

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



LINEA CATANIA - SIRACUSA

DIREZIONE TECNICA

U.O. OPERE GEOTECNICHE

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Collegamento ferroviario con il Porto di Augusta
Fase 1

GEOTECNICA

Relazione Geotecnica Generale

SCALA:

-

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

RS62 00 R 11 RG GE0006 001 B

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato |
|------|-------------------------------|-----------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|------------------------------|
| A | Emissione esecutiva | PINI | Novembre 2022 | L.Cosciotti | Novembre 2022 | P.Carlesimo | Novembre 2022 | L. Berardi Settembre 2023 |
| B | Recepimento prescrizioni AdSP | G.Filippi | Settembre 2023 | G.Filippi | Settembre 2023 | P.Carlesimo | Settembre 2023 | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

File: RS6200R11RGGE0006001B.doc

n. Elab.:

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA | 4 |
| 2 | INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO | 4 |
| 3 | NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 6 |
| 3.1 | NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO | 6 |
| 3.2 | BIBLIOGRAFIA..... | 6 |
| 3.3 | DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO..... | 7 |
| 4 | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 8 |
| 4.1 | ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE REGIONALE..... | 8 |
| 4.2 | ASSETTO GEOLOGICO LOCALE | 9 |
| 4.2.1 | <i>Supersistema degli Iblei Settentrionali – Sistema di Lentini</i> | 9 |
| 4.2.2 | <i>Depositi continentali quaternari</i> | 9 |
| 4.2.3 | <i>Depositi marini e transazionali quaternari</i> | 11 |
| 4.3 | ASSETTO STRUTTURALE | 12 |
| 5 | INQUADRAMENTO SISMICO | 13 |
| 5.1 | AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE | 13 |
| 5.2 | VITA NOMINALE E PERIODO DI RIFERIMENTO..... | 13 |
| 5.3 | STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODI DI RITORNO | 15 |
| 5.4 | RISPOSTA SISMICA LOCALE | 16 |
| 6 | INDAGINI UTILIZZATE PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA | 18 |
| 6.1 | CAMPAGNA DI INDAGINE ITALFERR 2022..... | 18 |
| 7 | INDICAZIONI SULLA FALDA | 19 |
| 8 | UNITÀ GEOTECNICHE | 19 |
| 9 | CRITERI E CORRELAZIONI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA | 21 |
| 9.1 | RESISTENZA A TAGLIO DEI TERRENI A GRANA GROSSA | 21 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 9.2 | RESISTENZA A TAGLIO DEI TERRENI A GRANA FINE | 21 |
| 9.2.1 | <i>Resistenza in condizioni drenate</i> | 22 |
| 9.2.2 | <i>Resistenza in condizioni non drenate</i> | 22 |
| 9.2.3 | <i>Parametri di rigidezza</i> | 23 |
| 9.2.4 | <i>Compressibilità delle unità coesive</i> | 27 |
| 9.3 | PERMEABILITÀ..... | 28 |
| 10 | DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI | 28 |
| 10.1 | UNITÀ R DELLE COLTRI ELUVIO COLLUVIALI E DEPOSITI MARINI ED ANTROPICI..... | 28 |
| 10.2 | ARGILLE LIMOSE DEL SINTEMA DI LENTINI - UG1 | 33 |
| 10.3 | PERMEABILITÀ..... | 41 |
| 11 | SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI..... | 43 |
| 12 | ASPETTI GEOTECNICI E SCELTE PROGETTUALI..... | 44 |
| 13 | OPERE GEOTECNICHE PRINCIPALI | 48 |
| 14 | MONITORAGGIO GEOTECNICO..... | 49 |
| 14.1 | MONITORAGGIO DELLE OPERE DI SOSTEGNO IN COSTRUZIONE E DEL TERRENO A TERGO DELL'AREA DI SCAVO...49 | 49 |
| 14.2 | MISURA DELLE DEFORMAZIONI DEI BINARI | 50 |
| 14.3 | MONITORAGGIO DEI VERSANTI INTERESSATI DA FENOMENI DI DISSESTO..... | 52 |
| 14.4 | MONITORAGGIO DEI RILEVATI | 54 |
| 14.5 | CEDIMENTI DEL PIANO CAMPAGNA E DELLA SOMMITÀ DEL RILEVATO | 56 |
| 14.6 | CEDIMENTI VERTICALI NEL TERRENO DI FONDAZIONE | 57 |
| 14.7 | PRESSIONI INTERSTIZIALI | 58 |

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

1 **PREMESSA**

Nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica del *Collegamento ferroviario con il porto di Augusta* (SR), sono stati effettuati gli approfondimenti geotecnici propedeutici al dimensionamento delle opere d'arte previste dal progetto.

In particolare, il lavoro svolto si basa sulla caratterizzazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica di riferimento e si articola nelle seguenti fasi operative:

- analisi critica dei dati disponibili dalla recente campagna indagini (ITLAFERR 2022);
- individuazione delle unità geotecniche corrispondenti ad una o più formazioni geologiche individuate lungo il tracciato dell'infrastruttura in progetto;
- interpretazione dei risultati delle prove geotecniche in situ e di laboratorio e definizione dei valori dei parametri di resistenza e deformabilità con i relativi andamenti con la profondità;
- definizione dei parametri caratteristici associati a ciascuna unità geotecnica;
- elaborazione e restituzione grafica dei profili geotecnici di riferimento e le sezioni trasversali significative.

2 **INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO**

L'area di studio si colloca a ridosso della costa sud-orientale ionica della Sicilia in corrispondenza del nuovo binario I del porto di Augusta che si sviluppa per una lunghezza di circa 1.4 km nella tratta Catania-Siracusa. Il tracciato di progetto interessa il territorio del comune di Augusta, in provincia di Siracusa (SR).

Con riferimento alla Carta Topografica d'Italia edita dall'Istituto Geografico Militare Italiano (I.G.M.I.), l'area oggetto di studi è individuabile all'interno del Foglio 274 (Siracusa) in scala 1:100000, nelle Tavole 274-IV-SE (Melilli) e 274-I-SO (Augusta) in scala 1:25000 e, con riferimento alla Carta Tecnica Regionale della Regione Sicilia, nella sezione 641150 in scala 1:10000.

Dal punto di vista orografico il binario I porto impegna settori di territorio posti a quote comprese tra 5 m s.l.m. e 14 m s.l.m. circa, il binario di presa e consegna tra 3 m s.l.m. e 22 m s.l.m. e il binario banchina tra 0 m s.l.m. e 13 m s.l.m. Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si caratterizza per la presenza

di ampi settori pianeggianti o sub-pianeggianti riconducibili alla fascia costiera ionica caratterizzata da pianure costiere.



Figura 1 – Corografia in scala 1:50000 dell’area di studio geologico con individuazione delle opere in progetto (binario I porto in blu, binario banchina in magenta e binario di presa e consegna in verde).

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

3 **NORMATIVA, BIBLIOGRAFIA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

3.1 **NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO**

- [1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30;
- [2] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”;
- [3] RFI DTC SI MA IFS 001 del 2022 - “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”;
- [4] AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche.

3.2 **BIBLIOGRAFIA**

- [5] Lambe T.W.& R. V. Whitman (1969). Soil Mechanics.
- [6] Koutsoftas D.C. and Ladd C.C. (1985) Design strength of an offshore clay. JGED, ASCE, 3,337–355.
- [7] Look Burt (2007) Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables.
- [8] Stroud M.A. (1974) “The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks” Proceedings ESOPT I.
- [9] Stroud M.A. (1988) “The Standard Penetration Test – Its application and interpretation” Penetration Testing in UK, Proceedings of the Geotechnical Conference organized by ICE, Birmingham.
- [10] Vucetic M., Dobry R. (1991) “Effect of soil plasticity on cyclic response” Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, n° 1, pp. 89-107.
- [11] Jean-Louis Briaud. The pressuremeter.
- [12] Marchetti, D., Marchetti, S., Monaco, P. e Totani, G. (2008) "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" - Protezione Civile - Gruppo di lavoro (2008) - *Università di L'Aquila* -

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Dipartimento Ingegneria Strutture Acque e Terreno. Cap. 3.4.4.2.9 Prova DMT pp. 391-397; Cap. 3.4.4.2.10 Prova SDMT. pp. 397-405.

- [13] Franch, J. (2014). Correlaciones Geotécnicas (5) y ensayos "in situ": el SPT y el módulo de deformación.
- [14] Duncan, Buchignani (1976). An Engineering Manual for Settlement Studies.
- [15] Kulhawy F.H. and Mayne P.W. (1990) Manual on estimating soil properties for foundation design. Electric Power Research Institute, EL-6800, Research Project 1493–6.
- [16] M. Devincenzi & N. Frank (2004). "In situ geotechnical tests: execution and interpretation", IGEO TEST.
- [17] Lancellotta, R (2009). Geotechnical Engineering – Second Edition. Taylor & Francis.

3.3 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- [18] Indagini Geognostiche: Sondaggi e prove in foro: (Doc. RS6200R69SGGE0001001B)
- [19] Indagini Geognostiche: Prove di Laboratorio: (Doc. RS6200R69PRGGE0001001B)
- [20] Indagini Geognostiche: Indagini Geofisiche: (Doc. RS6200R69IGGE0001001A)
- [21] Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica (Doc. RS6200R69RGGE0001001B)
- [22] Carta idrogeologica e profilo idrogeologico: (Doc. RS6200R69L5GE0002001B)
- [23] Carta geologico con elementi di geomorfologia e profilo geologico: (Doc. RS6200R69L5GE0001001B)
- [24] Tipologico interventi di stabilizzazione dei movimenti franosi (Doc. RS6201R11WZGE0006001B)

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

4.2 ASSETTO GEOLOGICO LOCALE

Le analisi effettuate ed i rilievi di campo condotti hanno permesso di distinguere e cartografare differenti unità geologiche, relative sia a sequenze sedimentarie di substrato che a successioni clastiche di copertura. In particolare, le perimetrazioni e le descrizioni geologico-strutturali delle unità individuate nell'area derivano da un'integrazione tra le informazioni riportate in letteratura ed i dati raccolti attraverso il rilevamento geologico di superficie e le numerose indagini geognostiche a disposizione.

Nei settori di stretto interesse progettuale sono state individuate e perimetrare numerose unità geologiche, di seguito descritte dal basso verso l'alto stratigrafico. Si sottolinea che, seguendo i criteri definiti dal Servizio Geologico (Pasquaré et al. 1992), le successioni sono state suddivise utilizzando unità stratigrafiche convenzionali, talora ulteriormente suddivise in membri e litofacies caratterizzate da peculiari caratteristiche litologiche, sedimentologiche e stratigrafiche.

4.2.1 *Supersintema degli Iblei Settentrionali – Sintema di Lentini*

Il substrato geologico dell'intera area di studio è suddivisibile in due unità, il Sintema Lentini e il Sintema Augusta. Si tratta di successioni marine di piattaforma continentale e spiaggia, ampiamente affioranti in tutto il settore di intervento.

La successione in esame è formata da argille limose e argille limoso-marnose di colore grigio e grigio-azzurro, giallastre per alterazione (LEI2), massive o debolmente stratificate, con diffusi residui carboniosi, locali resti fossili e sottili livelli di sabbie e sabbie limose di colore giallastro; alla base dell'unità sono presenti lenti, spesse fino a 2 m, di sabbie e calcareniti ricche di molluschi, tra cui *Arctica islandica*; in superficie è localmente presente un paleosuolo bruno con rari resti di vertebrati.

4.2.2 *Depositi continentali quaternari*

4.2.2.1 *Depositi alluvionali recenti*

I presenti litotipi si rinvengono, in lembi di limitata estensione, in corrispondenza di due piccoli corsi d'acqua presenti nella porzione meridionale dell'area di studio, immediatamente a nord del Porto di Augusta. Si tratta di depositi continentali di canale fluviale, argine e piana inondabile, costituiti da una singola litofacies a composizione sabbioso-limosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sui

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

depositi del Sintema Lentini e mostrano uno spessore massimo di circa 4 m. Dal punto di vista cronologico, l'unità è riferibile al periodo Olocene – Attuale.

L'unità è composta prevalentemente da sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi di colore grigio, marrone e giallastro (bb2), a struttura indistinta o debolmente laminata, con locali ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate; si rinvengono intercalazioni di argille limose grigie con abbondante materiale organico e lenti di ghiaie poligeniche in scarsa matrice sabbioso-limosa grigiastra.

4.2.2.2 *Depositi alluvionali attuali*

I depositi in esame affiorano unicamente in corrispondenza degli alvei attuali di piccoli corsi d'acqua presenti nella porzione meridionale della zona di intervento, in prossimità del Porto di Augusta. Si tratta di depositi continentali di canale fluviale e argine, costituiti da una singola litofacies a composizione ghiaioso-sabbiosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulle unità più antiche e presentano uno spessore massimo di circa 1 m. Sotto il profilo cronostatigrafico, l'unità è riferibile al periodo Olocene – Attuale.

Dal punto di vista litologico, l'unità è composta da ghiaie poligeniche ed eterometriche (ba1), da sub-angolose ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e giallastro, da scarsa ad abbondante; si rinvengono frequenti passaggi di sabbie e sabbie limose di colore grigio e marrone, a struttura indistinta, con locali ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate.

4.2.2.3 *Coltri eluvio-colluviali*

Tali terreni si rinvengono diffusamente come copertura delle unità geologiche di substrato, sia alla base dei rilievi presenti in prossimità della costa che all'interno delle principali depressioni impluviali. Si tratta di depositi continentali di versante, dilavamento e di alterazione del substrato, costituiti da una singola litofacies a composizione limoso-argilloso. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulle unità più antiche e sono caratterizzati da uno spessore massimo di circa 4 m. Anche questa unità è riferibile al periodo Olocene – Attuale.

L'unità è formata essenzialmente da limi argillosi e argille limoso-sabbiose di colore marrone, grigio e brunastro (b2), a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-arrotondate; a luoghi si rinvengono passaggi di limi sabbiosi e sabbie limose di colore marrone e

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

giallastro, a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-arrotondate.

4.2.2.4 *Riporti antropici*

I presenti depositi si rinvencono diffusamente in corrispondenza delle principali strutture e infrastrutture antropiche, oltre che in tutta la zona del Porto di Augusta. Si tratta di depositi continentali di genesi antropica, costituiti da una singola litofacies a composizione ghiaioso-sabbiosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sulle unità più antiche e presentano uno spessore massimo di circa 9 m. L'unità è interamente riferibile al periodo Attuale.

In generale, i riporti sono composti da ghiaie poligeniche ed eterometriche (h), da angolose a sub-angolose, con locali frammenti di laterizi, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio, marrone e avana, da scarsa ad abbondante; a luoghi si rinvencono passaggi di sabbie e sabbie limose grigie, marroni e giallastre, a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e abbondanti ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate.

4.2.3 *Depositi marini e transazionali quaternari*

4.2.3.1 *Depositi di spiaggia attuali*

Tali depositi si rinvencono nel settore sud-orientale dell'area di studio, in prossimità del litorale ionico. Si tratta di depositi marini di spiaggia e cordone litoraneo, costituiti da una singola litofacies a composizione sabbioso-limosa. Poggiano in contatto stratigrafico discordante sui depositi del Sistema Lentini e sono caratterizzati da uno spessore massimo di circa 8 m. Dal punto di vista cronostatigrafico, i terreni in esame sono riferibili all'Olocene – Attuale.

