

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



CUP J74J22000170001

DIREZIONE TECNICA

S.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA CENTRO

PROGETTO DEFINITIVO

Elettrificazione Linea Cagliari-Oristano

Elaborati sottostazioni

SSE Cagliari – Relazione Geotecnica Piazzale

SCALA:

-

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

RR0S 00 D 29 GE GE0100 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	M.Trezzi	Giu. 2022	P.Venditto	Giu. 2022	P.Manna	Giu. 2022	F.Arduini Giugno 2022
								ITALFERR S.p.A. Direzione Tecnica Infrastrutture Centro Dott. Ing. Fabrizio Arduini Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma n. 10962 del 4/4

File: RR0S00D29GE0100001A

n. Elab.:

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	5
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1	NORME.....	6
2.2	DOCUMENTI DI PROGETTO.....	7
2.3	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	7
3	DESCRIZIONE DELLE OPERE E INQUADRAMENTO DEL SITO.....	10
4	INQUADRAMENTO DEL SITO.....	11
5	INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	12
5.1	SONDAGGI E PROVE IN SITO.....	12
5.2	PROVE DI LABORATORIO.....	14
6	CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO.....	15
6.1	RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	15
6.1.1	<i>Categorie di sottosuolo.....</i>	16
6.1.2	<i>Condizioni topografiche.....</i>	17
6.1.3	<i>Accelerazione massima a_{max}.....</i>	18
6.1.4	<i>Verifica della liquefazione.....</i>	18
7	CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	19
7.1	TERRENI A GRANA GROSSA.....	19
7.1.1	<i>Valutazione della densità relativa da prove SPT.....</i>	20
7.1.1.1	<i>Interpretazione delle prove SPT in sabbie.....</i>	20
7.1.1.2	<i>Interpretazione delle prove SPT in ghiaie sabbiose.....</i>	21
7.1.2	<i>Valutazione dell'angolo d'attrito da prove SPT.....</i>	23

7.1.3	<i>Valutazione delle caratteristiche di deformabilità da prove SPT</i>	25
7.1.4	<i>Moduli elastici "operativi"</i>	26
8	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	28
8.1	STRATIGRAFIA	28
8.2	FALDA ACQUIFERA	29
8.3	INTERPRETAZIONE DELLE PROVE IN SITO	30
8.3.1	<i>Caratteristiche fisiche</i>	30
8.3.2	<i>Resistenza al taglio in condizioni di tensioni efficaci</i>	32
8.3.3	<i>Velocità delle onde di taglio e caratteristiche di deformabilità</i>	33
8.3.4	<i>Velocità delle onde di corpo</i>	36
8.4	INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI LABORATORIO	38
8.4.1	<i>Caratteristiche fisiche</i>	38
8.4.2	<i>Caratteristiche di resistenza al taglio non drenata e in termini di sforzi efficaci</i>	45
8.5	CARATTERISTICHE DI CONDUCIBILITÀ IDRAULICA	46
9	MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO	48
9.1	PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI DEI MATERIALI	48
10	PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI FONDAZIONE	49
10.1	TIPOLOGIA DI FONDAZIONE	49
10.2	CAPACITÀ PORTANTE	50
10.2.1	<i>Metodologia</i>	50
10.2.2	<i>Risultati</i>	52
10.3	CALCOLO DEI CEDIMENTI	54

10.3.1	Metodologia	54
10.3.2	Risultati	54
10.4	MODULO DI REAZIONE DI SOTTOFONDO.....	55
10.4.1	Metodologia	55
10.4.2	Risultati	57

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito del servizio di progettazione per l'Elettrificazione della linea Cagliari-Oristano, nella Regione Sardegna, è prevista la realizzazione di n°5 sottostazioni elettriche di Media Tensione (Stazioni di Cagliari, Decimomannu, San Gavino, Marrubiu e Oristano), e n°1 stazione di Alta Tensione (Stazione di Villasor). In questa sede si fa riferimento alla sottostazione elettrica la cui realizzazione è prevista presso la Stazione di Cagliari. L'opera prevede di realizzare una struttura intelaiata in cemento armato tale da svilupparsi su un solo piano fuori terra. Date le esigue pressioni scaricate sui terreni e le buone caratteristiche degli stessi, l'opera verrà fondata su di un reticolo di travi rovesce.

Lo scopo della presente relazione geotecnica è quello di definire il modello geotecnico per le aree interessate dagli interventi in progetto e valutare la capacità portante per alcune fondazioni tipologiche aventi dimensioni plausibili per la tipologia di struttura in progetto.

Il modello geotecnico di calcolo è stato definito sulla base delle risultanze della campagna d'indagini svoltasi nel mese di Dicembre del 2021 e nel mese di aprile del 2022, le quali hanno previsto lo svolgimento di test in sito e di laboratorio.

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Norme

- [1] D.M. 17/01/2018 “Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»”
- [2] “Circolare Applicativa delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni approvate con D.M. 17 gennaio 2018”
- [3] RFI DTC SI MA IFS 001 E del 31.12.2020 - “Manuale Di Progettazione Delle Opere Civili”
- [4] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”
- [5] RFI DTC SI SP IFS 001 E del 31.12.2020 - Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi”– RFI
- [6] 2008/217/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità (20/12/2007)”
- [7] 2011/275/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale (26/04/2011)”
- [8] UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [9] UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
- [10] AGI (1977) Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche
- [11] AGI (2005) Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica. Linee guida.
- [12] Regolamento (UE) N° 1299/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell’Unione europea, modificato dal Regolamento di esecuzione (UE) N° 776/2019 della Commissione del 16 maggio 2019
- [13] Regolamento (UE) N. 1300/2014 della Commissione del 18 novembre 2014 relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per l’accessibilità del sistema ferroviario dell’Unione europea per le persone con disabilità e le persone a mobilità ridotta, modificato con il Regolamento di esecuzione (UE) N° 772/2019 della Commissione del 16 maggio 2019
- [14] Regolamento di Esecuzione (UE) 776/2019 della Commissione del 16 maggio 2019 che modifica i regolamenti (UE) n. 321/2013, (UE) n. 1299/2014, (UE) n. 1301/2014, (UE) n. 1302/2014, (UE) n. 1303/2014 e (UE) 2016/919 della Commissione e la decisione di esecuzione 2011/665/UE della Commissione per quanto riguarda l'allineamento alla direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

europeo e del Consiglio e l'attuazione di obiettivi specifici stabiliti nella decisione delegata (UE) 2017/1474 della Commissione

- [15] Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/772 DELLA COMMISSIONE del 16 maggio 2019 che modifica il regolamento (UE) n. 1300/2014 per quanto riguarda l'inventario delle attività al fine di individuare le barriere all'accessibilità, fornire informazioni agli utenti e monitorare e valutare i progressi compiuti in materia di accessibilità
- [16] UNI 11104:2016 – “Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206”
- [17] UNI EN 206-1-2021: Calcestruzzo. “Specificazione, prestazione, produzione e conformità”

2.2 Documenti di progetto

- [18] Relazione geologica RR0S00D69RGGE0001001A – “Relazione Geologica”
- [19] RR0S00D69L6GE0001001A – “Carta Geologica e Profilo Geologico SSE Cagliari”
- [20] RR0S00D69L6GE0002001A – “Carta Idrogeologica e Profilo Idrogeologico SSE Cagliari”
- [21] RR0S00D29F9GE0100001A – “SSE Cagliari – Plano-Profilo Geotecnico”

2.3 Riferimenti bibliografici

- [22] Atkinson, J.H. (2000). “Non-linear soil stiffness in routine design”. *Géotechnique*, vol. 50(5), pp. 487-508
- [23] Bazaraa, A. R. (1967). “Use of the standard penetration test for estimating settlements of shallow foundations on sand”. Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Champaign-Urbana
- [24] Bolton, M.D. (1986). “The strength and dilatancy of sands”. *Géotechnique*, vol. 36(1), pp. 65-78
- [25] Brinch-Hansen (1970), “A revised and extended formula for bearing capacity”. Bull.n.28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen
- [26] Boussinesq M.J. (1885), “Applications des Potentiels a l'Étude de l'Équilibre et du Mouvement des Solides Élastiques”, Gauthier-Villars, Paris.
- [27] Bowles Joseph E. (1960), *Foundation Analysis and Design*. McGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY.
- [28] Cestari F. “Prove Geotecniche in sito” ed. GEO-GRAPH s.n.c. 1990
- [29] Clayton C.R.I. (1995) “The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use” CIRIA Report n° 143,
- [30] Cubrinowski, M., Ishihara, K. (1999). “Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils”. *Soils and Foundations*, vol. 39(5), pp. 61-71

- [31] Florin V.A. (1959), "Oshovi Mekaniki Gruntov", Moscow.
- [32] Fraser R.A., Wardle L.J., 1976. "Numerical Analysis of Rectangular Rafts on Layered Foundation. Geotechnique, vol.26, n.4, pp.613-630
- [33] Gibbs, H. J., Holtz, W. G. (1957). "Research on determining the density of sands by spoon penetration testing". Proc. 4th ICSMFE, London, vol. 1, pp. 35-39
- [34] Hatanaka, M., Uchida A. (1996). "Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. Soils and foundations, vol. 36, n.4, 1-9, Dicembre, Japanese Geotechnical Society.
- [35] Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y., Kamada, K. (2001). "Recent studies on liquefaction resistance of sand: Effect of saturation". Proc. 4th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego
- [36] Jaky, J. 1944. "The coefficient of earth pressure at rest. In Hungarian A nyugalmi nyomás tenyezöje." J. Soc. Hung. Eng. Arch. (Magyar Mernök és Építész-Egylet Közönlöye), 355–358.
- [37] Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E. (1988) "New correlations of penetration tests for design practice" Proceedings of I International Symposium on Penetration Testing, ISOPT I, Orlando.
- [38] Lancellotta R. (1991), "Geotecnica", Edizioni Zanichelli.
- [39] Meyerhof G.G. (1957), "Discussion on research on determining the density of sands by spoon penetration testing". Proc 4th int. conf. soil mechanics and foundation engineering, London, Vol. 3, p. 110
- [40] Meyerhof GG (1963) Some recent research on the bearing capacity of foundations. Can Geotech J 1(1):16–26
- [41] Meyerhof G.G. (1963), "The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads". Proc. III ICSMFE, Zurich, Vol.1
- [42] Ohsaki, Y. & Iwasaki, R. 1973. Dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits. Soils and Foundations, 13(4):61-73.
- [43] Ohta, Y., Goto, N. (1978). "Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 6(2), pp. 167-187
- [44] Poulos H.G., Davis E.H. (1974). "Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics". U.S.A., John Wiley & Sons, Inc.
- [45] Schmertmann J.H. (1978), "Guidelines for cone penetration test performance and design, Report n. 78-209. U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C.

