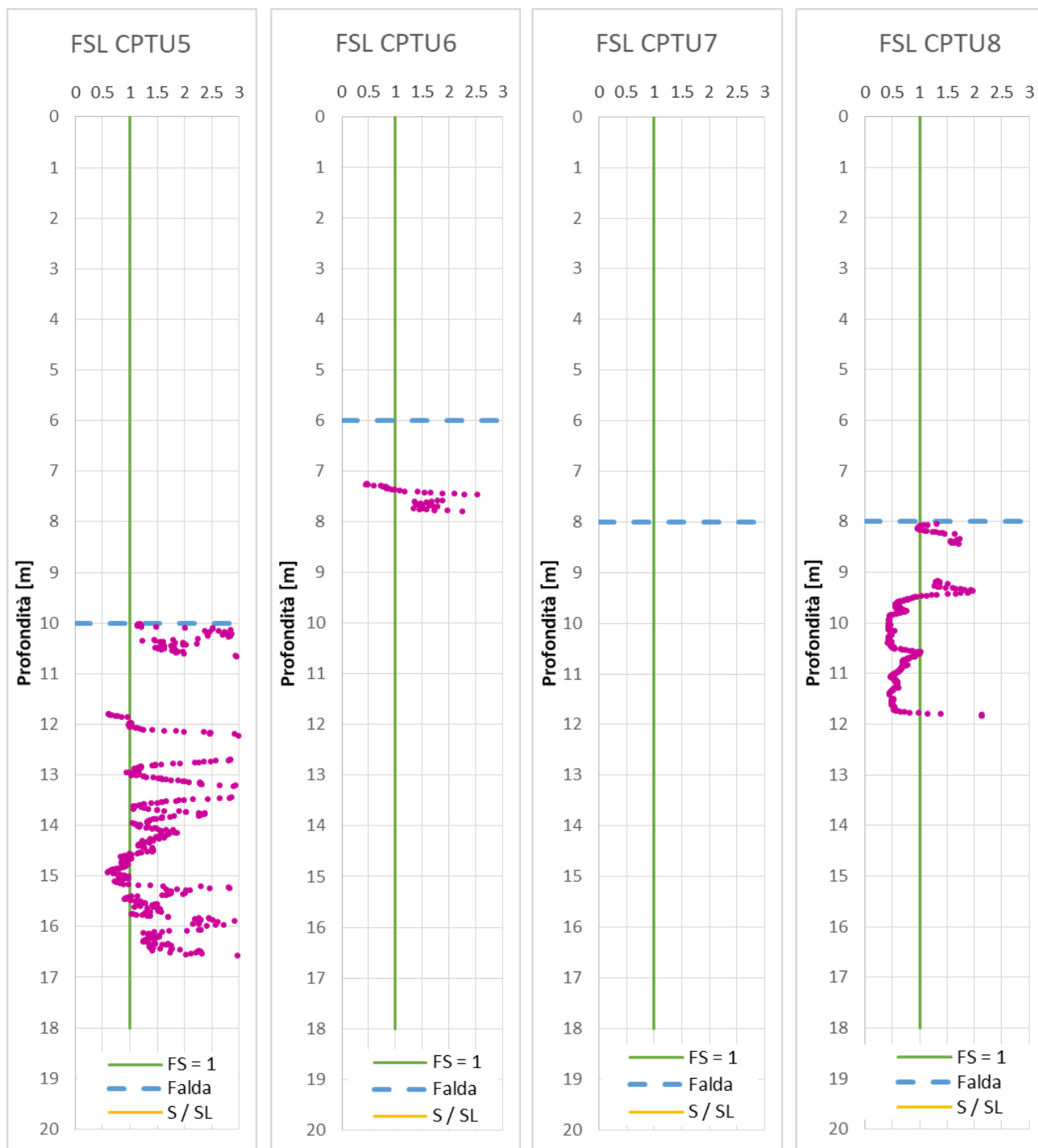
LOTTO
01 D 78

CODIFICA
RG

DOCUMENTO
BA0000 012

REV.
B

FOGLIO
107 di 110



Linea Storica
Relazione geotecnica generale

COMMESSA
NN1X

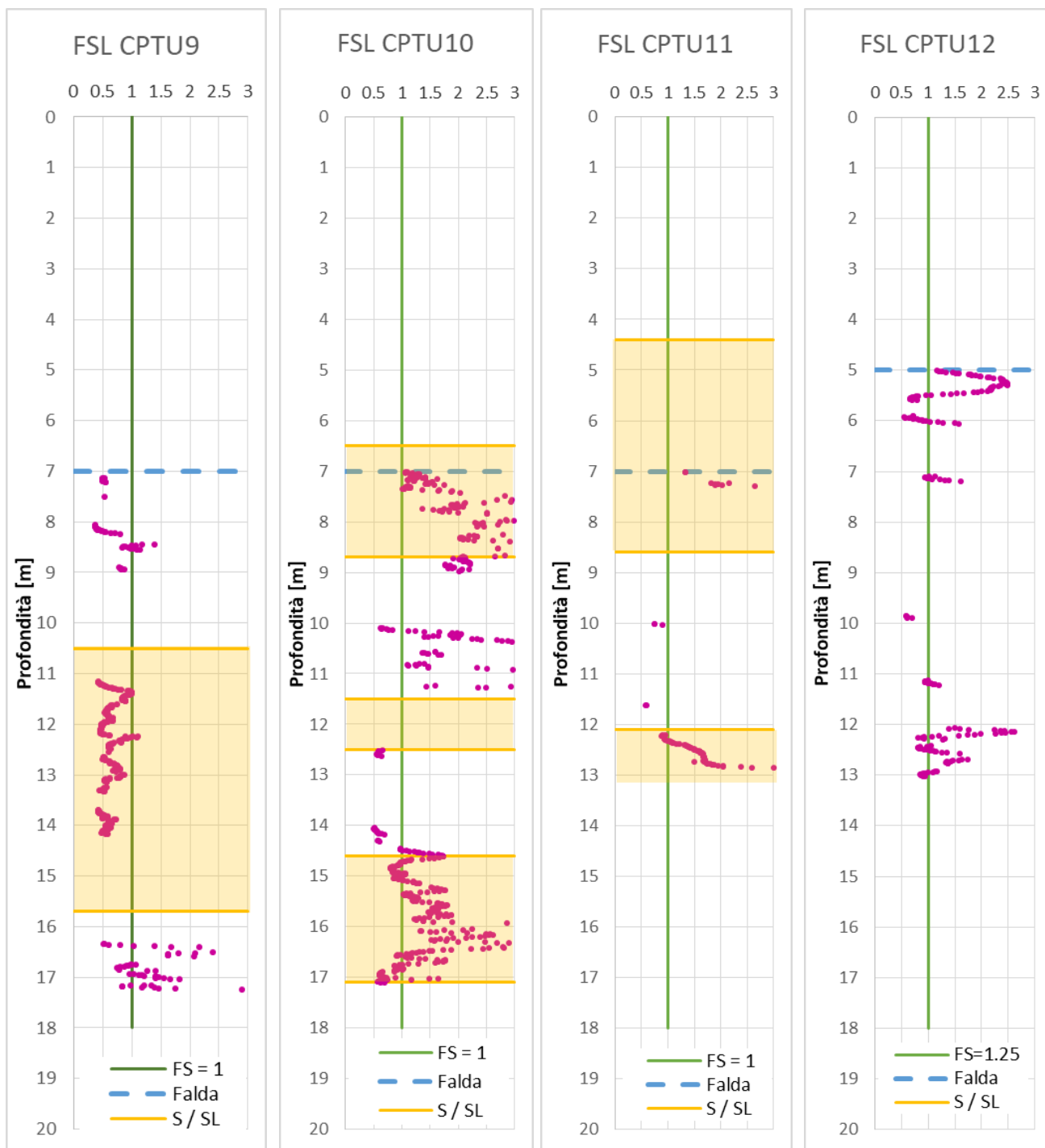
LOTTO
01 D 78

CODIFICA
RG

DOCUMENTO
BA0000 012

REV.
B

FOGLIO
108 di 110



Linea Storica
Relazione geotecnica generale

COMMESSA
NN1X

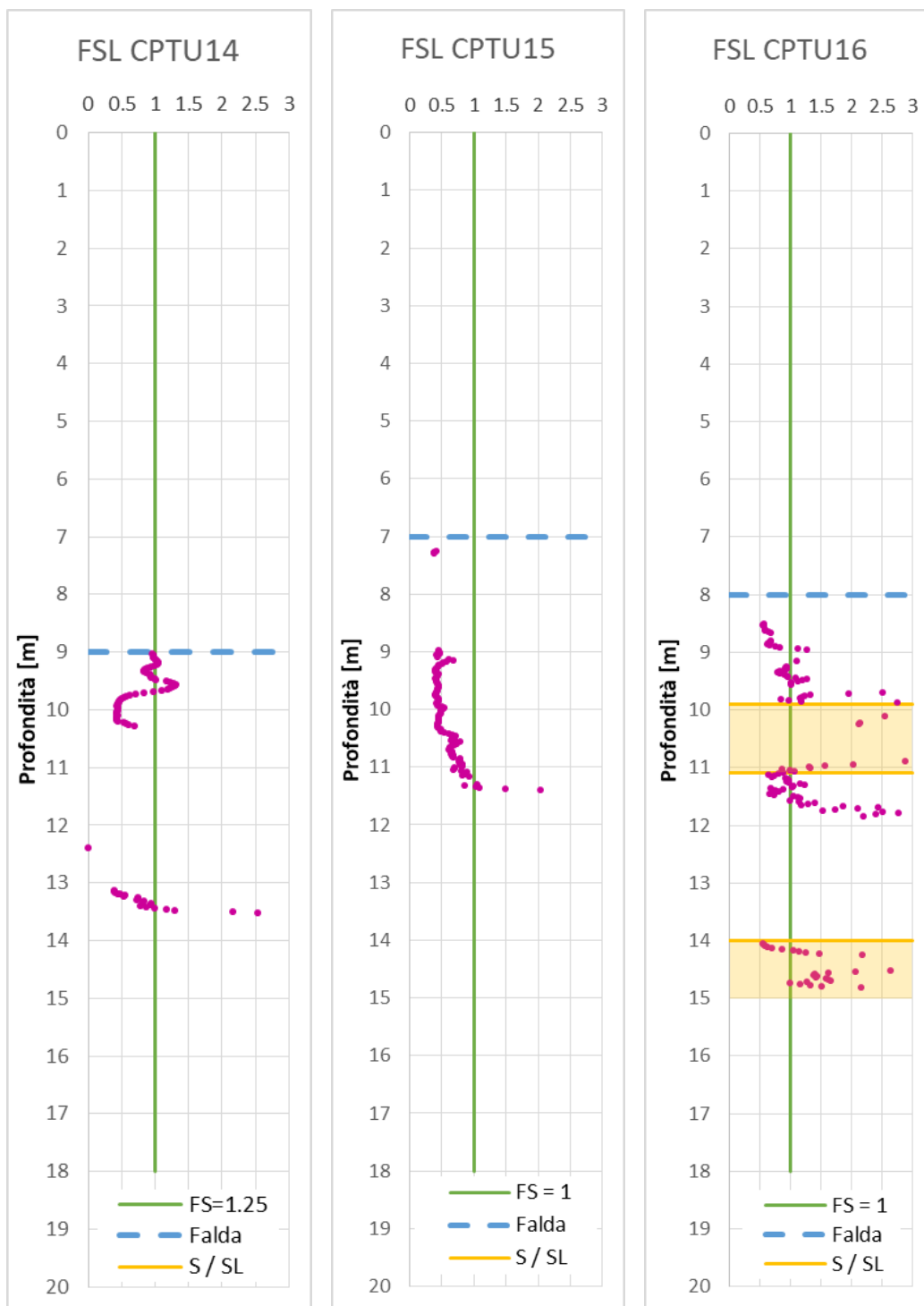
LOTTO
01 D 78

CODIFICA
RG

DOCUMENTO
BA0000 012

REV.
B

FOGLIO
109 di 110



	LINEA SALERNO - PONTECAGNANO AEROPORTO COMPLETAMENTO METROPOLITANA DI SALERNO TRATTA ARECHI - PONTECAGNANO AEROPORTO PROGETTO DEFINITIVO					
Linea Storica Relazione geotecnica generale	COMMESSA NN1X	LOTTO 01 D 78	CODIFICA RG	DOCUMENTO BA0000 012	REV. B	FOGLIO 110 di 110

8.3 CONCLUSIONI

La verifica della suscettibilità alla liquefazione è stata condotta in base ai risultati delle prove in situ, ovvero le prove SPT, CPTU e DH.