L'unità è formata da sabbie medie e grossolane ben classate di colore giallo-biancastro (g2), in strati da molto sottili a medi, generalmente amalgamati, con locali intercalazioni di limi e sabbie fini; si rinvencono diffusi e discontinui lag conchigliari con abbondanti resti di *Tellina* sp., *Cardidae* e rari gasteropodi; talora sono presenti lenti e/o livelli di sabbie ghiaiose di colore biancastro.

4.3 ASSETTO STRUTTURALE

L'area di studio presenta quindi un assetto strutturale estremamente semplice e regolare, in quanto connesso a successioni marine e continentali piuttosto recenti. I termini pelitici del substrato, riferibili al Subsistema di Scordia (LEI2) mostrano un assetto prevalentemente sub-orizzontale o debolmente inclinato verso la costa. Solo nei settori esterni del Bacino di Augusta è possibile osservare un assetto blandamente immergente verso il depocentro, con angoli che comunque non superano quasi mai i 5-10° circa.

I depositi terrazzati del Sintema di Augusta (AUG) poggiano con una superficie fortemente erosiva sui depositi pelitici più antichi e presentano un assetto generalmente immergente verso la costa. Solo localmente è possibile osservare una debole inclinazione verso la zona centrale del Bacino di Augusta, con angoli generalmente inferiori a quelli del Subsistema di Scordia (LEI2).

In tutta l'area di interesse progettuale non sono stati osservati elementi tettonici quali faglie, thrust e pieghe. L'assenza di questi elementi è connessa sia alla presenza di diffuse coperture oloceniche, che tendono a mascherare le strutture più antiche, che all'età relativamente recente dei termini di substrato e alla natura prevalentemente pelitica degli stessi.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

5 INQUADRAMENTO SISMICO

Richiamando quanto già riportato nella Relazione Geologica, Geomorfologica, Idrogeologica e Sismica [21], nel presente paragrafo vengono riassunti gli aspetti principali relativi alla sismicità dell'area oggetto di studio.

L'azione sismica è definita in accordo con la normativa tecnica vigente (NTC 2018 [1]), a partire dalla *pericolosità sismica di base* del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sottosuolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica include le ordinate dello spettro di risposta elastico di accelerazione $S_e(T)$ corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza (P_{VR}) nel periodo di riferimento (V_R) per la vita utile della struttura. La funzione spettrale $S_e(T)$, al substrato rigido di riferimento, è definita dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima per sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nei paragrafi seguenti verrà definita la vita di riferimento dell'opera (V_R), in base alla classificazione delle parti d'opere in progetto. Successivamente, verranno indicati gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, arrivando a definire i periodi di ritorno (T_R) corrispondenti dell'azione sismica da considerare, determinata a sua volta per condizioni di suolo rigido ed a livello del piano campagna in corrispondenza di alcuni punti di interesse.

5.1 AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE

5.2 VITA NOMINALE E PERIODO DI RIFERIMENTO

La Vita Nominale V_N di un'opera è il periodo temporale entro cui l'opera stessa può essere usata per lo scopo al quale è destinata purché soggetta alla manutenzione ordinaria. La norma (NTC 2018) indica dei valori di riferimento per macrocategorie di opere:

- $V_N \leq 10$ anni, per opere provvisorie e opere provvisionali;

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

- $V_N \geq 50$ anni, per opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale;
- $V_N \geq 100$ anni, per grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di importanza strategica.

Nel caso in esame è stata assunta:

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

La norma indica, inoltre, 4 classi d'uso distinte in base all'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico associando ad ogni classe un coefficiente d'uso (C_U), moltiplicativo di V_N :

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. Per le quali si ha un coefficiente d'uso $C_U=0.7$.
- Classe II: ... *omissis* ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza ... *omissis* Per le quali $C_U = 1.0$.
- Classe III: ... *omissis* ... Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso IV, e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 1.5$.
- Classe IV: ... *omissis* ... Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico ... *omissis* ... Per le quali $C_U = 2$.

Nel caso in esame si assume:

$$\text{Classe d'uso II } (C_U = 1)$$

Pertanto, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento pari a:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 75 \cdot 1 = 75 \text{ anni}$$

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

5.3 STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODI DI RITORNO

L'azione sismica di progetto deve essere determinata in funzione della probabilità di superamento P_{VR} dipendente dagli Stati Limite di verifica e correlata a periodo di ritorno (T_R) e periodo di riferimento (V_R) attraverso la seguente formulazione

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

Gli Stati Limite di riferimento per verifiche in presenza di sisma, così come definiti nelle NTC2018 al par. 3.2.1 sono:

Stato Limite Ultimo (SLU)

- Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, SLV, definito come lo stato limite in corrispondenza del quale la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontale. Ad esso è associata una probabilità di superamento $P_{VR}=10\%$;
- Stato Limite di Prevenzione del Collasso, SLC, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali. Ad SLC è associata una $P_{VR}=5\%$.

Stato limite di Esercizio (SLE)

- Stato Limite di immediata Operatività SLO per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico ($P_{VR}=81\%$);
- Stato Limite di Danno SLD definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo ($P_{VR}=63\%$).

Considerando il periodo di riferimento assunto ($V_R=75$ anni), ai quattro stati limite sopra descritti corrispondono i tempi di ritorno T_R riportati in Tabella:

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Tabella 1: Periodi di ritorno per l'azione sismica, per i diversi stati limite ($V_R = 75$ anni).

| STATO LIMITE | T_R [anni] |
|--------------|--------------|
| SLO | 45 |
| SLD | 75 |
| SLV | 712 |
| SLC | 1462 |

5.4 RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale, eseguita per tenere conto degli effetti di amplificazione stratigrafica e topografica, è stata sviluppata mediante l'approccio semplificato proposto dalle NTC 2018, le quali definiscono un fattore di amplificazione sismica (S) come prodotto di un fattore di amplificazione stratigrafica (S_S) e uno di amplificazione topografica (S_T):

$$S = S_S \cdot S_T$$

Il fattore di amplificazione stratigrafica viene calcolato in funzione di a_g ed F_0 in dipendenza dalla categoria sismica di sottosuolo. La categoria sismica viene assegnata in base alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (in m/s) definita come:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

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 $V_s > 800$ m/s.

Per il sito in esame, si dispone dei risultati di 3 prove sismiche di superficie tipo MASW e 2 in foro tipo Down-Hole che forniscono valori di $V_{S,eq}$ riportati nella tabella seguente.

Tabella 2: Risultati prove sismiche e categoria di sottosuolo

| Prova | $V_{s,eq}$ [m/s] | Categoria sismica di suolo |
|---------|------------------|----------------------------|
| MASW 1 | 196 | C |
| MASW 2 | 193 | C |
| MASW 3 | 219 | C |
| BH13-DH | 178 | C |
| BH14-DH | 229 | C |

L'area di progetto non presenta rilievi con pendenza maggiore di 15° ed è classificabile come di categoria T1 ($S_T = 1$) [21].

I valori del fattore di amplificazione S e dell'accelerazione massima in superficie $a_{max} = S \cdot a_g$ associati allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) sono riportati in tabella:

Tabella 3 Valori di a_g , F_0 , T_c^* per ogni Stato Limite considerato

| Stato limite | P_{VR} | T_R (anni) | a_g (g) | F_0 (-) | T_c^* (s) |
|--------------|----------|--------------|-----------|-----------|-------------|
| SLV | 10% | 712 | 0.284 | 2.31 | 0.45 |

Tabella 4 Valori dei coefficienti di sito S e dell'accelerazione di massima in superficie

| CATEGORIA SISMICA DI SOTTOSUOLO | S | C_c | a_{max} (g) |
|---------------------------------|-------|-------|---------------|
| C | 1,306 | 1,370 | 0,371 |

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

6 INDAGINI UTILIZZATE PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica del sottosuolo dell'area interessata dall'infrastruttura in progetto è stata condotta sulla base dei risultati delle indagini geognostiche e di laboratorio della campagna eseguita da ITALFERR nell'anno 2022 (Doc. Rif. [18][19][20]). L'individuazione delle unità geotecniche e la stima dei valori caratteristici dei parametri di resistenza e deformabilità ad esse associati è coerente con quanto già definito per i lotti precedenti, ricadenti nella stessa area.

6.1 CAMPAGNA DI INDAGINE ITALFERR 2022

La campagna di indagine realizzata nel corso dell'estate 2022 ha previsto:

- n.4 sondaggi a carotaggio continuo spinti fino ad una profondità di 40m dalla quota di bocca foro (BH-11, 12, 13, 14);
- n.3 prove sismiche di superficie tipo MASW (MASW-1, 2, 3);
- n.2 prove sismiche in foro tipo Down-Hole spinte fino a 40m (DH-BH13 e DH-BH 14)

Nei fori di sondaggio sono state eseguite:

- n. 24 prove SPT (6 prove per sondaggio);
- n.12 prove di permeabilità Lefranc a carico Variabile (3 per sondaggio a profondità medie di 2.5, 10 e 23m dalla quota di bocca foro);
- n.8 prove pressiometriche (2 per sondaggio, a profondità medie di 3.5 e 18m dalla quota di bocca foro);

Nei sondaggi sono stati raccolti:

- n. 16 campioni indisturbati (4 per sondaggio, a profondità medie di 1.7÷2.2, 6.2, 12.20 e 35m dalla quota di bocca foro)
- n. 8 campioni rimaneggiati (2 per sondaggio, a profondità medie di 25.4 e 30m dalla quota di bocca foro)

Sui campioni prelevati sono state eseguite:

- n.16 prove per la definizione delle caratteristiche fisiche generali e delle proprietà indice (pesi, granulometria, contenuto d'acqua naturale, indice dei vuoti iniziale, grado di saturazione, limiti di Atterberg, indice di plasticità, classificazione UNI 10006);

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

- n.4 prove per la definizione della resistenza a taglio in condizioni drenate: taglio diretto (TD);
- n.5 prove per la definizione della resistenza a taglio in condizioni non drenate, di cui 4 triassiali non consolidate-non drenate (TX-UU) ed 1 d compressione ad espansione laterale libera (ELL);
- n.8 prove di compressibilità edometrica (ED);

7 INDICAZIONI SULLA FALDA

I livelli di falda sono stati definiti a partire delle valutazioni idrogeologiche riportate negli specifici elaborati [21] e sulla base delle letture piezometriche disponibili effettuate nell'ambito della campagna ITALFERR 2022. Il livello di falda di progetto varia lungo lo sviluppo dell'infrastruttura tra i 1.5m e 7.0m di profondità dal piano campagna ed è indicato nel profilo geologico di riferimento [23].

8 UNITÀ GEOTECNICHE

A partire dal modello geologico locale e sulla base dell'interpretazione dei risultati delle indagini disponibili, sono state identificate le seguenti unità geotecniche di riferimento.

Per l'individuazione delle unità geotecniche sono stati analizzati i dati stratigrafici corrispondenti alle verticali di sondaggio disponibili ed i risultati delle prove in sito e di laboratorio eseguite sui campioni estratti nei sondaggi indicati.

I criteri e le correlazioni utilizzate per la interpretazione delle prove geotecniche in sito e di laboratorio e la definizione dei valori caratteristici dei parametri meccanici delle singole unità geotecniche sono illustrati rispettivamente ai capitoli 7 e 8.

Si riportano di seguito le unità geotecniche individuate lungo il tracciato in esame:

Tabella 5: Unità geotecniche individuate nell'area di progetto

| Unità Geotecnica | Unità Geologica | Descrizione |
|------------------|--|---|
| R | h Riporti antropici | <i>Ghiaie poligeniche ed eterometriche (h), da angolose a sub-angolose, con locali frammenti di laterizi, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio, marrone e avana, da scarsa ad abbondante; a luoghi si rinvengono passaggi di sabbie e sabbie limose grigie, marroni e giallastre, a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e abbondanti ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate.</i> |
| | b2 Coltri eluvio-colluviali | <i>Limi argillosi e argille limoso-sabbiose di colore marrone, grigio e brunastro (b2), a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-arrotondate; a luoghi si rinvengono passaggi di limi sabbiosi e sabbie limose di colore marrone e giallastro, a struttura indistinta, con diffusi resti vegetali e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-arrotondate.</i> |
| | ba1 Depositi alluvionali attuali | <i>Ghiaie poligeniche ed eterometriche (ba1), da sub-angolose ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e giallastro, da scarsa ad abbondante; si rinvengono frequenti passaggi di sabbie e sabbie limose di colore grigio e marrone, a struttura indistinta, con locali ghiaie poligeniche da sub-angolose a sub-arrotondate.</i> |
| | bb2 Depositi alluvionali recenti | <i>Sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi di colore grigio, marrone e giallastro (bb2), a struttura indistinta o debolmente laminata, con locali ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate; si rinvengono intercalazioni di argille limose grigie con abbondante materiale organico e lenti di ghiaie poligeniche in scarsa matrice sabbioso-limosa grigiastra.</i> |
| | g2 Depositi di spiaggia attuali | <i>Sabbie medie e grossolane ben classate di colore giallo-biancastro (g2), in strati da molto sottili a medi, generalmente amalgamati, con locali intercalazioni di limi e sabbie fini; si rinvengono diffusi e discontinui lag conchigliari con abbondanti resti di Tellina sp., Cardidae e rari gasteropodi; talora sono presenti lenti e/o livelli di sabbie ghiaiose di colore biancastro.</i> |
| | gn2/gn3 Depositi marini terrazzati | <i>Depositi marini di spiaggia, laguna e cordone litoraneo composto da due distinte litofacies:</i> - gn2, litofacies composta da sabbie e sabbie limose massive disposte in strati da molto sottili a medi, con locali intercalazioni di ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate e sabbie limoso-argillose ed argille limose; - gn3, argille limose e argille sabbiose con locali ghiaie e ciottoli poligenici da sub-angolosi ad arrotondati; si rinvengono intercalazioni di sabbie, sabbie limose, sabbie limoso-argillose. |
| UG1 | LEI2 Sintema di Lentini | <i>La successione in esame è formata da argille limose e argille limoso-marnose di colore grigio e grigio-azzurro, giallastre per alterazione (LEI2), massive o debolmente stratificate, con diffusi residui carboniosi, locali resti fossili e sottili livelli di sabbie e sabbie limose di colore giallastro; alla base dell'unità sono presenti lenti, spesse fino a 2 m, di sabbie e calcareniti ricche di molluschi, tra cui Arctica islandica; in superficie è localmente presente un paleosuolo bruno con rari resti di vertebrati.</i> |

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

9 CRITERI E CORRELAZIONI UTILIZZATI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

9.1 RESISTENZA A TAGLIO DEI TERRENI A GRANA GROSSA

Per la stima del valore caratteristico dell'angolo di resistenza a taglio (φ') sono stati confrontati i valori ottenuti per correlazione empirica con la resistenza penetrometrica in prova dinamica, tipo SPT, e quelli derivanti da prova di taglio diretto (TD) sul materiale estratto da campioni indisturbati.

Le correlazioni empiriche con SPT adottate sono:

Road Bridge Specification (1982)

$$\varphi' = \sqrt{15 * N_{spt}} + 15$$

Japanese National Railway (1982):

$$\varphi' = 0,3 * N_{spt} + 27$$

tarate su un ampio database di terreni a grana grossa e generalmente cautelative nella stima del valore di picco dell'angolo di resistenza a taglio.