- [46] Seed, H.B.; Idriss, I.M.; Arango, I. (1983) Evaluation of liquefaction potential using field performance data. Journal of Geotechnical Engineering, v. 109:3, p. 458- 482
- [47] Selavadurai, A. P. S. (1979), "The displacements of a rigid circular foundation anchored to an isotropic elastic half-space", Geotechnique
- [48] Skempton, A.W. (1986). "Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation". Géotechnique, vol. 36(3), pp. 425-447
- [49] Stroud, M.A. (1989). "The Standard Penetration Test – Its application and interpretation". Proceedings of the geotechnology conference "Penetration testing in the UK" organized by the Institution of Civil Engineers, Birmingham.
- [50] Vesic, A.B. (1963) Beams on Elastic Subgrade and the Winkler's Hypothesis. Proceedings of the 5th International Conference of Soil Mechanics, 845-850.
- [51] Vesic A.S., 1973. "Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 121-147

3 DESCRIZIONE DELLE OPERE E INQUADRAMENTO DEL SITO

L'intervento in progetto prevede la realizzazione di una sottostazione elettrica nei pressi della Stazione di Cagliari (Figura 3-1). Il progetto prevede la costruzione di una struttura intelaiata in cemento armato tale da svilupparsi su un solo piano fuori terra. Date le esigue pressioni scaricate sui terreni e le buone caratteristiche degli stessi, l'opera verrà fondata su di un reticolo di travi rovesce, per maggiori dettagli si rimanda al §10.1.

In questa sede ci si limiterà alla definizione del modello geotecnico e delle "linee guida" per la progettazione delle opere di fondazione, in seguito verranno infatti definiti i valori di resistenza di progetto nei confronti della capacità portante, di cedimento e di reazione di sottofondo per fondazioni superficiali dalle dimensioni ritenute plausibili per le opere in progetto.

Per maggiori approfondimenti sulle geometrie delle diverse parti dell'opera si rimanda agli elaborati grafici di progetto.

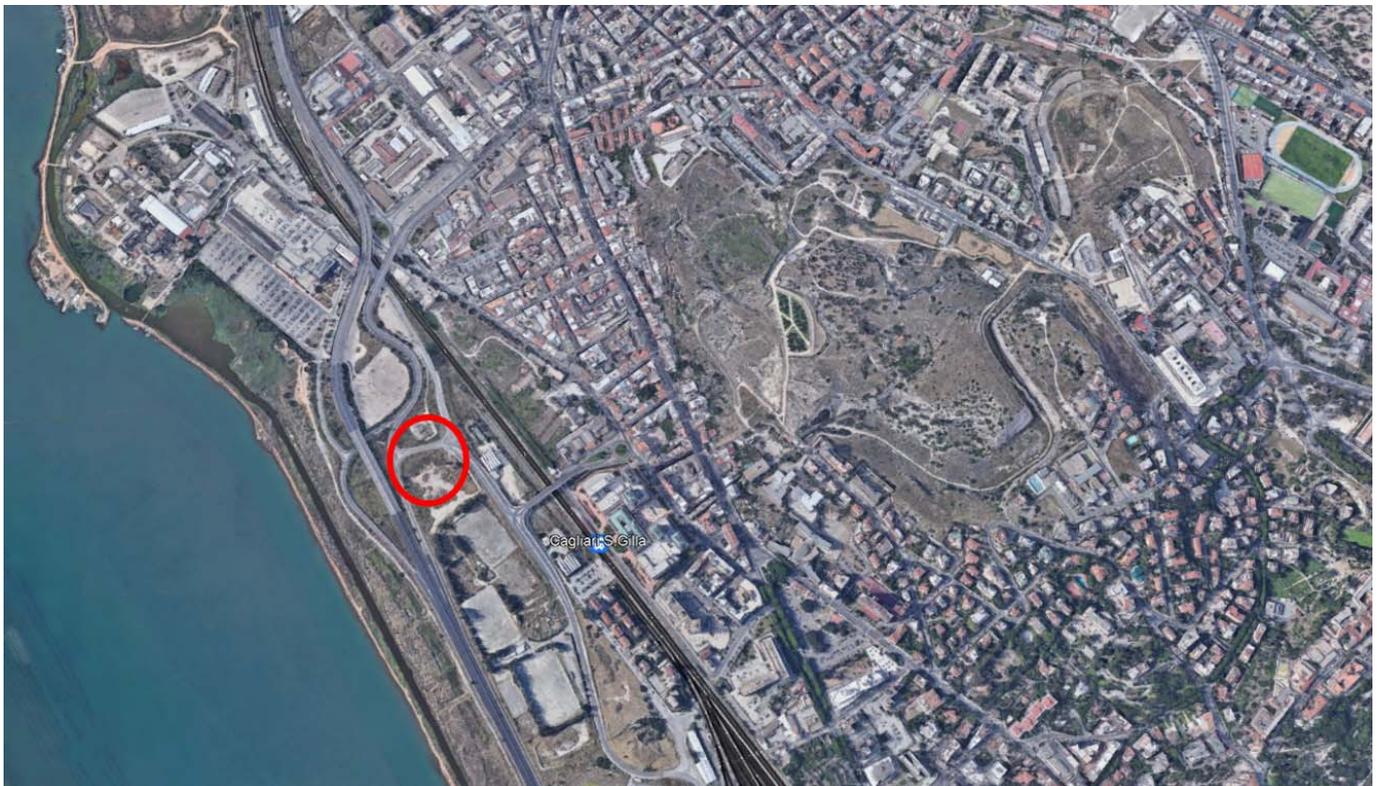


Figura 3-1 - Ubicazione geografica

4 INQUADRAMENTO DEL SITO

La realizzazione della sottostazione elettrica Cagliari è prevista in corrispondenza di un'area posta in corrispondenza della pk 2+188 c.ca della linea CA-OR alla quota topografica di di circa 5,0 m s.l.m..

In accordo alle risultanze della campagna d'indagini e con riferimento alla sezione geologica [18], alla quale si rimanda per ulteriori dettagli, le facies presenti in sito risultano essere (Figura 4-1):

- Riporto;
- Facies B - Facies ghiaioso-sabbiosa;
- Facies C – Substrato litoide (Arenaria di Pirri).

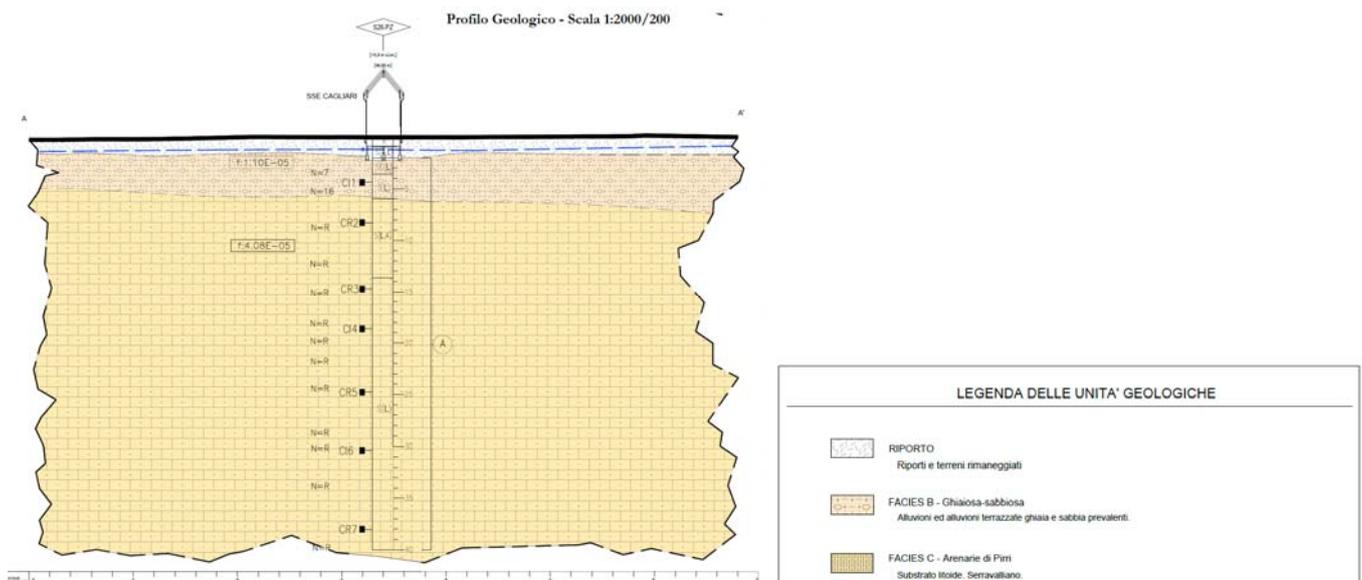


Figura 4-1 – Estratto della sezione geologica (Doc. Rif. [18])

Dal punto di vista sismico la zona d'interesse risulta essere classificata come Zona 4 (Figura 4-2), ovvero caratterizzata da bassissima sismicità.