In particolare, le prove CPTU, equamente distribuite lungo il tracciato ed eseguite fino a profondità media di circa 13 m dal piano campagna (da 8 m a 20 m) sono state ritenute rappresentative per le opere minori lungo linea.

Per queste ultime (opere minori come muri di recinzione e sostegno) che presentano fondazioni superficiali o, se su pali, sopra falda, non si prevede che l'evento della liquefazione possa generare un rischio di stabilità significativo.

Al contrario le prove SPT e DH hanno indagato gli stati più profondi e sono sempre presenti in corrispondenza delle opere d'arte maggiori (appartenenti al Lotto 00), quindi assumono un maggior peso per questi manufatti.

Vale la pena ricordare comunque che le indagini sono collocate a distanze variabili dall'asse del tracciato anche non trascurabili e che pertanto alcune differenze si potranno riscontrare all'atto della costruzione che dovrà quindi prevedere ulteriori verifiche puntuali.

In base a quanto illustrato, di seguito vengono elencate le conclusioni con le indicazioni progettuali più importanti:

- gli strati più marcatamente sabbiosi, posti sotto falda, dove la somma delle precentuali di limo e argilla non superano il 67%, potrebbero presentare una suscettibilità alla liquefazione medio/ alta quando soggetti alle azioni sismiche di progetto.
- Per le opere minori lungo linea quali i rilevati e i muri di protezione, data la loro ridotta altezza e quindi la loro azione su uno spessore ridotto del terreno di fondazione, quasi sempre sopra falda, non si prevede la necessità di accorgimenti particolari in sede di progetto; l'eventuale cedimento indotto dalla liquefazione, qualora si propaghi fino a livello del piano rotaie, potrà essere – nel caso - gestito attraverso operazioni di manutenzione.