9.2 RESISTENZA A TAGLIO DEI TERRENI A GRANA FINE

La resistenza a taglio dei terreni a grana fine viene generalmente stimata sulla base dei dati ottenuti da prove di resistenza in laboratorio, attesa la possibilità di ottenere campioni con minimo livello di disturbo in questa categoria di terreni.

In mancanza di dati da prove su campione, una stima di massima della resistenza drenata dei terreni a grana fine può essere sviluppata attraverso correlazioni empiriche.

Per i terreni a grana fine, la bassa permeabilità implica che all'atto dell'applicazione dei carichi si sviluppi una risposta meccanica a breve termine, in condizioni di drenaggio bloccato, ed una al termine del processo di consolidazione, in condizioni drenate.

Nel primo caso la resistenza è quantificata dalla coesione non drenata (c_u); nel secondo caso dai parametri di Mohr-Coulomb φ' e c' , rispettivamente angolo di resistenza a taglio e coesione efficace.

9.2.1 Resistenza in condizioni drenate

Per i terreni coesivi, in assenza dei risultati di prove triassiali consolidate drenate (TX-CD), una stima di massima dell'angolo di resistenza a taglio in condizioni drenate può essere effettuata attraverso la correlazione empirica di *Kenney (1959)*:

$$\varphi' = 50 - 14 \log(I_p)$$

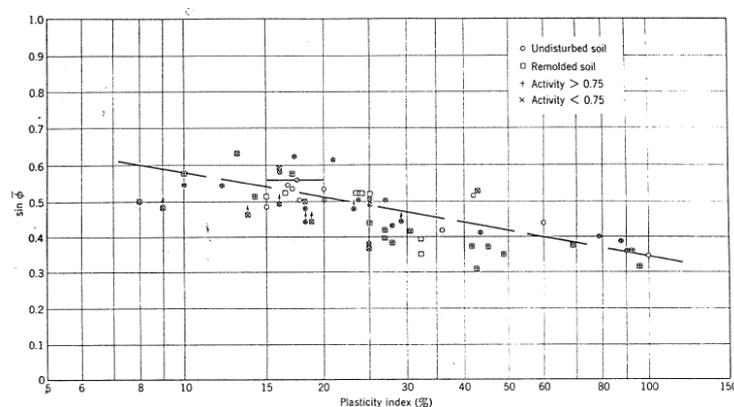


Figura 9-1 – Correlazione tra angolo d'attrito φ' e I_p Kenney (1959)

in cui I_p è l'indice di plasticità.

9.2.2 Resistenza in condizioni non drenate

La resistenza non drenata (c_u) viene generalmente stimata sui risultati di specifiche prove di laboratorio su campioni indisturbati (triassiali consolidate drenate, TX-CU, o non consolidate-non drenate, TX-UU). Una stima preliminare può essere fatta anche in base a misure dirette effettuate in sito attraverso il penetrometro tascabile o su valori ottenuti tramite correlazione empirica con la resistenza penetrometrica in prova dinamica (SPT) o statica (CPT-CPTU).

Nel caso specifico non si dispone di risultati di prove CPTU, ma solo di valori di resistenza penetrometrica SPT; pertanto, è stata eseguita una stima della c_u attraverso la correlazione di Stroud (1989):

$$c_u = f_1 * N_{spt}$$

in cui

f_1 è un coefficiente moltiplicativo dipendente dall'indice di plasticità secondo la correlazione mostrata nella seguente figura:

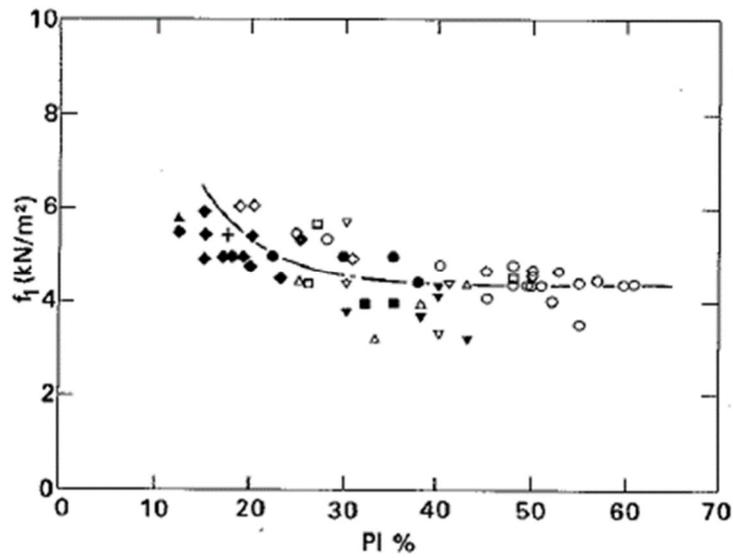


Figura 9-2 – Valore del coefficiente f_1 al variare dell'indice di plasticità IP (Stroud, 1989)

9.2.3 Parametri di rigidezza

Il modulo elastico operativo (E_{op}) può essere stimato sulla base delle seguenti metodologie (elencate in ordine decrescente di affidabilità):

- prove pressiometriche;
- correlazione analitica con le velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) ottenute da prove sismiche in situ;
- da correlazioni empiriche dirette ed indirette con la resistenza penetrometrica in prova SPT;

9.2.3.1 Modulo elastico operativo da prove sismiche in situ

Le correlazioni analitiche che permettono di ricavare il modulo elastico a bassi livelli di deformazione (E_0) sono:

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2$$

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

in cui:

- γ_t = peso di volume naturale del terreno in kN/m³;
- ν' = rapporto di Poisson del terreno;
- V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s.
- G_0 = modulo di rigidezza a taglio a piccolissime deformazioni angolari ($\gamma = 10^{-4}$ %), in MPa

Il modulo operativo E_{op} si ricava fattorizzando il modulo E_0 per un coefficiente a che, in linea teorica, dipende dal livello di deformazione attesa per le opere interagenti col terreno (rilevati, fondazioni o opere di sostegno).

In questa fase di progettazione, a scopo cautelativo, si è assunto:

$$E_{op} = E_0/10$$

sia per le opere di fondazione, sia per le opere di sostegno.

9.2.3.2 Modulo operativo da correlazione con SPT

Il modulo operativo può essere ottenuto calcolando i valori di V_s in funzione del numero di colpi (N_{SPT}) tramite la correlazione di Ohta e Goto (1978) e determinando successivamente il modulo operativo E_{op} tramite le correlazioni analitiche precedentemente indicate.

La correlazione empirica di Ohta e Goto (1978) è stata calibrata su depositi sabbiosi e sabbioso ghiaiosi:

$$V_s = C (N_{SPT})^{0.171} \cdot z^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G$$

essendo:

- $C = 53.3$;
- z = profondità dal p.c. in metri;
- f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedasi tabella a seguire);
- f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica

| | | |
|-------|---------|-------------|
| f_A | Olocene | Pleistocene |
| | 1,0 | 1,3 |

| | | | | | |
|-------|--------|-----------------|---------------|--------------|-------------|
| f_G | Ghiaie | Sabbie ghiaiose | Sabbie grosse | Sabbie medie | Sabbie fini |
| | 1,45 | 1,15 | 1,14 | 1,07 | 1,09 |

9.2.3.3 Modulo elastico operativo da Prove Pressiometriche

La prova pressiométrica consiste nel portare una sonda munita di un elemento espansivo ad una profondità assegnata ed applicare una pressione radiale progressivamente crescente al terreno a contatto con la sonda. Le strumentazioni di cui è equipaggiata la sonda misurano la pressione applicata e lo spostamento indotto nel terreno alla profondità di prova. Una volta raggiunta la pressione massima ammissibile, si procede a scaricare il pressiometro, per gradi, misurando le deformazioni durante la fase di scarico. Nella prova di tipo Menard (MPM), la sonda espandibile è calata in un foro di diametro specifico, appositamente eseguito. Una tipica curva pressioni-deformazioni è rappresentata nella seguente figura, nella quale si distinguono una fase iniziale (o di messa in contatto della sonda col terreno), una fase elastica lineare ed un'ultima fase plastica (o di deformazioni irreversibili).

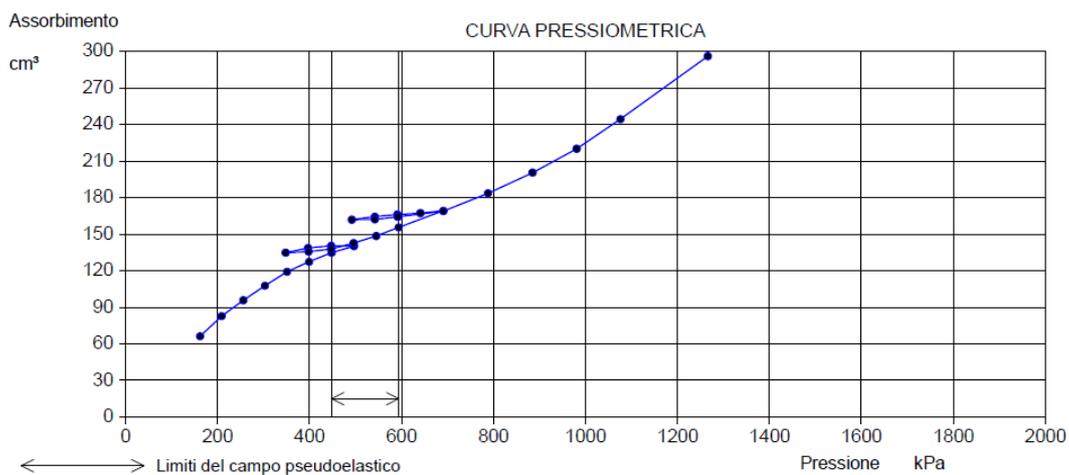


Figura 9-3 – Esempio di curva pressiométrica con identificazione del campo elastico

In base a questa curva è possibile, si calcola la pressione di fluage (P_F , ovvero la pressione alla quale il materiale cessa di comportarsi elasticamente), e la pressione limite (P_L , che rappresenta la pressione alla quale avviene la rottura del terreno, calcolando e il modulo di deformazione pressiometrico E_p , in base alla seguente espressione:

$$E_p = (1 + \nu) \cdot M \cdot r,$$

in cui

- ν il coefficiente di Poisson;
- M è la rigidezza radiale del terreno, data dalla pendenza del tratto elastico della curva pressiometrica;
- r è il raggio del foro del sondaggio.

Una volta ottenuto il modulo pressiometrico, è possibile ricavare il modulo di Young (E_{op}) dalla seguente relazione:

$$E_{op} = E_p / \alpha.$$

In cui il fattore reologico α è funzione della tipologia di terreno e del suo grado di consolidazione come indicato nella seguente tabella:

| Soil type | Peat | | Clay | | Silt | | Sand | | Sand and gravel | |
|----------------------------|---------------------------------------|----------|-------------------------|----------|-----------|---|-----------|----------|-----------------|----------|
| | E/p_L^* | α | E/p_L^* | α | E/p_L^* | α | E/p_L^* | α | E/p_L^* | α |
| Over-consolidated | | | > 16 | 1 | > 14 | 2/3 | > 12 | 1/2 | > 10 | 1/3 |
| Normally consolidated | For all values | 1 | 9-16 | 2/3 | 8-14 | 1/2 | 7-12 | 1/3 | 6-10 | 1/4 |
| Weathered and/or remoulded | | | 7-9 | 1/2 | | 1/2 | | 1/3 | | 1/4 |
| Rock | Extremely fractured $\alpha = 1/3$ | | Other $\alpha = 1/2$ | | | Slightly fractured or extremely weathered $\alpha = 2/3$ | | | | |

Tabella 6: Fattori reologici di Menard

9.2.4 Compressibilità delle unità coesive

La compressibilità di un terreno in condizioni edometriche (assialsimmetria di tensioni e deformazioni e a deformazione laterale impedita) è quantificata dagli indici di ricomprensione (CR), compressione (CC) e scarico (CS) dati dall'inverso delle pendenze dei segmenti che compongono la spezzata cui si schematizza, nel piano semi-logaritmico, la curva tensione/deformazione ottenuta eseguendo una specifica prova di compressione (prova edometrica). La curva edometrica è schematizzata nella seguente figura.

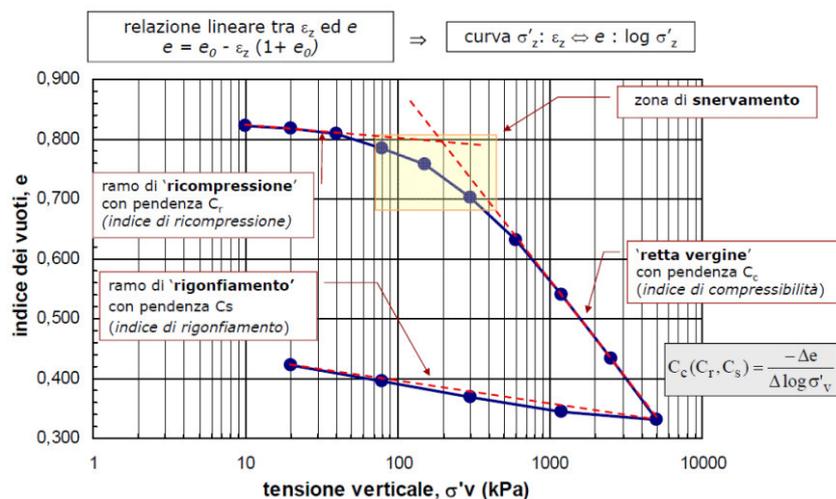


Figura 9-4 – Esempio di curva di compressione edometrica

La tensione verticale efficace che corrisponde al passaggio tra il tratto di ricomprensione, in cui il terreno esibisce ancora un comportamento elastico, al tratto di compressione, in cui il terreno accumula deformazioni plastiche (tratto plastico incoerente o retta vergine) viene indicata come tensione di preconsolidazione (σ'_p), ed è associata alla storia tensionale del terreno.

In base al rapporto tra la tensione di preconsolidazione e la tensione verticale efficace agente in situ ($OCR = \sigma'_p / \sigma'_v$) si distinguono due classi comportamentali di terreni:

- sovraconsolidati con $OCR > 1$
- normalconsolidati se $OCR < 1$

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Questa discriminante distingue due terreni in grado di esprimere deformazioni percentuali di un ordine di grandezza di differenza cumulando cedimenti in superficie molto diversi e soprattutto caratterizzati dall'assenza o dalla presenza di un'aliquota irreversibile.

La prova edometrica consente di definire anche il coefficiente di consolidazione primaria C_v , necessario alla stima del tempo con cui si sviluppa il cedimento legato ad una determinata fase di carico (decorso dei cedimenti nel tempo).

9.3 PERMEABILITÀ

La permeabilità dei terreni può essere stimata con adeguata affidabilità da prove di permeabilità in foro tipo Lefranc.

10 DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

La definizione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici per le unità identificate nell'area di sviluppo dell'infrastruttura in progetto è stata effettuata con i criteri illustrati nel precedente capitolo, sviluppando una caratterizzazione generale ed inquadrando gli intervalli caratteristici dei valori dei parametri meccanici per ciascuna unità individuata.

Nelle specifiche relazioni di calcolo o di predimensionamento delle opere saranno richiamati i parametri di progetto associati alla specifica stratigrafia di calcolo, stralciata dal profilo geotecnico generale.