Zona	Valore di a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

Figura 4-2 – Classificazione sismica e valori di a_g

5 INDAGINI GEOGNOSTICHE

In prossimità dell'area interessata dall'intervento è stata svolta una campagna d'indagini nel Dicembre 2021. A causa del nuovo posizionamento previsto per la realizzazione dell'opera, nel mese di Aprile del 2022 è stata svolta una campagna d'indagini integrativa con il preciso scopo di ricostruire il modello geologico e geotecnico dell' area interessata dall'intervento in progetto.

Le indagini hanno compreso sondaggi a carotaggio continuo, prove in sito (SPT, prove di permeabilità a carico variabile tipo Lefranc, MASW e prove sismiche a rifrazione), e prove di laboratorio (TX-UU, prove di taglio diretto e prove per la determinazione dei parametri fisici dei materiali).

5.1 Sondaggi e prove in sito

Per quanto riguarda l'area d'interesse le indagini e le prove geotecniche in sito sono consistite in:

- n°2 perforazioni (S22 e S26) a carotaggio continuo spinto ad una profondità di 40 m (Ubicazione in Figura 5-1) ;
- n°2 prove SPT svolte circa ogni 3 m all'avanzare delle perforazioni dei sondaggi;
- n°4 prove di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile a 2,8 m e 10,4 m di profondità nei sondaggi S22 e S26;
- n°3 prove geosismiche tipo MASW per la determinazione della categoria sismica del sito;
- n°2 prove sismiche a rifrazione per la determinazione del profilo della velocità delle onde di corpo.



Figura 5-1 – Planimetria con ubicazione delle indagini

Nspt Vs Profondità

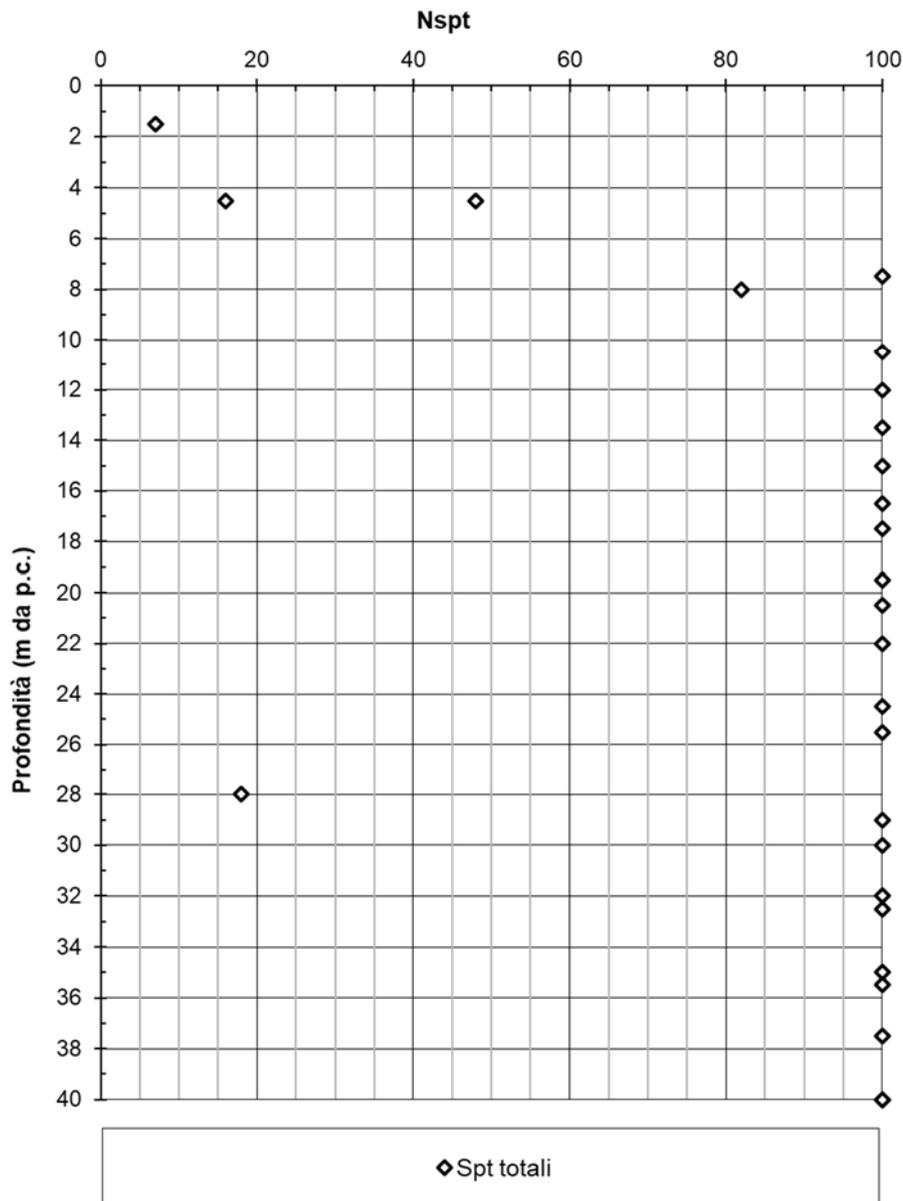


Figura 5-2 – Risultati delle prove penetrometriche dinamiche (SPT) N_{spt}

La Figura 5-2 mostra i risultati delle prove SPT eseguite nei sondaggi S22 ed S27.

L'intervallo di variazione della resistenza dinamica viene di seguito descritto:

- da piano campagna a circa 6 m di profondità in presenza della Facies B (Sabbie e ghiaie), l'intervallo di resistenza alla penetrazione dinamica è tra i 7 colpi/30cm e i 16 colpi/30 cm ;
- da circa 4 m a fondo foro in presenza della Facies C, la prova di resistenza alla penetrazione dinamica mostra rifiuto. Da circa 4 m a 8 m di profondità, la prova svolta nel sondaggio S22 mostra

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

per la Facies C un valore di resistenza alla penetrazione dinamica variabile tra 48 colpi/30cm e 82 colpi/30cm.

5.2 Prove di laboratorio

La campagna d'indagini ha previsto il prelievo di campioni per lo svolgimento di prove di laboratorio, le quali vengono in seguito descritte.

Sui n°10 campioni rimaneggiati prelevati ad una profondità dal piano campagna compresa tra 4 m e 26 m sono state effettuate le analisi granulometriche, su n°1 campione la determinazione delle caratteristiche fisiche e le prove di reattività ad HCl inoltre su n°1 di questi campioni è stata svolta la prova di taglio diretto, la quale non si ritiene possa essere considerata significativa dato il disturbo del campione stesso.

Sui n°3 campioni indisturbati prelevati ad una profondità dal piano campagna compresa tra 4,5 m e 36,5 m sono state svolte le prove seguenti:

- determinazione di contenuto d'acqua naturale, porosità, grado di saturazione, peso dell'unità di volume, peso specifico dei grani;
- determinazione dei limiti di Atterberg della componente fine;
- analisi granulometriche (vagliatura per via umida della frazione superiore al vaglio 0,075 mm e aerometria sulla frazione inferiore);
- n° 1 prove triassiali non consolidate non drenate (Tx-UU);
- n° 2 prove di taglio diretto;
- prove di reattività ad HCl.

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

6 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

Ai sensi della normativa vigente sul territorio nazionale (NTC2018 [1]), le azioni sismiche di progetto devono essere determinate a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito, definita, in funzione delle coordinate geografiche e del periodo di riferimento dell'opera in progetto, in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su suolo rigido con superficie topografica orizzontale.

Il periodo di riferimento (V_R) è ottenuto dal prodotto tra vita nominale (V_N) e coefficiente d'uso (C_U), quest'ultimo dipendente dalla classe d'uso. Essendo:

$V_N \geq 50$ anni (opere ordinarie);

classe d'uso = IV;

coefficiente d'uso = 2,0.

si determina:

$V_R = V_N \cdot C_U$ (periodo di riferimento della costruzione) = 100 anni

Date longitudine ($9^\circ 5'42.90''E$) e latitudine ($39^\circ 13'42.32''N$) del sito vengono definiti i valori dei parametri che definiscono la forma dello spettro di risposta corrispondenti al periodo di riferimento della struttura, per ulteriori dettagli si veda la Relazione Geologica [18].

Tabella 6-1 - Valori dei parametri a_g , F_o e T_c^* relativi al sito di progetto

STATO LIMITE	T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
SLO	60	0,025	2,685	0,299
SLD	101	0,031	2,73	0,307
SLV	949	0,06	2,976	0,371
SLC	1950	0,071	3,061	0,393

6.1 Risposta sismica locale

I valori della accelerazione orizzontale massima definiti secondo quanto esposto al paragrafo precedente devono essere modificati per tenere in conto delle condizioni lito-stratigrafiche e topografiche al sito, in modo che nel calcolo della azione sismica si possano prendere in conto eventuali effetti di amplificazione locale.

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

A questo scopo, la norma introduce il fattore di sito S , funzione sia della categoria di sottosuolo (S_s) sia dell'andamento della superficie topografica (S_T):

$$S = S_s \cdot S_T$$

6.1.1 *Categorie di sottosuolo*

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori delle della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (m/s), definita dall'espressione:

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

essendo:

- H_i : spessore dell' i -esimo strato;
- $V_{s,i}$: 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, caratterizzato da V_s non inferiori a 800 m/s.

In accordo alle NTC2018 per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è da riferirsi al piano di imposta delle stesse. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$, è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

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

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Figura 6-1 – *Categorie del sottosuolo da NTC 2018 [1], tab. 3.2.II*

I risultati di prove geofisiche eseguite nella campagna di indagini 2022 (si veda la Relazione Geologica [18]), permettono di attribuire al sito la **categoria B** di sottosuolo (“Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,39}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s”). Il coefficiente di amplificazione stratigrafica risulta quindi, rispettivamente, $S_s = 1,2$ (SLD) e $S_s = 1,2$ (SLV).

6.1.2 Condizioni topografiche

In accordo alle NTC2018 [1] per condizioni topografiche semplici si può adottare la classificazione riportata in Figura 6-2.