10.1 UNITÀ R DELLE COLTRI ELUVIO COLLUVIALI E DEPOSITI MARINI ED ANTROPICI

Unità geotecnica associata ai depositi naturali (coltri eluvio-colluviali e depositi marini) ed antropici. Si rinviene lungo il tracciato in spessori variabili tra 1.0 e 5.0m (circa) a ricoprimento del substrato limoso della formazione di Lentini. In porzioni limitate del tracciato, tale spessore raggiunge anche i 7 m di spessore.

Le curve granulometriche del materiale estratto dai 4 campioni disponibili indicano una forte eterogeneità della composizione granulometrica, variabile tra limi con argilla, sabbia con limo debolmente argilloso, ghiaia sabbiosa, ciottoli e ghiaia.

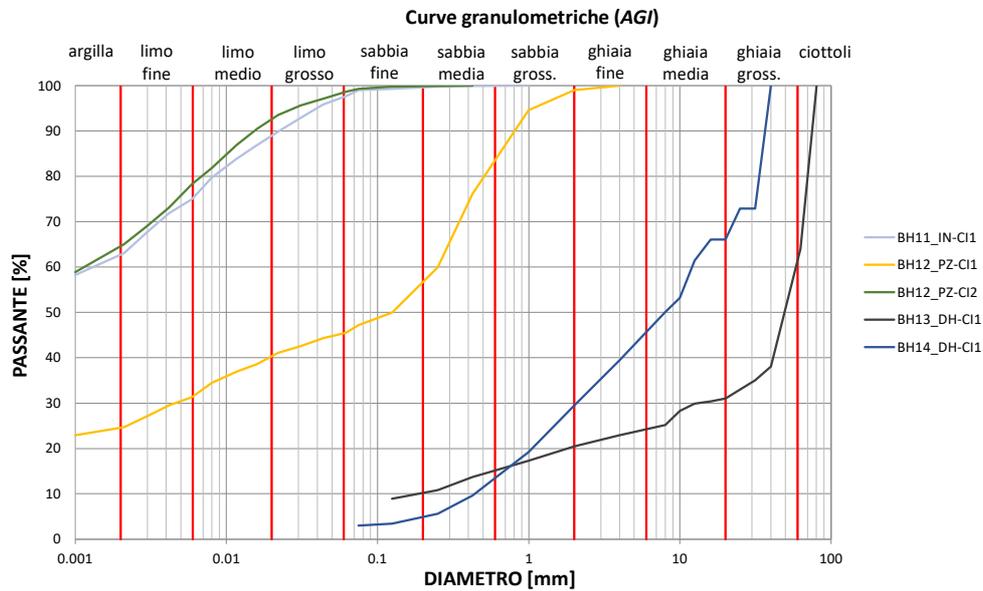


Figura 10-1 – Curve granulometriche dei campioni prelevati nell'unità UG R

Le poche misure del peso dell'unità di volume naturale indicano $\gamma_N = 18.5 - 18.8 \text{ kN/m}^3$.

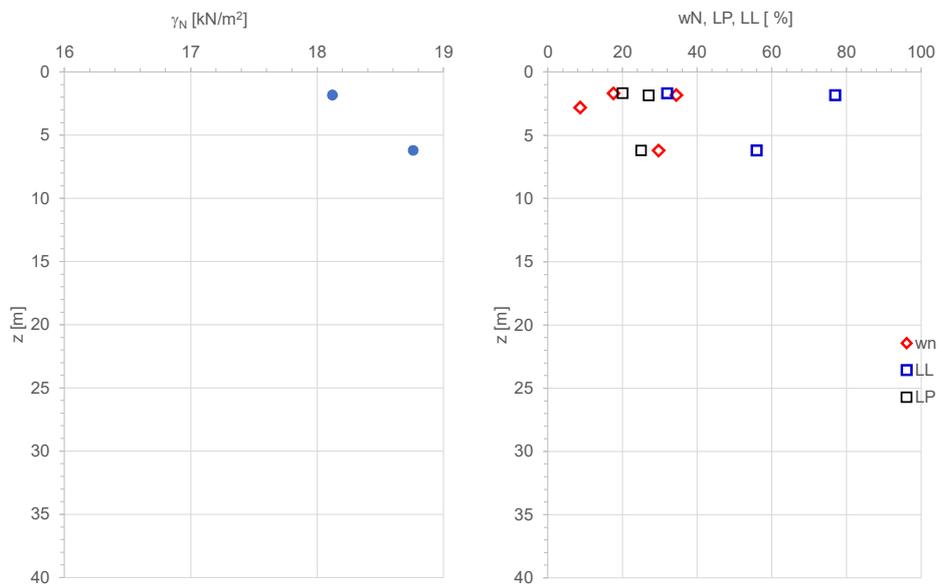


Figura 10-2 – UG R: andamento con la profondità del peso unitario naturale e del contenuto d'acqua naturale confrontato coi limiti di Atterberg

Nella carta di plasticità di Casagrande la frazione fine si colloca tra le argille inorganiche a bassa ed alta plasticità.

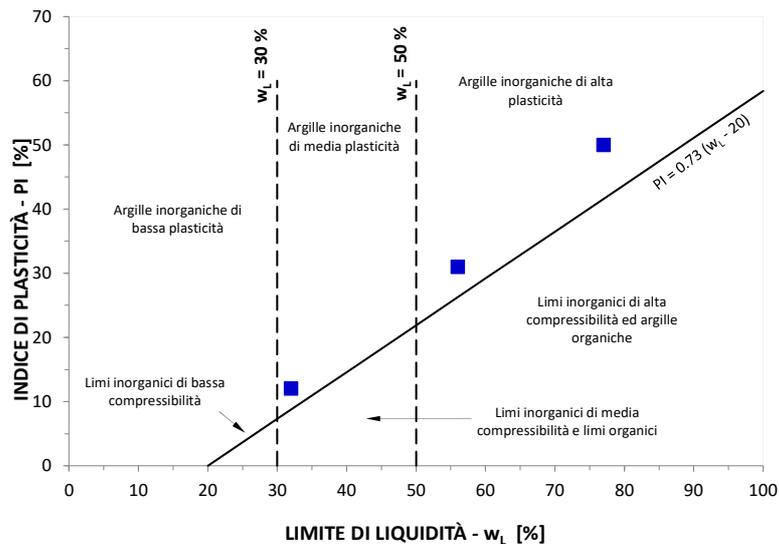


Figura 10-3 – Carta di plasticità di Casagrande

Le prove penetrometriche disponibili mostrano un numero di colpi (corretto) variabile nell'intervallo:

$$(N_1)_{60} = 5 \div 45 \text{ colpi/30cm,}$$

a cui corrisponde una densità relativa, stimata con la correlazione di Bazaara et al. (1967),

$$Dr = 22 \div 55\% \text{ (con un valore isolato 90\%),}$$

indicativa di un materiale in stato da sciolto a denso.

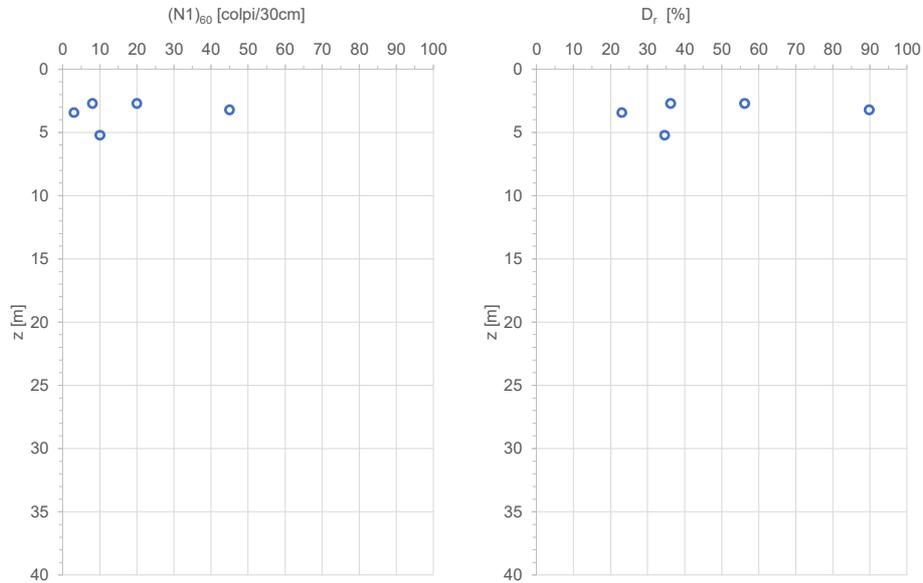


Figura 10-4 – UG R: Valori della resistenza penetrometrica in prova SPT e della densità relativa ad essa correlata

Per la stima del valore caratteristico dell'angolo di resistenza a taglio si dispone dei valori ottenuti sia da correlazione empirica col numero di colpi SPT, sia da prova di taglio diretto su campione indisturbato (TD). L'angolo di resistenza a taglio φ' varia tra 22 e 40°, con valore mediano pari a 28°; non si dispone di dati sulla coesione efficace che, di conseguenza, si assumerà nulla ($c'=0$).

I valori caratteristici sono:

$$\varphi' = 28^\circ, c' = 0$$

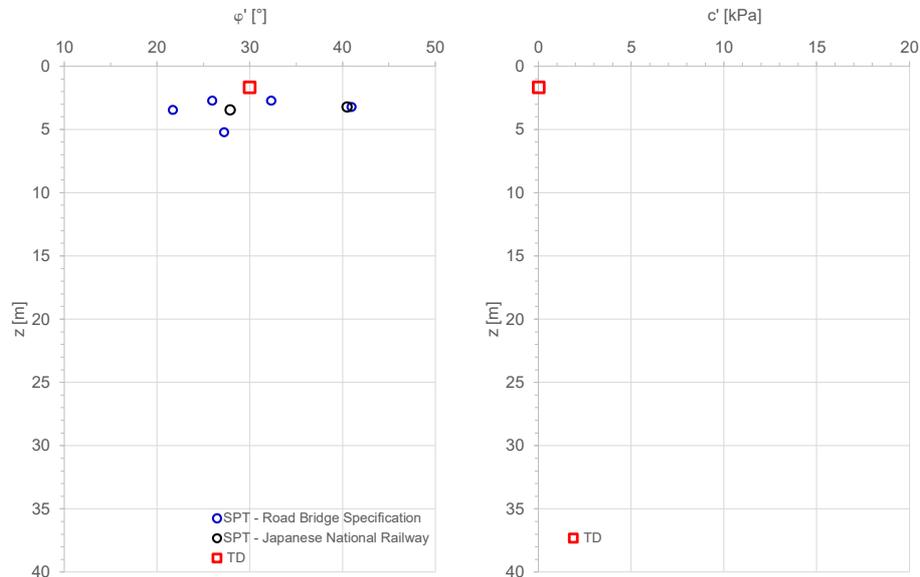


Figura 10-5 – Valori dell’angolo di resistenza a taglio da correlazione con N_{SPT} e da prova di taglio diretto

Per la stima della rigidezza operativa si dispone dei risultati di 4 prove pressiometriche eseguite a profondità di 3.5 – 4.0m dal pc e dei valori di modulo operativo da correlazione analitica con la velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s), sia misurata in prove sismiche di superficiale (MASW) ed in foro (DH), sia stimata da correlazione con N_{SPT} .

I valori ottenuti elaborando le prove pressiometriche disponibili sono:

| | z | UG | E_M | p_L | E_M/p_L | α | E |
|--------|----------|-----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|
| | [m] | | [kPa] | [kPa] | | | [MPa] |
| BH11 | 3.5 | R | 5467 | 997 | 5.48 | 0.33 | 16 |
| BH12PZ | 3.5 | R | 7403 | 997 | 7.43 | 0.33 | 22 |
| BH13DH | 4 | R | 5215 | 908 | 5.74 | 0.33 | 16 |
| BH14DH | 3.5 | R | 6795 | 1401 | 4.85 | 0.33 | 20 |

Nella seguente figura si riporta il confronto tra i valori di E_{op} ottenuti secondo diversi approcci:

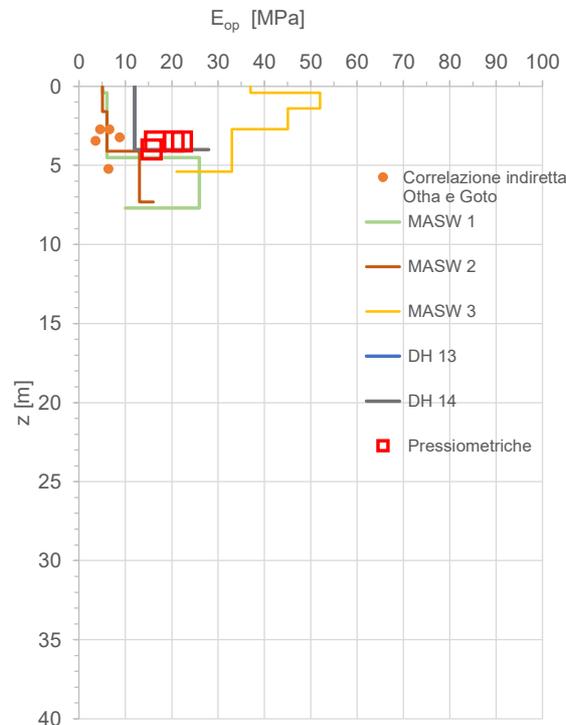


Figura 10-6 – Valori del modulo operativo ottenuto da prove pressiometriche, sismiche e da correlazione indiretta con SPT

La MASW 3 mostra valori di E_{op} di molto maggiori di quelli indicati dalle restanti prove (incluse le pressiometriche) probabilmente in dipendenza di particolari condizioni locali; i valori ottenuti sono compresi tra circa 7 e 20MPa con valore medio di 12MPa.

L'intervallo caratteristico ritenuto rappresentativo della rigidezza dell'unità in esame è:

$$E_{op} = 10 - 15\text{MPa}$$

Il valore di riferimento per le analisi d'interazione terreno-struttura e per calcoli di spostamenti è:

$$E_{op} = 10\text{MPa}.$$

10.2 ARGILLE LIMOSE DEL SINTEMA DI LENTINI - UG1

Si tratta del substrato limoso argiloso presente nell'intera area in esame esteso in profondità da 7m ad almeno 40m (profondità esplorata dai sondaggi).

L'analisi granulometrica del materiale estratto dagli 11 campioni disponibili indica un limo con argilla sostanzialmente omogeneo (ad eccezione del campione profondo C14, prelevato nel sondaggio BH14 a 35m di profondità dal pc, che indica un limo argilloso debolmente sabbioso).

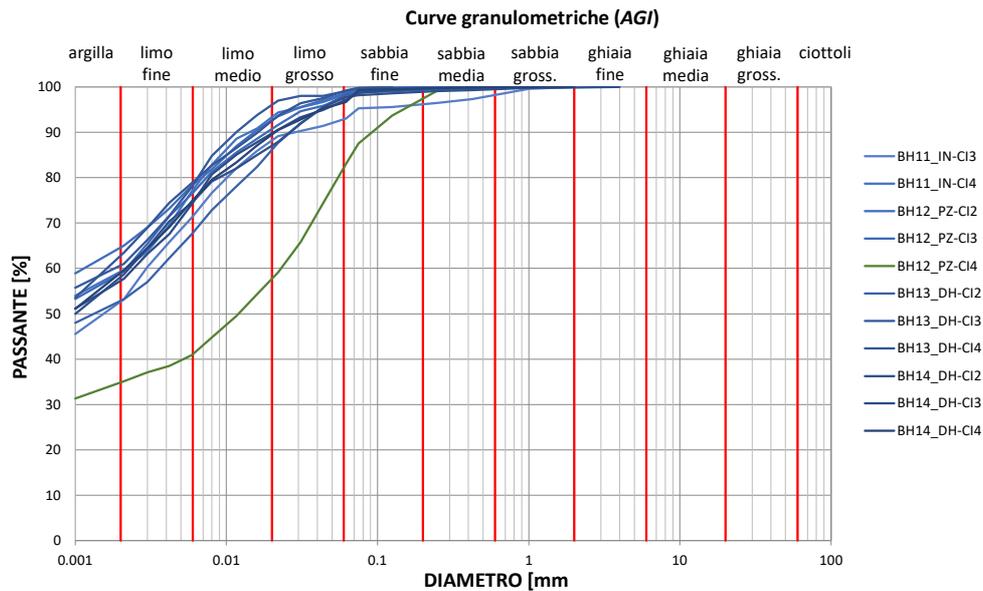


Figura 10-7 – Curve granulometriche dei campioni prelevati nell'unità geotecnica UG1

Le misure del peso dell'unità di volume naturale indicano un intervallo caratteristico $\gamma_N = 18 - 19 \text{ kN/m}^3$. Il contenuto d'acqua naturale varia poco con la profondità e risulta mediamente prossimo al limite plastico.

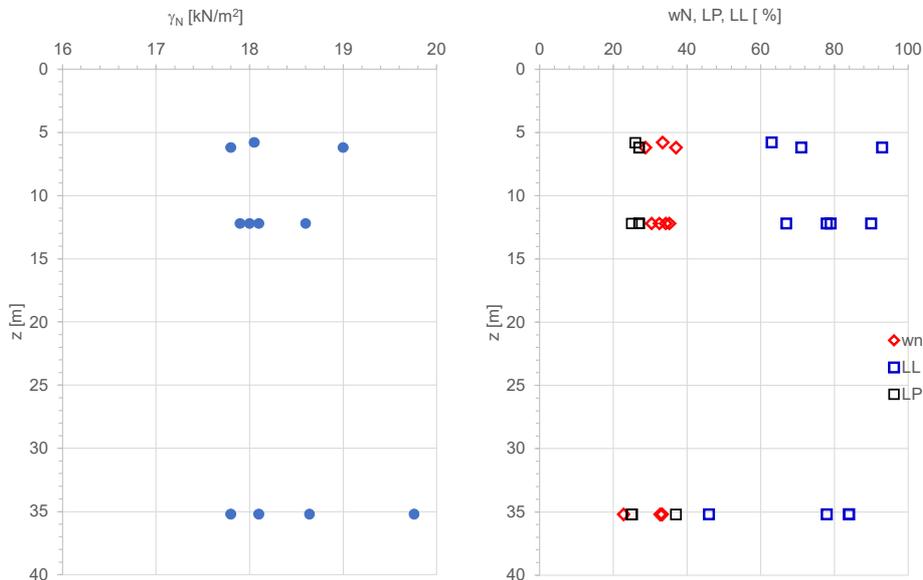


Figura 10-8 – UG 1: andamento con la profondità del peso unitario naturale e del contenuto d'acqua naturale confrontato coi limiti di Atterberg

Nella carta di plasticità di Casagrande il materiale si colloca tra le argille inorganiche ad alta plasticità.

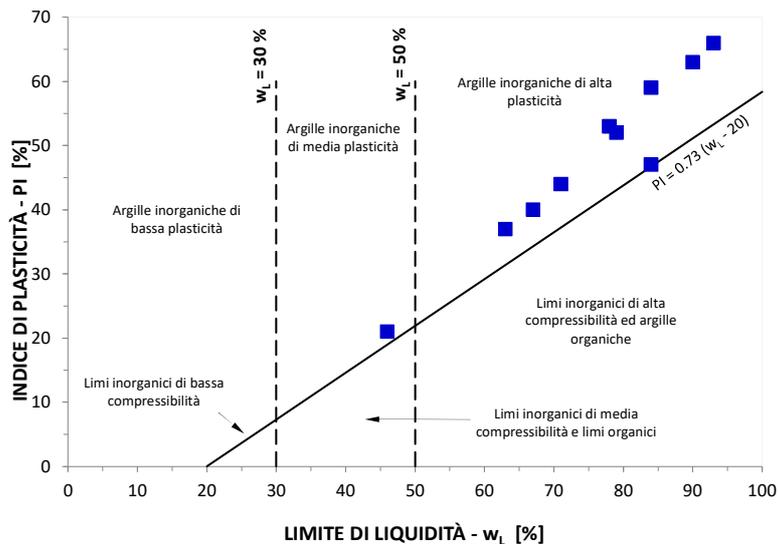


Figura 10-9 – UG1: Carta di plasticità di Casagrande

Le prove penetrometriche disponibili indicano una bassa resistenza penetrometrica in prova dinamica, con $(N_1)_{60}$ debolmente variabile con la profondità e compreso tra circa 10 e 18 colpi/30cm.

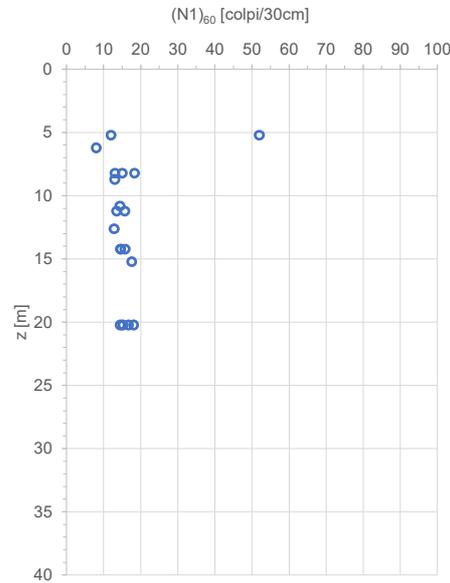


Figura 10-10 – UG R: Valori della resistenza penetrometrica in prova SPT

La resistenza non drenata è stata stimata in base ai dati disponibili da 4 prove triassiali non consolidate-non drenate (TX-UU), 1 prova ad espansione laterale libera (ELL), 5 valori di c_u ottenuti tramite il penetrometro tascabile e 19 valori ottenuti da correlazione empirica col numero di colpi N_{SPT} .

In quest'ultimo caso, si considera che l'indice di plasticità risulta essere poco variabile con la profondità e mediamente paria 48, per cui il valore del coefficiente moltiplicativo f_1 è pari a 4.2 - 4.5

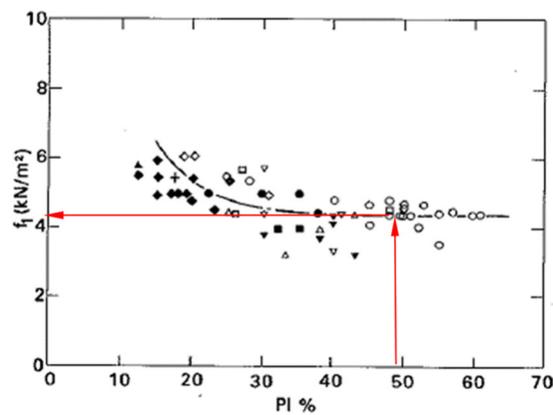


Figura 10-11 – UG 1: Valore del coefficiente f_1 della correlazione di Stroud (1989) utilizzato per la stima della c_u da N_{SPT}

I valori di c_u disponibili sono rappresentati nella seguente figura, in cui si osserva una sostanziale coerenza dei valori ottenuti da prova TX-UU con quelli ottenuti per correlazione empirica con N_{SPT} .

La resistenza non drenata ha un andamento crescente con la profondità all'interno dell'intervallo caratteristico:

$$c_u = 80 - 120 \text{ kPa}$$

valido per profondità minori di 15m dal piano campagna.

Non si dispone di dati da prove su campione eseguite a profondità maggiori di 15m dal pc, per cui, si assumeranno validi i risultati provenienti da studi eseguiti per le tratte infrastrutturali contigue a quella di progetto.

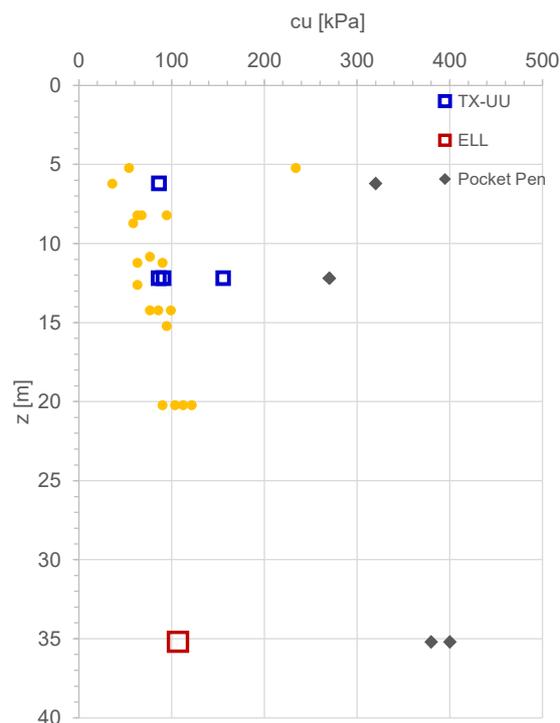


Figura 10-12 – UG 1: Andamento con la profondità dei valori di c_u ottenuti secondo differenti approcci

Per la stima del valore caratteristico dell'angolo di resistenza a taglio si confrontano i valori ottenuti da prova di taglio diretto su campione indisturbato e quelli ottenuti applicando la correlazione empirica di Kennet (1959):

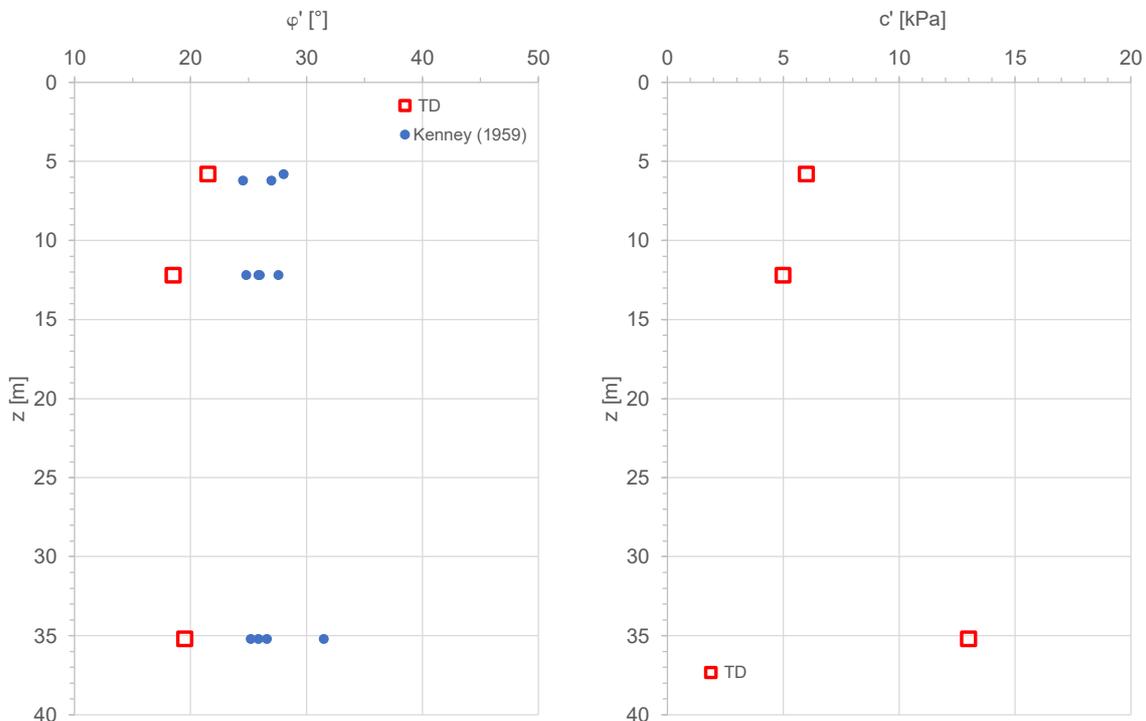


Figura 10-13 – UG 1: Andamento con la profondità dei valori di ϕ' e c'

L'angolo di resistenza a taglio varia nell'intervallo caratteristico:

$$\phi' = 20 - 25^\circ$$

La coesione efficace, invece, deriva solo da prove di taglio diretto che indicano:

$$c' = 5 - 13\text{kPa}$$

con un andamento apparentemente crescente con la profondità ed in linea con quanto definito in studi precedente su tratte contigue a quella in progetto.

Per la stima della rigidezza operativa si dispone dei risultati di 4 prove pressiometriche eseguite tutte a profondità di 18.5m dal pc e dei valori di modulo operativo da correlazione analitica con la velocità di propagazione delle onde di taglio (V_S), sia misurata in prove sismiche di superficiale (MASW) ed in foro (DH), sia stimata da correlazione con N_{SPT} .

I valori ottenuti elaborando le prove pressiometriche disponibili sono:

| | z | UG | E _M | p _L | E _M /p _L | α | E |
|--------|------|-----|----------------|----------------|--------------------------------|------|-----------|
| | [m] | | [kPa] | [kPa] | | | [MPa] |
| BH11 | 18.5 | UG1 | 23006 | 1794 | 12.82 | 0.67 | 34 |
| BH12PZ | 18.5 | UG1 | 14176 | 2498 | 5.67 | 0.67 | 21 |
| BH13DH | 18.5 | UG1 | 20690 | 1906 | 10.86 | 0.67 | 31 |
| BH14DH | 18.5 | UG1 | 19276 | 2198 | 8.77 | 0.67 | 29 |

Nella seguente figura si riporta il confronto tra i valori di E_{op} ottenuti secondo i diversi approcci indicati.

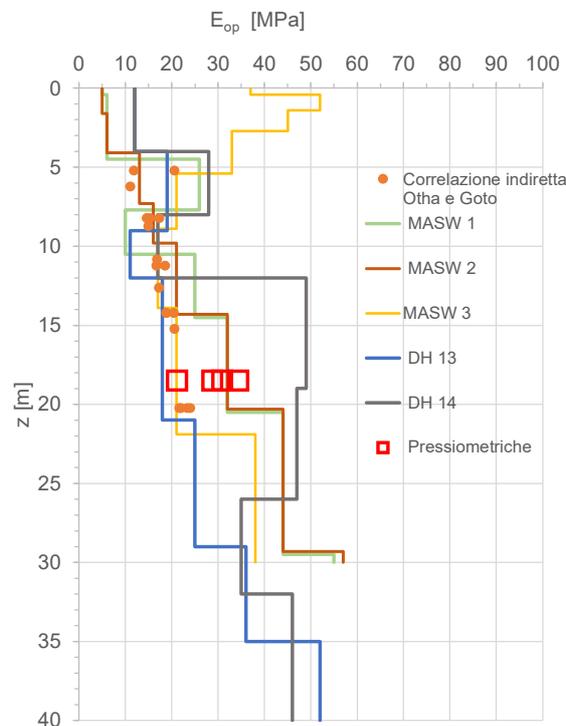


Figura 10-14 – UG1: valori del modulo operativo ottenuto da prove pressiometriche, sismiche e da correlazione indiretta con SPT

Per profondità maggiori di 6 ÷ 7m dal pc, il modulo operativo cresce quasi linearmente. Si possono definire i seguenti intervalli:

- per $z = 6 \div 15$ m dal pc, $E_{op} = 10 \div 15$ MPa;
- per $z = 15 \div 30$ m dal pc, $E_{op} = 20 \div 25$ MPa;

Si dispone di 7 prove di compressibilità edometrica che permettono di definire i valori dell'indice di ricomprensione (CR), compressione (CC) e scarico (CS) mostrati di seguito. In figura si riporta anche l'andamento del grado di sovraconsolidazione con la profondità.