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

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

Figura 6-2 – *Categorie topografiche da NTC2018 [1], tab. 3.2.II*

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

Data la natura pianeggiante dell'area interessata (Categoria T1 in Figura 6-2), il coefficiente di amplificazione topografica è stato posto pari all'unità.

6.1.3 Accelerazione massima a_{max}

Tabella 6-2 – Valori di accelerazione massima attesa al sito

STATO LIMITE	T_R (anni)	a_{max} (g)
SLD	101	0,037
SLV	949	0,072

6.1.4 Verifica della liquefazione

In accordo alle relazione geologica [18], data la bassa sismicità del sito è possibile omettere le verifiche di liquefazione.

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

7 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

I criteri di interpretazione delle indagini finalizzati alla caratterizzazione geotecnica, descritti nei paragrafi seguenti, tengono conto del fatto che nell'area in esame si rinvenivano depositi ghiaiosi e sabbiosi. Pertanto, si distinguerà una sola tipologia di materiale:

- terre a grana grossa (ghiaie e sabbie);

I criteri di interpretazione delle indagini considerano che:

- in presenza di terreni a granulometria prevalentemente sabbioso-ghiaiosa, ove il campionamento indisturbato risulta difficile, si è fatto riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT;
- nei fori di sondaggio sono state effettuate prove per la misura della permeabilità in sito (tipo Lefranc).

Il tipo di materiale, e quindi la scelta del metodo di interpretazione, è individuato principalmente sulla base:

- della descrizione stratigrafica dei sondaggi;
- delle analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati nel corso dei sondaggi.

7.1 Terreni a grana grossa

Poiché nei terreni a grana grossa risulta difficile prelevare campioni indisturbati, la caratterizzazione geotecnica di tali terreni è affidata principalmente all'interpretazione delle prove in sito.

Il comportamento meccanico dei depositi di materiali a grana grossa dipende essenzialmente da:

- storia dello stato tensionale;
- pressioni geostatiche;
- macrostruttura;
- regime delle pressioni interstiziali,

e può essere descritto tramite le seguenti grandezze:

- indice dei vuoti e densità relativa;
- parametri di resistenza e deformabilità;
- permeabilità.

Gli studi a carattere geologico indirizzano la ricostruzione della storia tensionale dei depositi e ne caratterizzano la macrostruttura; quelli idrogeologici ed il monitoraggio geotecnico guidano la valutazione delle pressioni interstiziali.

La valutazione delle caratteristiche meccaniche dei depositi, a partire dal loro grado di addensamento, è condotta mediante l'interpretazione di prove in situ (quali prove penetrometriche dinamiche SPT).

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

7.1.1 Valutazione della densità relativa da prove SPT

In letteratura sono presenti numerose correlazioni che permettono di stimare il valore della densità relativa in funzione dei valori di N_{SPT} , della pressione geostatica verticale efficace σ'_{v0} e del grado di sovraconsolidazione OCR.

Nella presente, in funzione della granulometria prevalente del materiale, si è fatto riferimento alle correlazioni esposte nei paragrafi successivi.

7.1.1.1 Interpretazione delle prove SPT in sabbie

Per la determinazione delle prove SPT in sabbie si è fatto riferimento alle seguenti correlazioni:

- Skempton (1986, [44]);
- Gibbs & Holtz (1957, [33]);
- Bazaraa (1967, [23]);
- Meyerhof (1957, [39]).

In accordo a quanto indicato in Skempton (1986) [48] la densità relativa D_r di sabbie silicee, non cementate può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente legge:

$$D_r = \left(\frac{1}{A+B \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{98.1}} * N_{SPT} \right)^{0.5}$$

essendo:

D_r = densità relativa (-)

A, B = costanti empiriche indicate in Tabella 7-1

$(K_0)_{NC}$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni normalmente consolidati

$(K_0)_{SC}$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni sovraconsolidati

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

N_{SPT} = numero di colpi per 30 cm di infissione

Tabella 7-1 - Costanti empiriche A e B (Skempton, 1986 [48])

Tipo di materiale	A	B
Sabbie fini normalmente consolidate	27,5	27,5
Sabbie grosse normalmente consolidate	43,3	21,7
Sabbie sovraconsolidate	27,5 ÷ 43,3	$(21,7 \div 27,5) \cdot \frac{1 + 2(k_0)_{SC}}{1 + 2(k_0)_{NC}}$

Gibbs e Holtz (1957, [33]) furono i primi a studiare in modo sistematico l'influenza delle tensioni efficaci sul legame fra D_r e N , realizzando delle prove penetrometriche in un grande serbatoio cilindrico (altezza 122 cm, diametro 92 cm), all'interno del quale era stata messa in opera della sabbia di densità nota. La correlazione ottenuta può essere riepilogata mediante la seguente formula:

$$D_r = \left\{ \left[1.5 * \left(\frac{N}{F} \right)^{0.222} \right] - 0.6 \right\}$$

essendo:

$$F = 0.0065 \sigma_{v0}^2 + 1.68 \sigma_{v0} + 14$$

$$\sigma_{v0} = \text{tensione verticale totale espressa in t/m}^2.$$

Bazaraa (1967, [23]) ha mosso una critica alle correlazioni ottenute in laboratorio, osservando che i risultati di prove SPT eseguiti su campioni ricostituiti in laboratorio non fossero rappresentativi dei valori di N che, a parità di densità relativa, si ottengono in sito, per l'esistenza nei depositi naturali di fattori di primaria importanza quali la cementazione, l'invecchiamento (aging), la sotria dello stato tensionale ecc.. Partendo da tale obiezione, Bazaraa è pervenuto alla seguente correlazione:

$$D_r^2 = \frac{N}{20 * (1 + 4.1 \sigma'_{v0})} \quad \text{per } \sigma'_{v0} \leq 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

$$D_r^2 = \frac{N}{20 * (3.24 + 1.024 \sigma'_{v0})} \quad \text{per } \sigma'_{v0} > 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

Meyerhof (1957, [39]) in base alle prove di laboratorio di Gibbs e Holtz ha proposto la seguente correlazione:

$$D_r = 21 * \sqrt{\frac{N}{(\sigma'_v + 0.7)}} \quad \text{con } \sigma'_v \text{ espresso in kg/cm}^2$$

7.1.1.2 Interpretazione delle prove SPT in ghiaie sabbiose

Per terreni con significativo contenuto in ghiaia, la densità relativa (D_R) viene determinata utilizzando il metodo proposto da Cubrinowski & Ishihara (1999) [30], valido per materiali normalmente consolidati,

caratterizzati da un coefficiente di spinta a riposo K_0 dell'ordine di $0.4 \div 0.5$, successivamente esteso da Ishihara et al. (2001) [35] anche al caso dei terreni sovraconsolidati.

Tale metodo utilizza la seguente espressione:

$$D_r = \left[\frac{(N_{SPT})_{78\%} \cdot \left(0.23 + \frac{0.06}{D_{50}}\right)^{1.7}}{9} \cdot \left(\frac{98.1}{\sigma'_{v0}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{k_{0,NC}}{k_{0,SC}}\right)^{0.5} \right]^{0.5}$$

essendo:

D_r = densità relativa (-)

$(N_{SPT})_{78\%}$ = numero di colpi/30 cm associabile ad un'energia trasferita alle aste pari al 78% di quella teorica

D_{50} = diametro delle particelle corrispondente al passante 50% (mm)

σ'_{v0} = pressione verticale efficace geostatica (kPa)

$K_{0,NC}$ = coefficiente di spinta a riposo di terreni normalmente consolidati (-)

$K_{0,SC}$ = coefficiente di spinta a riposo di terreni sovra consolidati (-)

Si rileva che l'espressione sopra indicata è applicabile al caso di:

- energia trasferita alle aste pari al 78%. In Italia tipicamente l'energia trasferita alle aste è inferiore al 78% e pari mediamente al 60%. Nell'applicazione della formula il valore di N_{SPT} misurato, assunto pari a $(N_{SPT})_{60\%}$ viene corretto in base alla seguente relazione:

$$(N_{SPT})_{78\%} = (N_{SPT})_{60\%} \cdot \frac{60}{78}$$

- resistenze ottenute con il campionatore standard nelle sabbie e con il campionatore LPT, di diametro maggiore rispetto a quello standard, nel caso delle ghiaie. Nell'applicazione della relazione precedente nel caso dei terreni sabbioso-ghiaiosi, essendo i risultati disponibili ottenuti con il solo campionatore standard, il valore N_{SPT} misurato, assunto pari a $(N_{SPT})_{60\%}$, è stato modificato adottando la seguente relazione:

$$(N_{SPT})_{78\%} = (N_{SPT})_{60\%} \cdot \frac{60}{78} \cdot C_{NLPT}$$

essendo:

$$C_{NLPT} = 0.56 - 0.084 \cdot \ln(D_{50}) = \text{fattore correttivo per } D_{50} \geq 1 \text{ mm, con } D_{50} \text{ in mm.}$$

7.1.2 Valutazione dell'angolo d'attrito da prove SPT

In letteratura sono presenti numerose correlazioni che permettono di stimare il valore dell'angolo d'attrito in funzione dei valori di N_{SPT} e della pressione geostatica verticale efficace σ_{vo}' .

Nella presente si è fatto riferimento alla seguente correlazione:

- Bolton (1986) [24];
- Hatanaka e Uchida (1996) [34];
- Schmertmann (1975) [45].

Per determinare l'angolo di resistenza al taglio di picco ϕ' , Bolton (1986, [24]) ha proposto la seguente correlazione:

$$\phi' = \phi'_{cv} + m \cdot DI$$

$$DI = D_r \cdot [10 - \ln(p'_f)] - 1$$

essendo:

ϕ' = angolo di resistenza al taglio di picco (°) riferito a pressioni $\sigma'_{ff} = 272 \text{ kPa}$

ϕ'_{cv} = angolo di resistenza al taglio a volume costante, corrispondente a pressioni σ'_{ff} elevate (°)

σ'_{ff} = tensione efficace normale alla superficie di rottura

m = costante empirica funzione delle condizioni di deformazione (Tabella 7-2)

D_r = densità relativa (-)

$p'_f = 1.4 \cdot \sigma'_{ff} = 380 \text{ kPa}$ pressione efficace media a rottura (kPa)

Tabella 7-2 - Valori della costante empirica m secondo Bolton (1986)

Condizioni di rottura	m (-)
Tipo prova triassiale di compressione ($\sigma'_2 = \sigma'_3$)	3
Tipo prova triassiale in estensione o di deformazione piana ($\sigma'_2 \neq \sigma'_3$)	5

σ'_2 = tensione principale efficace intermedia

σ'_3 = tensione principale efficace minore

I valori dell'angolo di resistenza al taglio a volume costante ϕ'_{cv} possono essere ricavati sulla base delle indicazioni di Tabella 7-3.

Tabella 7-3 - Valori di φ'_{cv} per sabbie silicee secondo Stroud (1989) [49]

	Sabbie ben gradate	Sabbie uniformi
Sabbie a spigoli vivi	38°	34°
Sabbie a spigoli arrotondati	33°	30°
ghiaie	35° ÷ 36°	

Nel caso specifico vengono assunti valori di φ'_{cv} pari a:

- 32° nelle sabbie;
 - 35° nelle ghiaie
- e valori di m pari a 3.

Hatanaka e Uchida (1996, [34]) hanno ricavato la seguente correlazione fra N_1 e l'angolo di resistenza al taglio in condizioni di compressione triassiale $\varphi'(TX)$, per sabbie e ghiaie aventi passante al vaglio n° 200 ASTM inferiore al 10%, sulla base dei risultati di prove triassiali eseguite su campioni indisturbati prelevati con la tecnica del congelamento:

$$\varphi' = (\alpha * N_1)^{0.5} + \beta$$

essendo:

$$\alpha = 20$$

$$\beta = 20^\circ \pm 3^\circ$$

$$N_1 = \frac{N}{\left(\frac{\sigma'_{v0}}{98.1}\right)^{0.5}} \quad \text{con} \quad \sigma'_{v0} \text{ in kPa}$$

Il valore di N deve essere riferito ad un valore di ER pari al 78% (Energy Ratio che in Italia è abitualmente pari al 60%). Tale correlazione è stata ottenuta per valori di φ' compresi tra 28° e 44° e per valori di N_1 compresi tra 4 e 28 colpi/300 mm.

L'angolo di attrito φ' può anche essere determinato tramite la seguente correlazione proposta da Schmertmann (1975, [45])

$$\varphi' = \tan^{-1} \left[\frac{N}{12.2 + 20.3 * \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \right]^{0.34}$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

7.1.3 Valutazione delle caratteristiche di deformabilità da prove SPT

Il modulo di taglio (G_0) e quello di Young (E_0) iniziali (associabili a piccole deformazioni), sono ricavati a partire dai valori delle velocità delle onde di taglio (V_s), stimate per via diretta, dai risultati delle prove geofisiche, o per via indiretta, interpretando i risultati delle prove SPT, utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_0 = \frac{\gamma_n}{9.81} \cdot (V_s)^2$$

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

essendo:

γ_n = peso di volume naturale del terreno, valore medio (kN/m^3)

ν' = modulo di Poisson del terreno

V_s = velocità delle onde di taglio (m/s)

La velocità delle onde di taglio da prove SPT in sabbie e ghiaie normalmente consolidate, silicee non cementate può essere ricavata sulla base del metodo proposto da Ohta & Goto (1978) [35], utilizzando la seguente espressione:

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})_{60\%}^{0.171} \cdot z^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \quad (\text{m/s})$$

essendo:

C = 67,3

z = profondità dal piano campagna (m)

f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (Tabella 7-4)

f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (

Tabella 7-5)

Nel caso specifico viene assunto il valore di $f_A = 1,0$ per i depositi recenti e $f_A = 1,3$ per i depositi antichi. Il modulo di Poisson dei terreni viene preso pari a 0,25.

Tabella 7-4 - Coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito), da Ohta & Goto (1978)[35]

	Olocene	Pleistocene
f_A	1,0	1,3

Tabella 7-5 - Coefficiente f_G (funzione della composizione granulometrica), da Ohta & Goto (1978)[35]

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

Seed (1983, [46]) ha proposto la seguente correlazione fra il modulo di taglio a piccolissime deformazioni, G_0 , e il valore di N_{spt} :

$$G_0 = 634.6N_{spt}$$

Ohsaki e Iwasaky (1973, [42]), hanno proposto la seguente correlazione tra il modulo di taglio a piccolissime deformazioni, G_0 , e il valore di N_{spt} :

$$G_0 = 1200N_{spt}^{0.8}$$

7.1.4 Moduli elastici "operativi"

Com'è noto, il comportamento dei terreni a grana grossa è marcatamente non lineare anche a livelli deformativi relativamente modesti.

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo lineari, basati sulla teoria dell'elasticità, i moduli di deformabilità "operativi" da associare allo specifico problema al contorno vengono a dipendere dalle effettive deformazioni indotte e/o dal grado di mobilitazione della resistenza al taglio. Si ritiene che tale metodo sia applicabile per le opere in progetto ("Foundations" in Figura 7-1), per le quali vale indicativamente quanto segue:

- nel calcolo di opere di fondazione il modulo "operativo" può essere preso pari a $1/5 \div 1/6$ di quello iniziale; i valori di modulo suddetti sono associabili a gradi di deformazioni indotte tra circa $1 \cdot 10^{-2}$ e $3 \cdot 10^{-2}$.

Nel caso specifico viene assunto un valore di modulo di Young operativo pari a $1/5$ di quello iniziale.

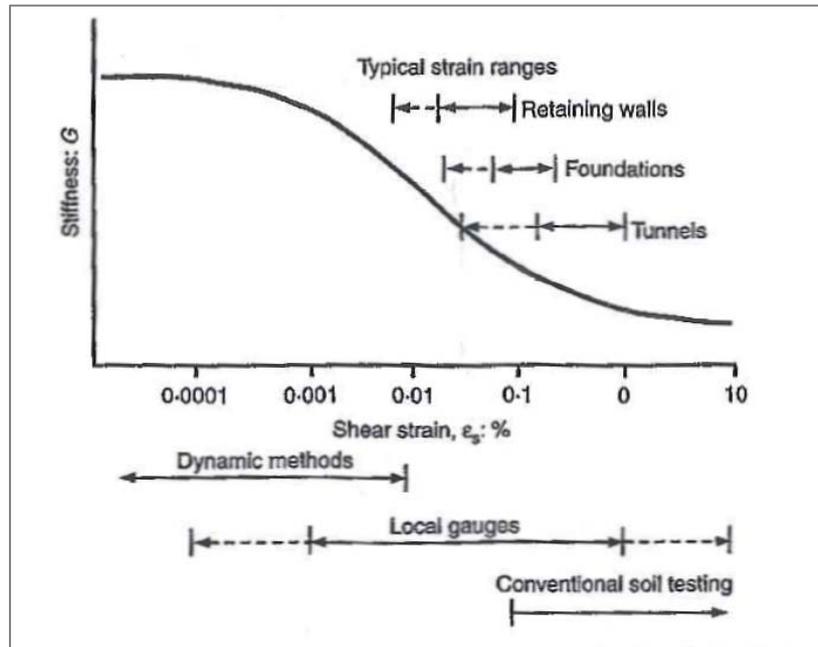


Figura 7-1 - Decadimento del modulo di taglio di un terreno con il livello di deformazione ed intervalli di deformazione tipici nei problemi geotecnici (Atkinson, 2000 [22])

8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica di seguito esposta è basata sia sui riscontri delle indagini in sito sia sui risultati delle prove di laboratorio effettuate.

8.1 Stratigrafia

La stratigrafia riscontrata, basata sui risultati delle indagini e sulla sezione geologica Doc. Rif. [20], può essere considerata relativamente uniforme nell'area di interesse. La stratigrafia riscontrata dal sondaggio S22 può essere ricondotta a quella riportata nella Tabella 8-1, quella riscontrata dal sondaggio S26 può essere ricondotta a quella riportata in Tabella 8-2. La quota del piano campagna è da considerarsi pari a 5 m s.l.m., come indicato sui certificati dei sondaggi S22 e S26.

Tabella 8-1 - Stratigrafia da Sondaggio S22

Profondità (m)		Descrizione
da	a	
0,0	4,1	Sabbie e ghiaie limose con ciottoli ed elementi di areniti, siltiti e graniti
4,1	17,5	Arenarie di Pirri - Sabbie limose argillose con ciottoli anche decimetrici, molto addensate
17,5	24,5	Arenarie di Pirri - Sabbie con ciottoli anche decimetrici molto addensate. Alternanza con bancate di spessore compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata
24,5	30,0	Arenarie di Pirri - Sabbie limose, addensate, alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata
30,0	40,0	Arenarie di Pirri - Sabbie con limo argillose, molto addensate, alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata

Tabella 8-2 - Stratigrafia da Sondaggio S26

Profondità (m)		Descrizione
da	a	
0,0	2,0	Riporto. Sabbie e ghiaie sciolte. Presenza di frammenti laterizi
2,0	3,6	Sabbie e ghiaie limose con ciottoli, sciolte
3,6	5,0	Sabbia con limo debolmente argillosa e ghiaiosa
5,0	6,0	Sabbie limose

Profondità (m)		Descrizione
da	a	
6,0	11,6	Arenarie di Pirri - Sabbia limosa ed argillosa, molto addensate
11,6	13,6	Sabbie limose argillose molto addensate, quasi cementate
13,6	21,0	Arenarie di Pirri - Sabbia limosa debolmente argillosa, molto addensata e alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata e lapidea
21,0	25,0	Arenarie di Pirri – Sabbie debolmente limose , molto addensate e alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata e lapidea
25,0	29,0	Arenarie di Pirri – Sabbie con limo argillose, alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata e lapidea
29,0	34,7	Arenarie di Pirri – Sabbie con limo argillose, molto addensate e alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata e lapidea
34,7	40	Arenarie di Pirri – Sabbie limose, alternate a bancate compreso tra 10 e 30 cm di sabbia ben cementata e lapidea

8.2 Falda acquifera

Il livello della falda acquifera è stato definito sulla base delle risultanze delle campagne d'indagini svolte. Nel sondaggio S22 la falda è stata riscontrata ad una profondità di 2,38 m da p.c., ovvero ad una quota di 2,62 m s.l.m., mentre nel sondaggio S26 la falda è stata riscontrata ad una profondità di 1,81 m da p.c., ovvero ad una quota di 3,19 m s.l.m.. Data la profondità della falda riscontrata durante le indagini in sito e le possibili risalite piezometriche in occasione di eventi meteorici intensi, non è possibile escludere possibili interferenze tra l'opera in progetto e la falda. Si rende necessario prevedere la realizzazione di interventi di aggotamento della falda, di impermeabilizzazione dello scavo e/o sistemi drenanti, atti ad evitare venute d'acqua nello scavo durante le fasi costruttive. Per ulteriori dettagli si rimanda alla sezione idrogeologica Doc. Rif. [20].