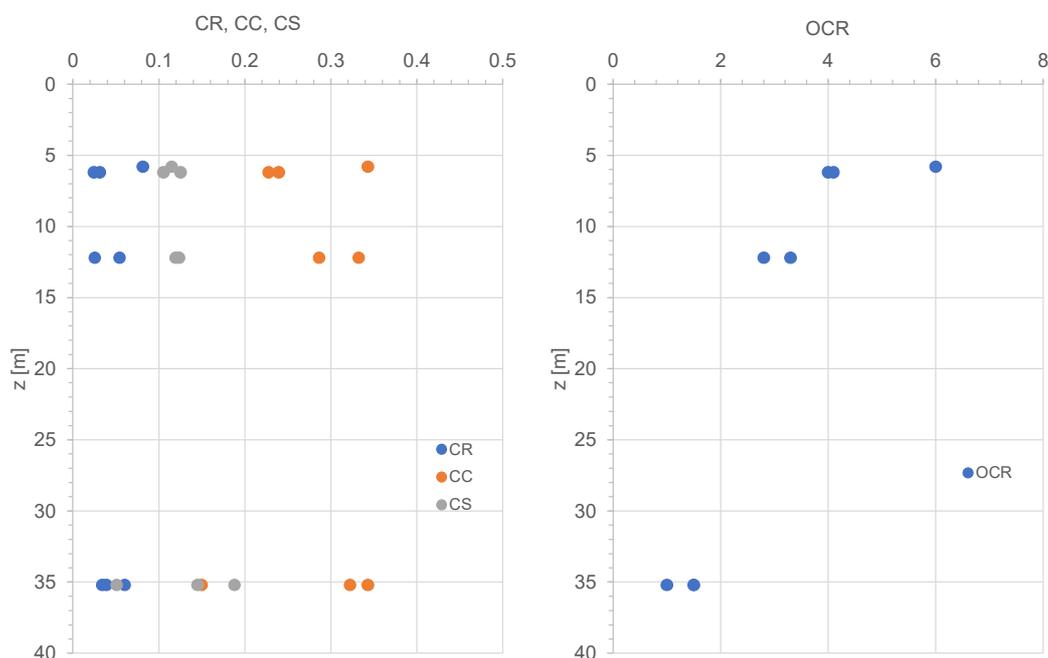


Figura 10-15 – UG 1: andamento con la profondità degli indici di ricomprensione, compressione e scarico e del grado di sovraconsolidazione

Le prove edometriche hanno permesso di definire anche un valore di riferimento per il coefficiente di consolidazione primaria, parametro fondamentale nelle valutazioni sul tempo di sviluppo dei cedimenti da consolidazione. I risultati ottenuti in prova sono mostrati nella seguente figura:

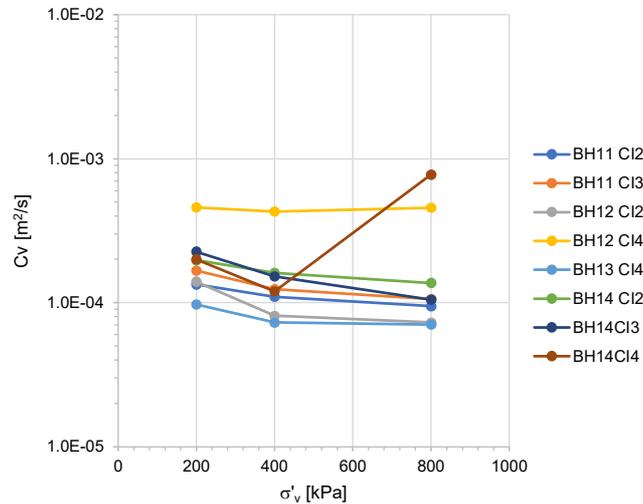


Figura 10-16 – UG 1: coefficiente di consolidazione primaria

Il coefficiente C_v varia in funzione dello stato tensionale agente; tuttavia, si osserva che nell'intervallo di variazione della tensione verticale efficace $\sigma'_v = 200 - 800\text{kPa}$ il valore si attesta mediamente sull'ordine di grandezza:

$$C_v = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

10.3 PERMEABILITÀ

Si dispone di valori di permeabilità da prove di tipo Lefranc (a carico variabile) eseguite nei 4 sondaggi disponibili, a diverse profondità. I risultati sono riportati di seguito:

| Sondaggio | Prova | z [m] | k_h [m/s] |
|-----------|-------|-------|-------------|
| BH11 | LE1 | 2.5 | 9.39E-07 |
| BH11 | LE2 | 9.5 | 1.42E-07 |
| BH11 | LE3 | 22 | 1.89E-08 |
| BH12 | LE1 | 2.3 | 8.19E-07 |
| BH12 | LE2 | 10 | 1.38E-08 |
| BH12 | LE3 | 23 | 1.19E-08 |
| BH13 | LE1 | 2.3 | 9.70E-07 |
| BH13 | LE2 | 9.5 | 6.15E-07 |
| BH13 | LE3 | 22 | 3.02E-05 |
| BH14 | LE1 | 2.5 | 3.05E-06 |
| BH14 | LE2 | 11.3 | 1.49E-06 |

| Sondaggio | Prova | z [m] | k_h [m/s] |
|-----------|-------|-------|-------------|
| BH14 | LE3 | 22.5 | 5.22E-05 |

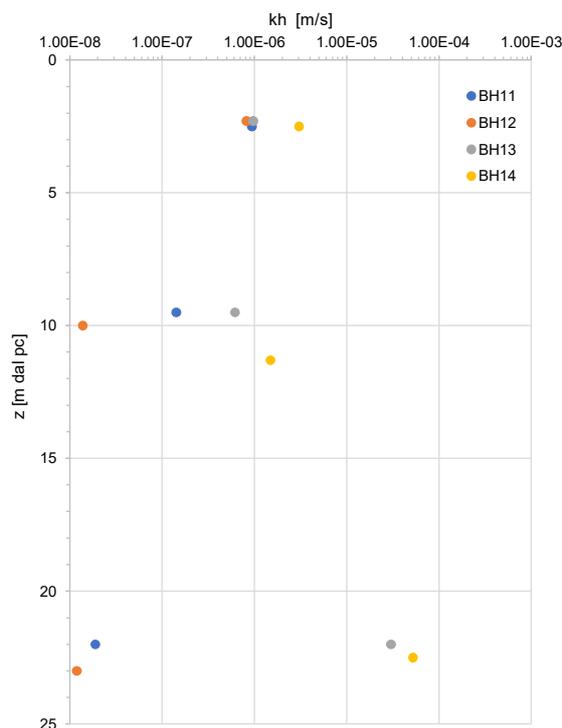


Figura 10-17 – UG 1: risultati delle prove di permeabilità disponibili

Dai risultati delle prove, in ipotesi di $k_h = k_v$, si associano alle unità geotecniche individuate i seguenti valori di permeabilità:

- UG R: $k = 10^{-6}$ m/s
- UG1: $k = 10^{-6} \div 10^{-8}$ m/s

11 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Si riportano di seguito i valori caratteristici dei parametri geotecnici per le verifiche degli elementi strutturali e delle opere geotecniche:

Tabella 7: sintesi dei parametri geotecnici ottenuti tramite le elaborazioni delle prove.

| Unità Geotecniche | | Parametri | | | | | | |
|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|-------|------------|---------|-------|------------------|
| | | Z(*) | γ | c' | φ' | Cu | E' | k |
| Unità | Unità Geologica | m | kN/m ³ | kPa | ° | kPa | MPa | m/s |
| R | h - Riporti antropici | 0 - 5.0 | 20 | - | 28 | - | 10 | 10 ⁻⁶ |
| | b2 - Coltri eluvio-colluviali | | | | | | | |
| | ba1 - Depositi alluvionali attuali | | | | | | | |
| | bb2 - Depositi alluvionali recenti | | | | | | | |
| | g2 - Depositi di spiaggia attuali | | | | | | | |
| UG1 | LEI2 - Sintema Lentini | 5.0 - 15 | 19-20 | 5-10 | 20-24 | 80-120 | 10-15 | 1E-6 ÷ 1E-8 |
| | LEI2 - Sintema Lentini | 15 - 40 | 19-20 | 10-15 | 20-24 | 120-170 | 20-25 | 1E-6 ÷ 1E-8 |

(*) gli affondamenti di riferimento riportati in tabella sono da considerarsi come valori medi identificati per i modelli geotecnici di calcolo. Eventuali variazioni puntuali rispetto tali valori sono direttamente considerati ed indicati nelle relazioni di calcolo specialistiche.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

12 ASPETTI GEOTECNICI E SCELTE PROGETTUALI

I principali aspetti geotecnici connessi con la realizzazione del collegamento al porto di Augusta sono riconducibili a:

- valutazione della stabilità e dei cedimenti dei cedimenti dei rilevati ferroviari e stradali;
- valutazione della stabilità trincee ferroviarie e stradali;
- valutazione della capacità portante e dei cedimenti degli scatolari.
- Stabilizzazione del versante in frana nei pressi della galleria artificiale GA01

I risultati del complesso delle analisi effettuate, contenute negli elaborati di progetto, evidenziano la compatibilità delle opere progettate sia con i limiti imposti dalla Normativa, sia con i vincoli prescritti dal Manuale di Progettazione RFI.

Nella formazione del corpo del rilevato saranno innanzitutto impiegate le terre provenienti da scavi di sbancamento, di fondazione o di galleria appartenenti ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A3 e A4, di cui alla classificazione delle terre della norma UNI 11531-1/2014, e inoltre terre provenienti da cave di prestito, appartenenti ai gruppi A1, A2-4, A2-5, A2-6, A2-7, A3. Non dovranno essere impiegate terre del gruppo A3 con coefficiente di disuniformità minore o uguale a 7, inteso quale rapporto tra i passanti ai setacci 0,4 mm e 0,063 mm.

Le scarpate dei rilevati verranno profilate di norma con pendenza H:B pari a 2:3 e verranno rinverdite mediante la posa di 30 cm di terreno vegetale.

Prima della formazione del rilevato, il terreno al di sotto del piano di campagna andrà asportato per uno spessore minimo di 50 cm (scotico) e comunque per tutto lo strato di terreno vegetale. Al disotto dello scotico, quando necessario verrà realizzata una bonifica di spessore maggiore o uguale a 50 cm.

Considerate le modeste caratteristiche di resistenza e deformabilità dei terreni di sedime, in particolare quelli appartenenti alla formazione di Lentini, e tenuto conto anche degli elevati valori delle accelerazioni sismiche che caratterizzano la zona in esame è stato previsto in progetto di limitare l'altezza dei rilevati a 5 m.

Per i rilevati di altezza superiore a 3 m e per gli scatolari è stata prevista la possibilità di eseguire un trattamento di consolidamento dei terreni di fondazione mediante la realizzazione di colonne in ghiaia. La tipologia di consolidamento previsto consiste in colonne di diametro pari a 800mm, disposte a quinconce con maglia 2.4 x 2.4 m, realizzate mediante vibrosostituzione. Al disopra delle colonne, sul piano di posa dell'opera verranno posizionate geogriglie di rinforzo (RS6201R11WBGE0006001B).

L'individuazione della distribuzione in pianta definitiva degli interventi di consolidamento, e quindi delle opere o dei tratti d'opera effettivamente interessati, è rimandata alla successiva fase progettuale per la quale saranno anche disponibili ulteriori approfondimenti conoscitivi sul comportamento fisico-meccanico dei terreni presenti in sito.

La vibrosostituzione è una tecnica di consolidamento di terreni di natura prevalentemente limo-argillosa e consiste nella formazione di elementi colonnari in ghiaia compattata che, unitamente al terreno che ne resta intercluso (dunque senza asportazione di terreno), creano un sistema composito con caratteristiche di resistenza e rigidità incrementate rispetto al terreno originario.

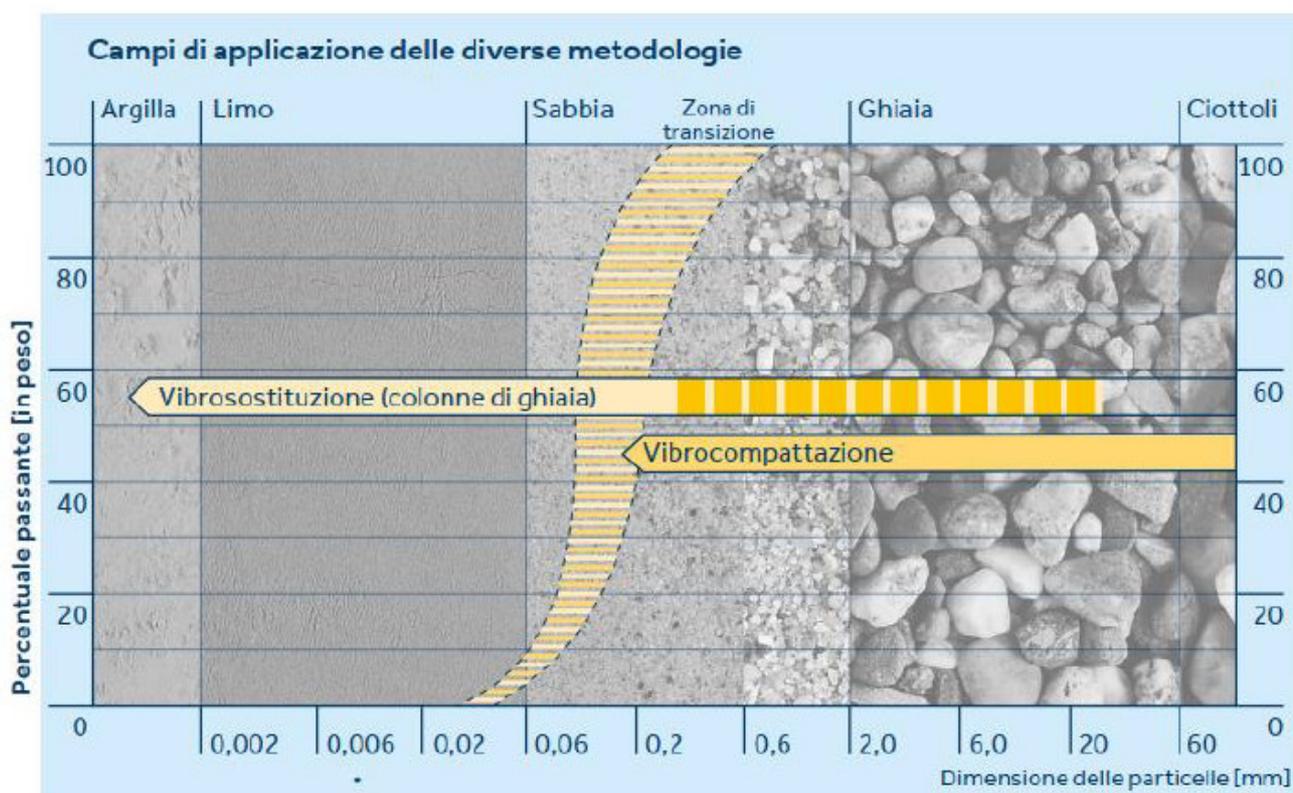


Figura 12-1 – Criteri di applicabilità della tecnica della vibrosostituzione in funzione della granulometria del materiale in sito

Nel dettaglio, la sonda vibrante viene dapprima infissa nel terreno fino alla profondità di progetto, dislocando lateralmente il terreno presente in posto. Una volta raggiunta la profondità di progetto, viene immesso il materiale drenante dalla punta della sonda (bottom feed). Con il successivo riabbassamento

della sonda il materiale drenante viene addensato e subisce un'espansione laterale che compatta il terreno circostante. Durante il riempimento la sonda vibrante viene alzata e abbassata procedendo per avanzamenti di alcuni decimetri fino al raggiungimento di una quantità ottimale di materiale per colonna ovvero fino al raggiungimento di un prefissato assorbimento di energia dell'utensile. Il procedimento viene ripetuto fino a che il foro sia completamente riempito e compattato, formando una colonna di ghiaia. Durante tutto il processo l'utensile di perforazione è collegato ad opportuna strumentazione informatica che permette di controllare in tempo reale i dati di pressione e profondità raggiunti, la quantità di materiale immesso.