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

8.3 Interpretazione delle prove in sito

8.3.1 Caratteristiche fisiche

La Figura 8-1 mostra la densità relativa, determinata sulla base dell'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT (come descritto nel §7.1.1). Per il caso specifico si è ritenuto adeguato definire il valore della densità relativa secondo la correlazione di Skempton (1986, [48]) per i materiali sabbiosi e secondo la correlazione Cubrinowski e Ishihara (2001, [35]) per i materiali ghiaiosi. Ad una profondità compresa tra piano campagna e circa 2,0 m, gli strati sabbioso-ghiaiosi (Riporto) mostrano una densità relativa tipicamente compresa tra il 35% e il 40% (materiale da poco addensato), ad una profondità compresa tra circa 2 m e 6m gli strati ghiaioso sabbiosi (Facies B) mostrano una densità relativa compresa tra il 45% e il 55% (materiale mediamente addensato), mentre risulta generalmente maggiore dell' 80% per i depositi sabbiosi (Facies C) (Materiale da addensato a molto addensato) presenti ad una profondità da piano campagna maggiore di 6 m.

Densità relativa Vs Profondità

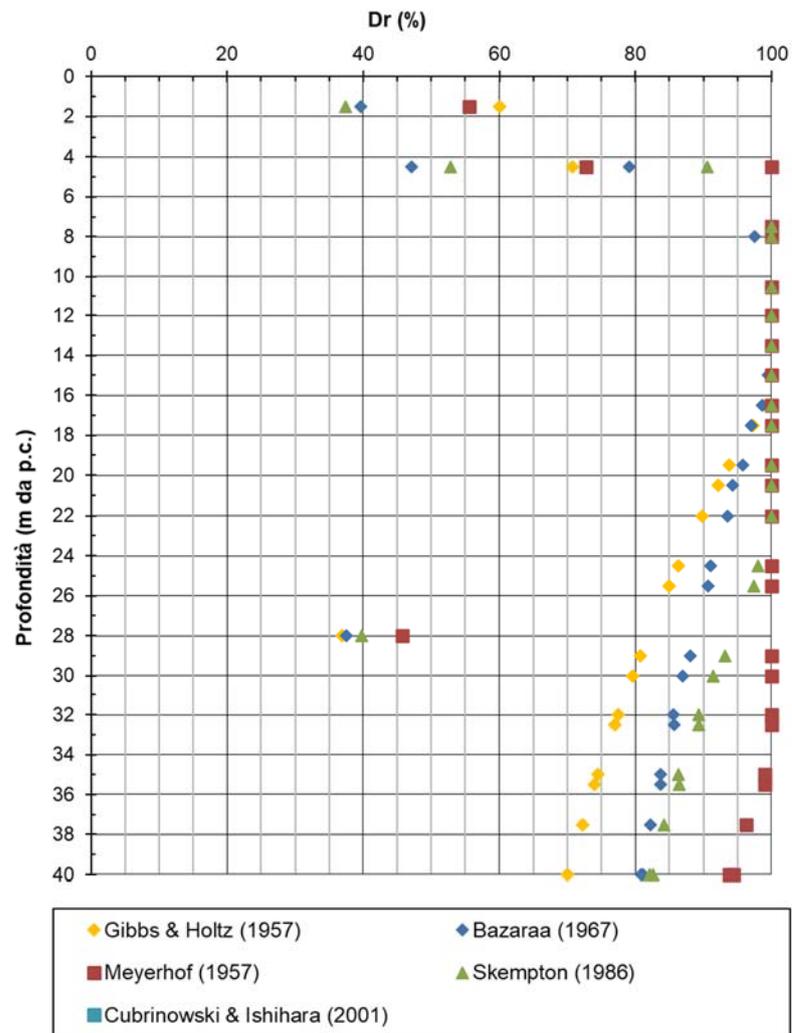


Figura 8-1 - Densità relativa D_r da N_{spt}

8.3.2 Resistenza al taglio in condizioni di tensioni efficaci

In Figura 8-2 si mostra l'angolo di attrito ϕ' ricavato dalle prove SPT. Per il caso specifico si è ritenuto adeguato definire i valori di angolo di resistenza al taglio secondo la correlazione di Bolton (1986) [24], la quale oltre ad essere in favore di sicurezza porta alla definizione di angoli d'attrito adeguati ai materiali in sito. Ad una profondità compresa tra piano campagna e 2 m gli strati sabbioso-ghiaiosi (Riporto) sono caratterizzati da un angolo di attrito pari a circa 33° , ad una profondità compresa tra piano campagna e circa 6 m gli strati sabbioso-ghiaiosi (Facies B) mostrano un angolo di resistenza al taglio pari a circa 35° , mentre risulta compreso tra 40° e 41° per i depositi sabbiosi (Facies C) presenti ad una profondità da piano campagna maggiore di 6 m.

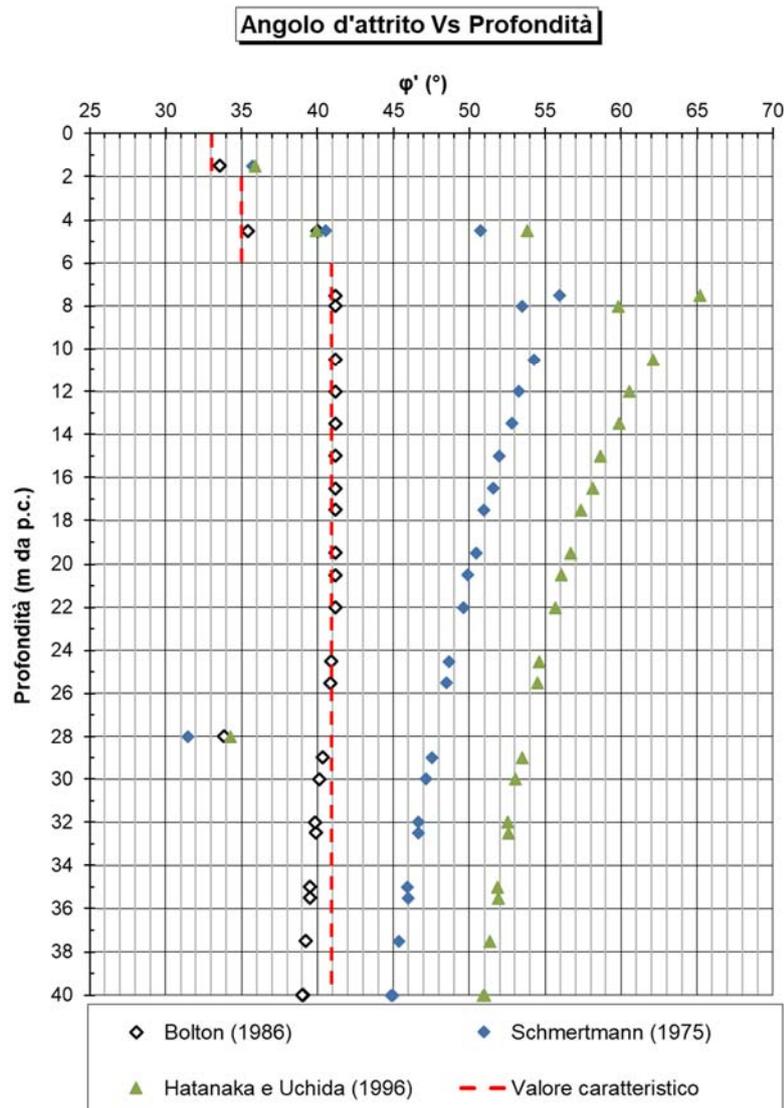


Figura 8-2 – Angolo d'attrito ϕ' da N_{spt}

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

8.3.3 Velocità delle onde di taglio e caratteristiche di deformabilità

In Figura 8-3 sono riportati i profili delle velocità di propagazione delle onde di taglio V_s stimati a partire dai valori di SPT in accordo a quanto descritto al §7.1.3, confrontati con quelli rilevati n°3 profili ottenuti da prova MASW svolte in prossimità del sondaggio S26 (M1 – Shot -2,5m, M1 – Shot 60m, M2 – Shot 60m). Si noti che, data la loro scarsa attendibilità nella determinazione della velocità delle onde di taglio V_s , si sono trascurati i risultati ottenuti da prove sismiche a rifrazione. Dalla figura si evince che i valori ottenuti dalle prove MASW risultano sensibilmente maggiori rispetto a quelli ottenuti dalle prove di penetrazione dinamica.

In Figura 8-4 si mostrano rispettivamente i moduli di taglio a piccole deformazioni G_0 e i moduli di Young a piccole deformazioni E_0 valutati dai valori di V_s e assumendo un coefficiente di Poisson $\nu = 0,25$. Si noti che le correlazioni di Seed (1983, [46]) e di Ohsaki e Iwasaki (1973, [42]) mostrano una tendenza alla sovrastima dei parametri di deformabilità dei materiali. Sulla base di quanto ora esposto gli intervalli dei valori del modulo di taglio e del modulo di Young sono stati definiti facendo maggior affidamento sulle prove MASW e sulla correlazione di Ohta e Goto (1978) [43], la quale tiene in considerazione la natura dei terreni e la loro profondità rispetto al piano campagna. I valori ottenuti ricadono tipicamente negli intervalli:

- Strato sabbioso-ghiaioso (Riporto) presente ad una profondità compresa tra piano campagna e 2,0 m: $G_0 = 30\text{MPa}$, $E_0 = 75\text{ Mpa}$
- Strato sabbioso-ghiaioso (Facies B) presente ad una profondità compresa tra 2,0 m e 6 m: $G_0 = 60\text{ MPa}$, $E_0 = 150\text{ Mpa}$
- Strato sabbioso (Facies C) presente a partire da una profondità di 6 m: $G_0 = 170\div 370\text{ MPa}$, $E_0 = 420\div 920\text{ MPa}$

I moduli di Young operativi (E_{op}) validi per analisi di fondazioni superficiali e ricavati dalle prove di penetrazione dinamica (SPT) e dalle prove geofisiche (MASW) sono riportati in Figura 8-5. Sulla base di quanto mostrato si evidenzia il seguente profilo di modulo operativo:

- Strato sabbioso-ghiaioso (Riporto) presente ad una profondità compresa tra piano campagna e 2,0 m: $E_{op} = 14\text{ Mpa}$
- Strato sabbioso-ghiaioso (Facies B) presente ad una profondità compresa tra 2,0 m e 6 m: $E_{op} = 30\text{ Mpa}$
- Strato sabbioso (Facies C) presente a partire da una profondità di 6 m: $E_{op} = 80\div 190\text{ Mpa}$

Velocità delle onde di taglio Vs Profondità

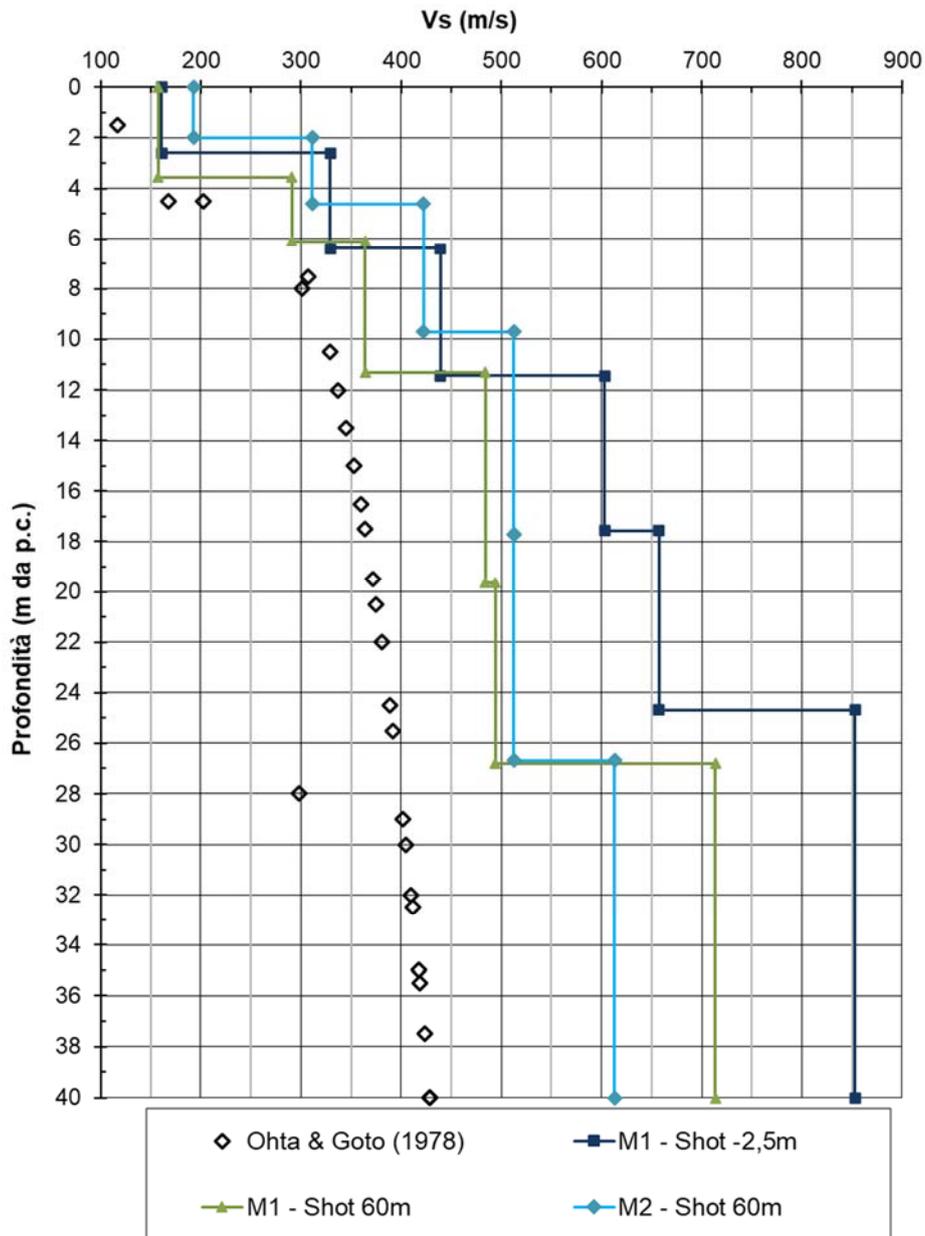


Figura 8-3 – Velocità delle onde di taglio V_s

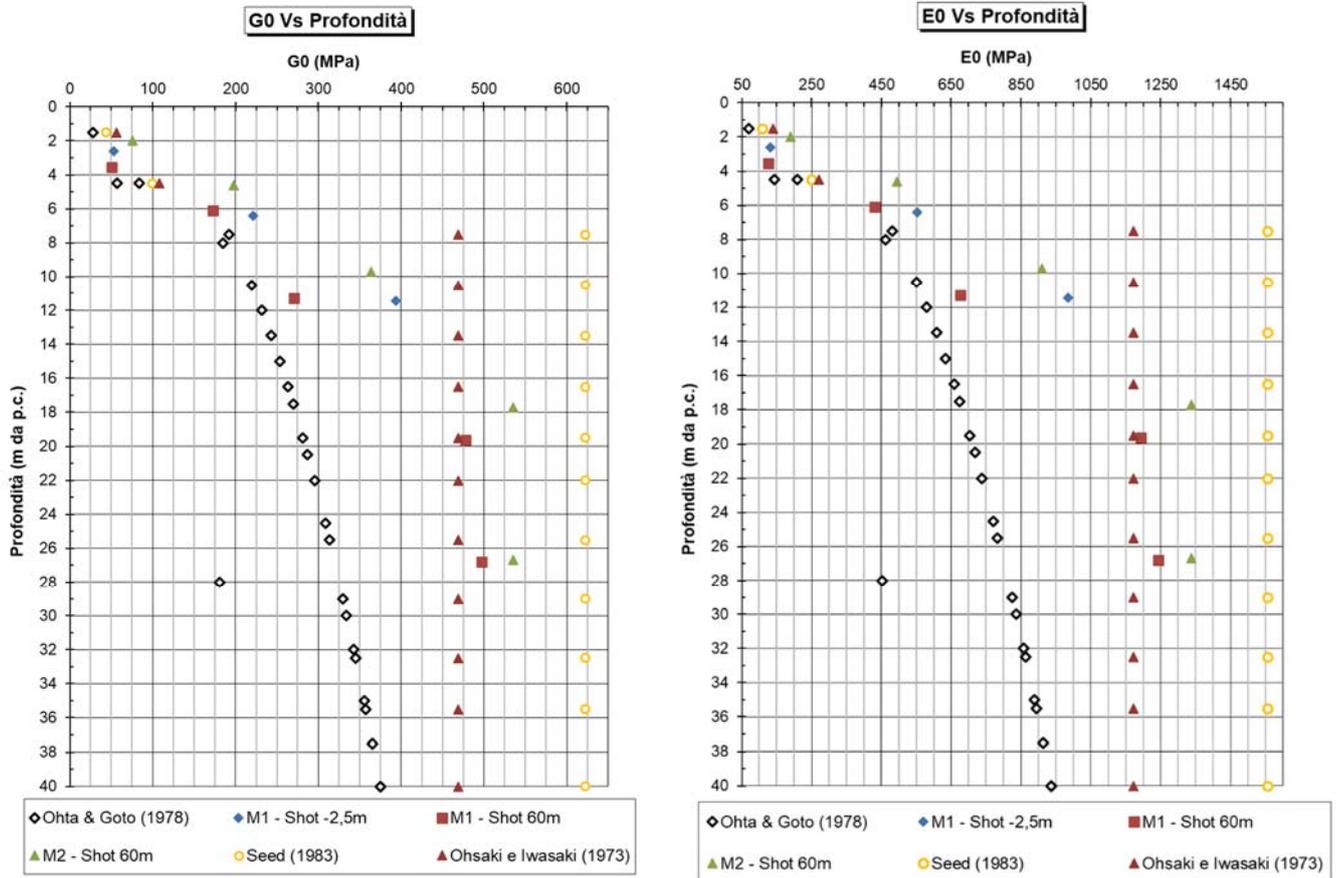


Figura 8-4 – Modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 (a sinistra) Modulo elastico a piccole deformazioni E_0 (a destra)