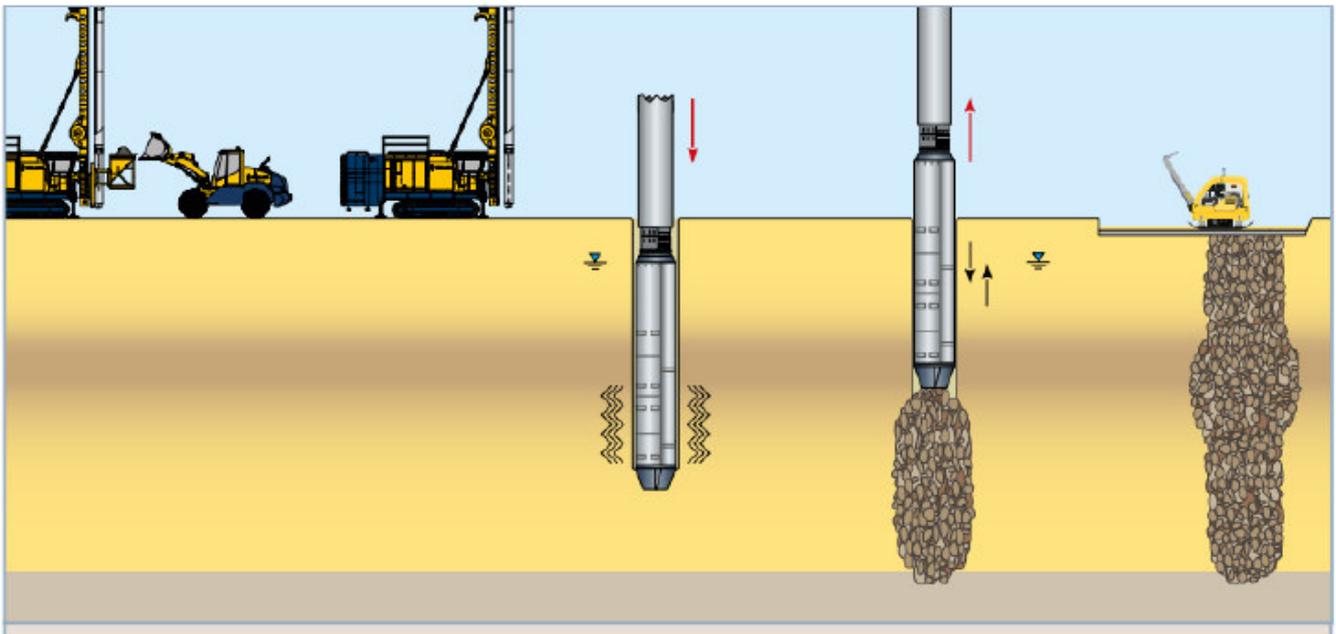


Figura 12-2 – Sequenza esecutiva del consolidamento per vibrosostituzione

Le tecniche vibro sono molto versatili e possono essere modulate al fine di essere utilizzate con efficacia su un'ampia varietà di condizioni geologiche e di requisiti progettuali. L'esecuzione è veloce, anche nel caso di trattamenti su grandi volumi di terreno e la costruzione delle successive opere strutturali può seguire immediatamente dopo. Il consolidamento del terreno consente la possibilità di realizzare fondazioni superficiali standard in luogo di fondazioni profonde. Un altro vantaggio è la massima compatibilità della tecnica con l'Ambiente in quanto vengono utilizzati materiali naturali senza asportazione di terreno in sito (solo minime quantità vengono rimosse nel corso dell'esecuzione). I principali vantaggi delle colonne in ghiaia Vibrocompattate sono:

- Riduzione dei cedimenti
- Incremento della capacità portante, con conseguente possibilità di riduzione delle dimensioni delle fondazioni
- Incremento dei moduli elastici del terreno
- Incremento della resistenza al taglio
- Rapida dissipazione delle sovrappressioni
- Mitigazione del rischio di liquefazione
- Possibilità di utilizzare fondazioni di tipo superficiale

Nelle successive fasi progettuali dovranno essere condotte indagini integrative finalizzate a valutare in dettaglio le caratteristiche di resistenza e deformabilità dei terreni di fondazione, in special modo nei tratti in cui i rilevati presentano le altezze maggiori, per poter valutare in dettaglio l'entità dei cedimenti ed il loro decorso nel tempo.

Le sezioni in trincea saranno realizzate mediante scavo ed asportazione del materiale in situ, fino alle quote del piano di fondazione della piattaforma ferroviaria. La pendenza delle scarpate è stata definita sulla base delle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati dagli scavi ed in funzione dell'altezza della scarpata; gli scavi realizzati nella formazione di Lentini verranno realizzati con pendenza $\frac{1}{2}$.

Di norma le scarpate delle trincee verranno interrotte con una banca larga 2 m ogni 5 m di altezza. Ove necessario, lungo lo sviluppo del tracciato verranno realizzati muri di sostegno e paratie per permettere la profilatura delle scarpate e limitare l'impatto ambientale sul territorio interessato. Per il controllo dell'erosione superficiale, le scarpate realizzate nei terreni sciolti, verranno protette mediante geostuoie e biostuoie, eventualmente rinforzate con reti metalliche e rinverdite con specie autoctone (cespugli ed arbusti) mediante idrosemina.

Lungo il tracciato sono presenti fenomeni gravitativi di versante di estensione limitata, per lo più riconducibili a soliflussi o deformazioni viscosi (creep) delle coltri eluvio-colluviali, i quali coinvolgono spessori di terreno ridotti e sono di carattere superficiale. La mitigazione di tali fenomeni sarà eseguita mediante la realizzazione di trincee drenanti.

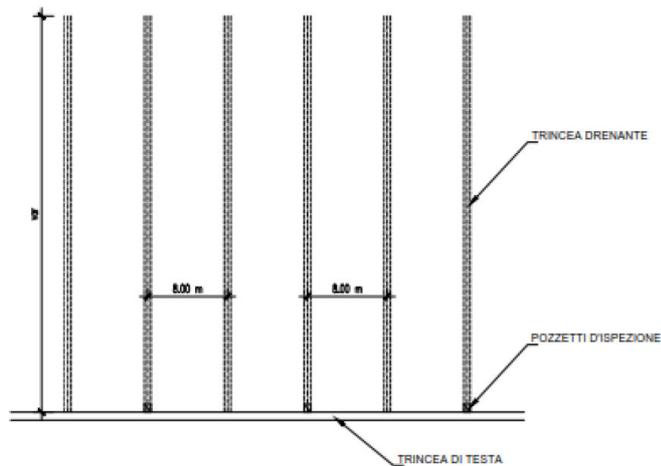
Le trincee drenanti sono utilizzate per migliorare le condizioni di stabilità del versante attraverso la riduzione delle pressioni interstiziali e, dunque, l'incremento della resistenza a taglio lungo le potenziali superfici di scorrimento.

Le trincee presentano un'altezza massima di 5 m e sono disposte ad interasse di 8 m. Lo scavo viene rivestito con un geotessile con funzione di filtro, mentre alla base della trincea viene posto un tubo

microfessurato in PVC, anch'esso rivestito con geotessile. La distribuzione in pianta degli interventi previsti, nonché l'area oggetto dell'intervento, è riportata nell'elaborato RS6201R11WZGE0006001B.

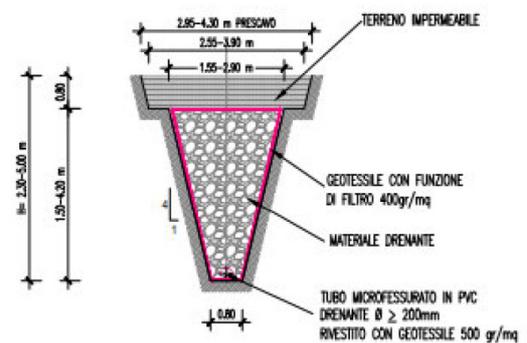
SCHEMATICO DISPOSIZIONE PLANIMETRICA

Scala 1:400



SEZIONE TIPOLOGICA

Scala 1:10



NOTA: Le trincee sono disposte ad interasse di 8.00 m

13 OPERE GEOTECNICHE PRINCIPALI

Nella tabella seguente sono riassunte le principali opere geotecniche previste lungo il tracciato ferroviario del presente progetto di fattibilità.

| Pk inizio | Pk fine | Opera** | L (m) |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|
| 0+000.00 (Presa e consegna) | 0+080 (Presa e consegna) | Muro su pali P2 | 80 |
| 0+225.00 (Presa e consegna) | 0+325.00 (Presa e consegna) | Paratia di pali T1 | 100 |
| 0+140.00 (Presa e consegna) | 0+225.00 (Presa e consegna) | Muro su pali P1 | 85 |
| 0+025.00 (Presa e consegna) | 0+200.00 (Presa e consegna) | Paratia di micropali a cavalletto | 175 |
| 0+650.00 (Presa e consegna) | 0+900.00 (Presa e consegna) | Paratia di pali T1 | 250 |
| 0+090.00 (Binario Piazzale) | 0+160.00 (Binario Piazzale) | Paratia di pali T1 | 70 |
| 0+310.00 (Binario Piazzale) | 0+500.00 (Binario Piazzale) | Paratia di pali T1 | 190 |
| 0+650.00 (Binario Piazzale) | 0+800.00 (Binario Piazzale) | Paratia di pali T1 | 150 |
| 0+500.00 (Binario Piazzale) | 0+650.00 (Binario Piazzale) | Paratia di pali T2 | 150 |
| 0+475 (Presa e consegna) | 0+650 (Presa e consegna) | Galleria artificiale | 175 |
| 0+765 (Presa e consegna) | 0+275 (Binario Piazzale) | Muro di sottoscarpa | 295 |

** Per maggiori dettagli sulle opere si rimanda agli elaborati specialistici RS6201R11WBMU000001B e RS6201R11PZGA010001A.

14 MONITORAGGIO GEOTECNICO

Per le aree interessate dai lavori relativi al collegamento al porto di Augusta in relazione alle diverse tipologie di opere presenti (rilevati, scatolari, trincee, opere di sostegno, scavalco stradale, ecc..) e alle interferenze con strutture esistenti è stata prevista l'installazione di un'appropriata strumentazione e la misura delle grandezze fisiche significative, quali spostamenti, tensioni, forze e pressioni interstiziali - prima, durante e/o dopo la costruzione delle opere previste in progetto.

In particolare, il sistema di monitoraggio verrà così articolato:

1. Monitoraggio delle opere di sostegno e del terreno in prossimità dell'area di scavo;
2. Monitoraggio dei binari vicini alle nuove opere;
3. Monitoraggio dei versanti in condizioni geomorfologiche critiche
4. Monitoraggio dei cedimenti dei rilevati e del loro decorso nel tempo

14.1 MONITORAGGIO DELLE OPERE DI SOSTEGNO IN COSTRUZIONE E DEL TERRENO A TERGO DELL'AREA DI SCAVO

Al fine di monitorare eventuali movimenti delle paratie e cedimenti del terreno a tergo dell'area di scavo verrà predisposto un apposito schema di misure in grado di valutare le seguenti grandezze:

- cedimenti delle paratie;
- pressione dell'acqua interstiziale;
- spostamenti verticali del terreno in prossimità della paratia;
- spostamenti orizzontali delle paratie;
- spostamenti nelle strutture preesistenti.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Per il monitoraggio di queste opere è stata prevista la realizzazione di sezioni strumentate in corrispondenza delle quali predisporre la strumentazione sia in corrispondenza delle opere sia sul terreno a tergo delle stesse.

In corrispondenza delle sezioni strumentate verranno utilizzate le tipologie di strumenti di seguito elencate:

- capisaldi per il livellamento manuale di precisione (cedimenti del terreno)
- mire ottiche (miniprismi) per monitoraggio topografico (spostamenti diaframmi)
- piezometri elettrici (pressioni interstiziali del terreno)
- inclinometri (spostamenti orizzontali)

Gran parte degli strumenti saranno installati prima dell'inizio delle operazioni di scavo, al fine di poter ottenere una serie di almeno 4 letture di zero per ogni strumento, che serviranno come valori di riscontro per le misure successive. Le letture di zero di tali strumenti saranno eseguite, per gli strumenti che lo consentono, immediatamente dopo l'installazione; per gli strumenti che prevedono l'uso di resine o cemento, la lettura di zero sarà eseguita non appena tali sistemi di ancoraggio avranno fatto completamente presa.

14.2 MISURA DELLE DEFORMAZIONI DEI BINARI

Il sistema di monitoraggio previsto ha lo scopo di controllare la "qualità geometrica" dei binari ferroviari vicini alle opere ed agli scavi previsti in area sud e nord.

Verranno determinate le seguenti grandezze:

- cedimenti
- Sghembo "g"

Le misure realizzate, da confrontare con i limiti imposti dall'Istruzione, sono comprensive dei seguenti contributi:

- deformazioni eventualmente già presenti sul binario prima dell'intervento

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

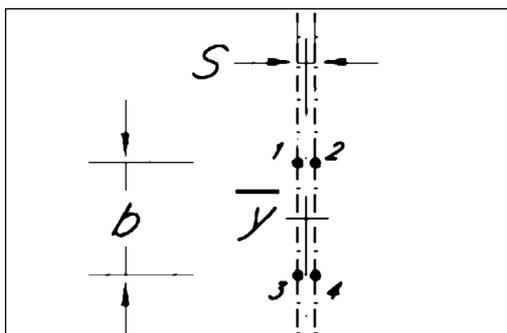
- deformazioni indotte dalle deformazioni delle opere di sostegno.

Stima dello Sghembo

Il parametro viene definito nel seguente modo:

Sghembo “ γ ”: è l’inclinazione espressa in ‰ relativa di una fila di rotaia rispetto all’altra, calcolata come rapporto tra la differenza di livello trasversale XL⁽¹⁾ fra due sezioni di binario poste ad una distanza data, che è la base di misura dello sghembo, e la base stessa.

Considerando i cedimenti verticali C del piano campagna, la stima dello sghembo si ottiene con la seguente formula:



I valori limite dei parametri considerati sono quelli che comportano vincoli all’esercizio ferroviario, in conformità a quanto riportato nell’Istruzione Tecnica RFI (RFI TCAR ST AR 01 001 D “Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h” e relativi allegati). Le interferenze che si considerano non ammissibili sono quelle per le quali risulta da istituire l’interruzione della circolazione.

Per il monitoraggio dei binari si prevede la lettura dei spostamenti verticali di punti posizionati sulla rotaia ad una interdistanza di 3,00 m, contrassegnati in modo indelebile.

Alla fine di ogni sessione di misura verrà costruito il grafico dell’andamento altimetrico delle rotaie ed i valori dello sghembo.

¹ Differenza di livello trasversale “XL”: è la differenza di quota di una rotaia rispetto all’altra in una sezione di binario.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Il parametri geometrici oggetto di monitoraggio saranno:

- Cedimenti
- Sghembo su 3m;
- sghembo su 9 m;

Frequenza dei rilevamenti

Verrà eseguita una lettura iniziale per valutare le condizioni attuali di qualità geometrica del binario.

Durante l'esecuzione dei lavori, il monitoraggio del binario verrà attivato solo nel caso in cui gli spostamenti delle paratie e dei capisaldi più vicini al binario dovessero superare i valori identificati come soglia di attenzione.

La frequenza delle letture sarà definita in base agli spostamenti rilevati dalle misure di livellazione superficiale del piano campagna dei capisaldi più vicini al binario.

Tutti i dati di misura saranno validati giornalmente dall'analista preposto al controllo dei dati.

Le letture verranno eseguite da personale abilitato alla protezione cantiere; non risulta pertanto necessaria la scorta di personale ferroviario.

14.3 MONITORAGGIO DEI VERSANTI INTERESSATI DA FENOMENI DI DISSESTO

Per tutte le aree interessate dai dissesti analizzati nei paragrafi precedenti, è prevista l'installazione di una specifica strumentazione finalizzata al monitoraggio dell'evoluzione dei movimenti franosi e degli effetti sulle opere di nuova realizzazione.

La scelta della strumentazione da installare è dettata dai parametri che si intendono monitorare. In particolare nella tabella seguente vengono riportate le grandezze da misurare la strumentazione prevista.

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

Tabella 14-1 Grandezze da misurare e strumentazione prevista

| | Grandezza da misurare | Strumentazione prevista |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| <i>Regime idraulico</i> | Misura di pressioni interstiziali | Celle di Casagrande |
| <i>Profilo degli spostamenti</i> | Spostamenti dei versanti | Inclinometri |
| <i>Spostamenti plano-altimetrici</i> | Spostamenti dei versanti | Microprismi |
| <i>Comportamento delle strutture (paratie, pozzi*, viadotti**)</i> | Spostamenti della struttura | Microprismi, inclinometri |

**n.3 microprismi a pozzo, ** n. 4 microprismi per spalle e pile.*

Per le aree in frana, oltre agli strumenti classici (inclinometri, piezometri, capisaldi, mire), si potrà prevedere

l'utilizzo di:

- stazione pluviometrica;
- stazione topografica robotizzata;
- interferometro terrestre;
- interferometria satellitare;
- laser scanner;
- sistema inclinometrico automatico, per il controllo modulare in profondità.

Gli strumenti di monitoraggio dovranno essere installati:

| | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------|-------------------|------------------------|-----------|
|  ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA CATANIA-SIRACUSA COLLEGAMENTO FERROVIARIO CON IL PORTO DI AUGUSTA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA | | | | | |
| | RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE | COMMESSA RS62 | LOTTO 00 | CODIFICA R11RG | DOCUMENTO GE0006001 | REV. B |

- all'esterno, almeno tre mesi prima dell'inizio dei lavori in modo da poter acquisire un numero di dati significativi ai fini della valutazione della situazione "ante-opera";
- all'interno delle parti componenti l'opera (paratia, rivestimento provvisorio, rivestimento definitivo, ecc.), durante le fasi realizzative.

14.4 MONITORAGGIO DEI RILEVATI

Il monitoraggio dei rilevati previsti in progetto prevede misure di:

- cedimenti del rilevato e del piano campagna;
- cedimenti differenziali all'interno del terreno di fondazione;
- pressioni interstiziali;

La strumentazione per il rilievo delle grandezze sopra riportate è costituita da: capisaldi di superficie, celle piezometriche e assestimetri sia superficiali che profondi.

I cedimenti del piano di posa del rilevato saranno misurati attraverso assestimetri a piastra. Alla base della piastra è collegata l'asta di misura, protetta quest'ultima da un fodero isolato dalla piastra per mezzo di un manicotto elastico.

Il piano di appoggio della piastra sarà realizzato da un letto di calcestruzzo magro (sp. 10cm) che consenta di mettere in piano la piastra e quindi perfettamente verticale l'asta.

A protezione dell'asta assestimetrica durante la costruzione del rilevato si porrà l'assestometro all'interno di un tubo di calcestruzzo in grado di assorbire le eventuali spinte della terra mossa e costipata dai mezzi o dai piccoli urti delle macchine in movimento. Il tubo di calcestruzzo sarà estratto un po' per volta con il progredire della costruzione del rilevato.

I movimenti della base dell'assestometro sono misurati applicando in testa a questo una piccola stadia di riferimento.

Il sistema di acquisizione dati è costituito da una stazione composta da teodolite e distanziometro elettronico che misurano le posizioni assolute della base di misura rispetto a un sistema di riferimento tridimensionale costituito da capisaldi.

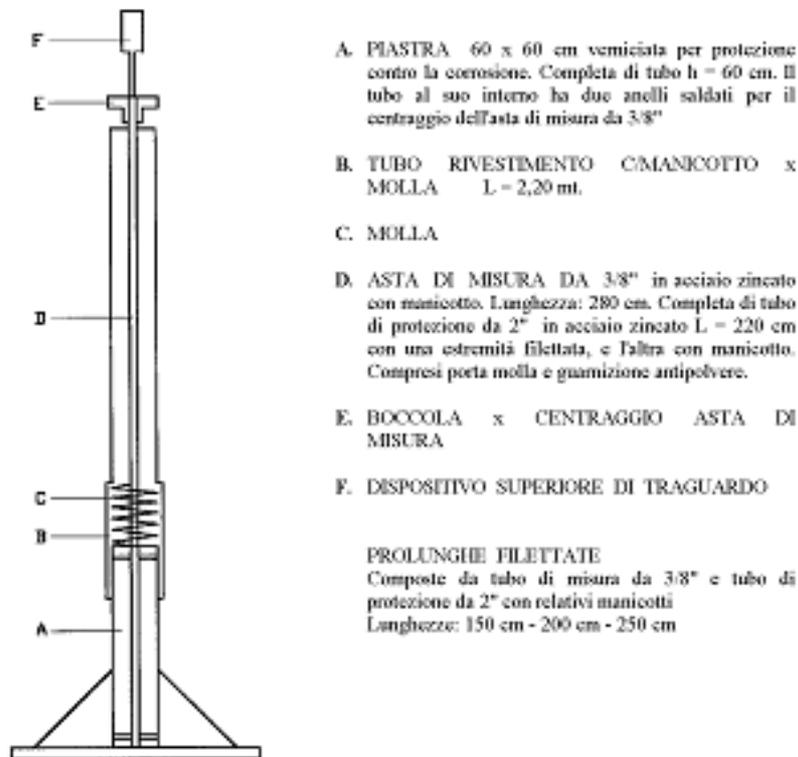


Figura 14-1 Immagine rappresentative di assestimetri a piastra

14.5 CEDIMENTI DEL PIANO CAMPAGNA E DELLA SOMMITÀ DEL RILEVATO

Il rilevamento dei cedimenti superficiali del piano campagna e della sommità del rilevato avverranno attraverso battuta topografica. Il rilievo avverrà tramite lettura della stadia appoggiata in un pozzetto appositamente realizzato in opera nel punto di misura. Tale pozzetto presenterà idoneo coperchio in cls e un tubo in pvc di altezza minima di 1.0m. Il pozzetto sarà collegato a una barra d'acciaio ad aderenza migliorata infissa nel terreno per almeno 1.0m così come mostrato in Figura 14-2.

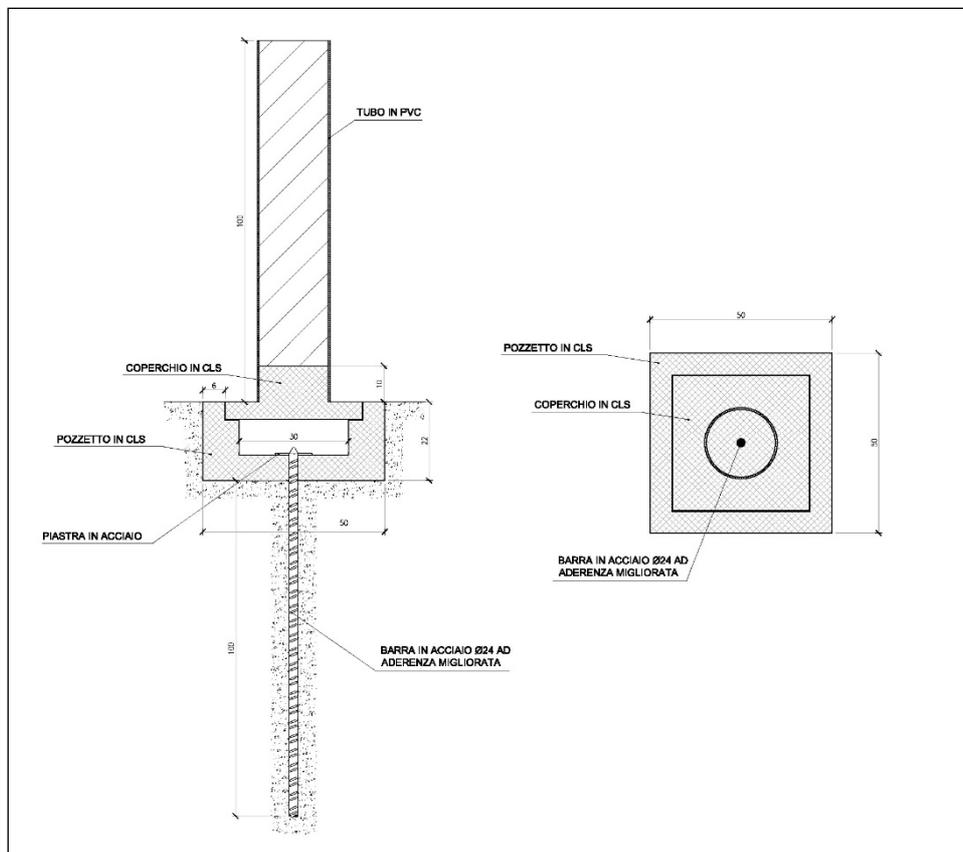


Figura 14-2 Pozzetto tipo per l'alloggiamento della stadia per la livellazione superficiale

Il sistema di acquisizione dati è costituito da una stazione composta da teodolite e distanziometro elettronico che misurano le posizioni assolute della base di misura rispetto a un sistema di riferimento tridimensionale.

Dall'elaborazione dei dati si ricaveranno i grafici dell'evoluzione di cedimenti e spostamenti orizzontali in funzione del tempo.

14.6 CEDIMENTI VERTICALI NEL TERRENO DI FONDAZIONE

Cedimenti verticali profondi nel terreno di fondazione del rilevato saranno rilevati attraverso assestimetri magnetici verticali. Tale strumento è costituito da un'asta, opportunamente svincolata dagli attriti con il terreno, attorno alla quale sono installati anelli magnetizzati che costituiscono i punti di misura. Il terreno soggetto a cedimento trascina con sé gli anelli ad esso ancorati. La misura consiste nel rilievo dell'approfondimento degli anelli rispetto alla testa della colonna. Lo strumento di lettura è costituito da una sonda dotata di cavo millimetrato e di un puntale/interruttore azionato dal campo magnetico creato dagli anelli.

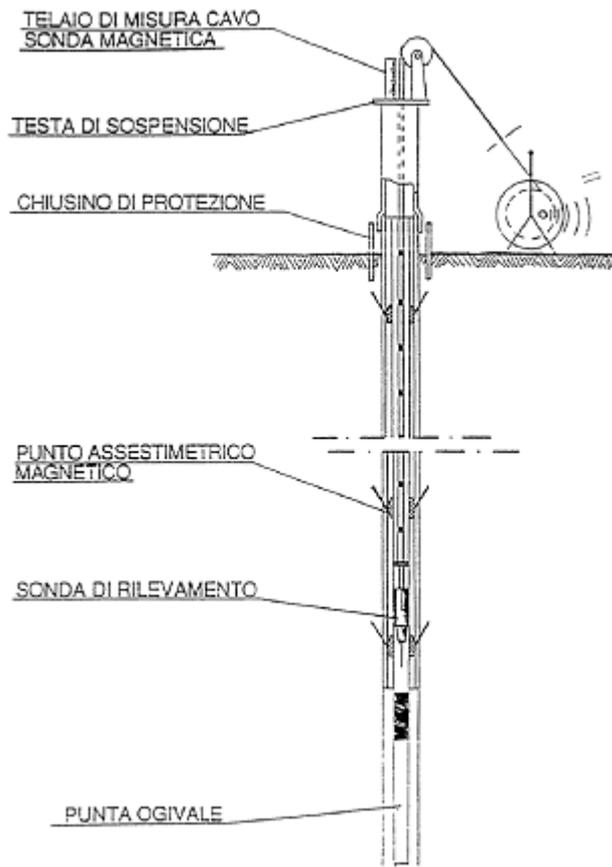


Figura 14-3 Assesti metro magnetico verticale tipo

14.7 PRESSIONI INTERSTIZIALI

Celle piezometriche saranno installate in perforazioni verticali realizzate a distruzione di nucleo. Le perforazioni avranno profondità di circa 10m all'interno del quale saranno alloggiati 2 celle piezometriche. Le caratteristiche delle celle dovranno essere adatte a misure piezometriche in terreni a bassa permeabilità ($k=1 \times 10^{-7} \div 1 \times 10^{-9} \text{m/s}$).

Al termine della procedura di una corretta installazione delle celle nel foro di perforazione (secondo indicazioni del fornitore), si dovrà verificare con una o più letture il funzionamento dello strumento installato.

Il cavo delle celle piezometriche dovrà essere portato al di fuori dal rilevato infossato in una trincea precedentemente preparata a partire dal foro di installazione. Alla base della trincea sarà posato un letto di sabbia (sp. 20cm) in cui verrà adagiato il cavo con andamento sinusoidale.

Terminate tutte le operazioni di installazione della cella piezometrica si provvederà a proteggere il terminale del cavo in attesa di una definitiva centralizzazione.

Il sistema di acquisizione dati potrà essere costituito da una centralina dotata di memoria. I dati saranno periodicamente riversati su PC per la loro elaborazione.