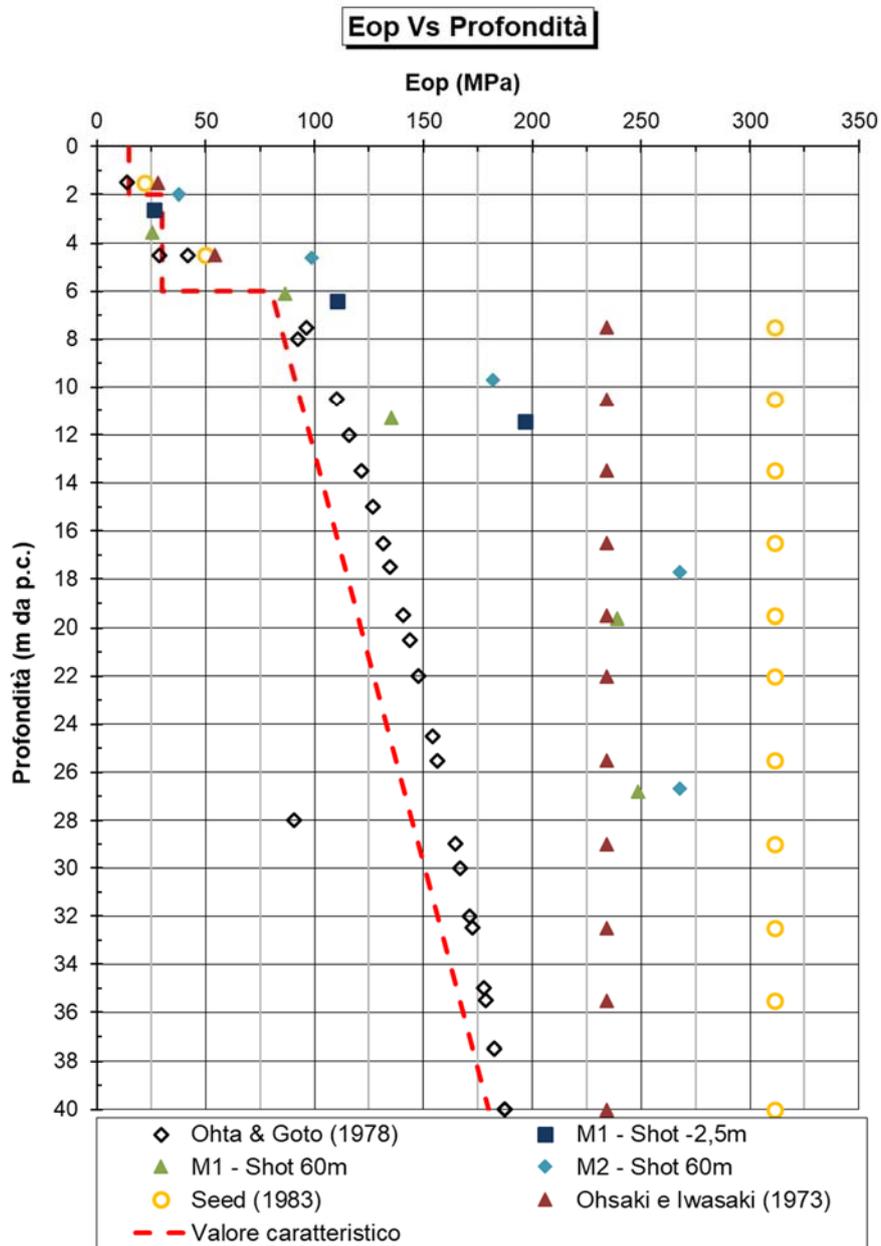


Figura 8-5 – Modulo di Young operativo E_{op} per fondazioni superficiali

8.3.4 Velocità delle onde di volume

In Figura 8-6 sono riportati i profili delle velocità delle onde di corpo ottenuti dalle prove sismiche a rifrazione svolte in prossimità del sondaggio S26 (R1 e R2), in Figura 8-7 si riportano invece gli intervalli tipici dei valori delle onde di corpo V_p per differenti materiali. Sulla base di quanto mostrato si evidenzia il seguente profilo di V_p :

- Strato sabbioso-ghiaioso (Riporto) presente ad una profondità compresa tra piano campagna e 2,0 m: $V_p = 300\div 900$ m/s
- Strato sabbioso-ghiaioso (Facies B) presente ad una profondità compresa tra 2,0 m e 6 m: $V_p = 900\div 1600$ m/s
- Strato sabbioso (Facies C) presente a partire da una profondità di 6 m: $V_p = 1600\div 2900$ m/s

Si noti che con riferimento alla Facies C si raggiungono valori tipici della roccia alterata, questo può essere dovuto alla cementazione del materiale presente in sito.

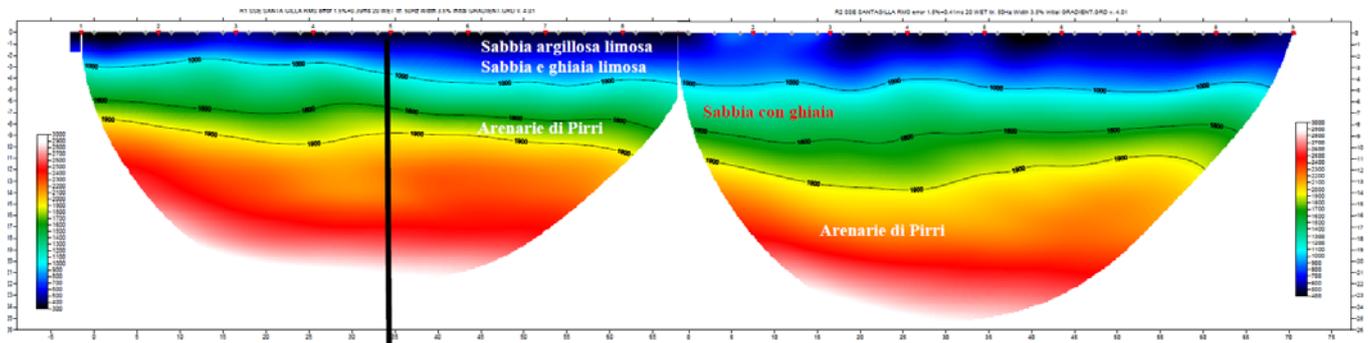


Figura 8-6 – Estratto dei risultati delle prove sismiche a rifrazione

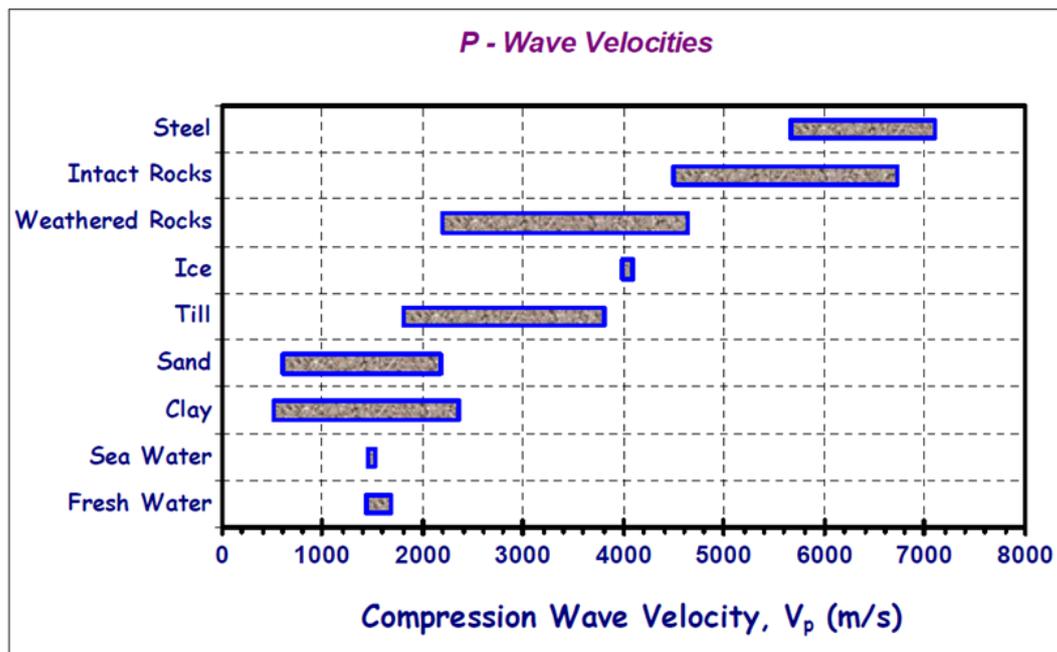


Figura 8-7 – Valori della velocità delle onde di corpo V_p per differenti materiali

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

8.4 Interpretazione delle prove di laboratorio

8.4.1 Caratteristiche fisiche

Nelle figure seguenti si riepilogano in forma grafica i risultati delle prove di laboratorio relativi alla caratterizzazione dei materiali.

La composizione granulometrica mostra come i materiali facenti parte della Facies B presenti ad una profondità da piano campagna compresa tra 2 m e 6 m, siano principalmente costituiti da sabbie con una componente ghiaiosa che raggiunge un massimo valore pari a circa il 40% e una componente fine che raggiunge un valore massimo pari a circa il 30%.

I materiali appartenenti alla Facies C, presenti a partire da una profondità da piano campagna di 6 m, si mostrano prevalentemente sabbiosi, con una componente ghiaiosa trascurabile e una componente fine che raggiunge valori massimi pari a circa il 40%.

Negli strati della Facies C con valori maggiori di componente coesiva è stato possibile estrarre dei campioni sui quali sono state effettuate determinazioni del peso di volume naturale γ_n (Figura 8-10), di contenuto d'acqua naturale, w_n (Figura 8-10), dell'indice dei vuoti e_0 (Figura 8-11) e con riferimento alla sola componente coesiva si sono effettuate le determinazioni del limite liquido w_l (Figura 8-12) del limite plastico w_p (Figura 8-12) e dell'indice di plasticità IP (Figura 8-13).

Nella "Carta di plasticità di Casagrande", riportata in Figura 8-14, il materiale costituente la matrice coesiva della Facies C ricade nei campi dei "Limi inorganici a bassa compressibilità e argille organiche", "Argille inorganiche a bassa plasticità" e delle "Argille inorganiche a media plasticità".

Distribuzione granulometrica

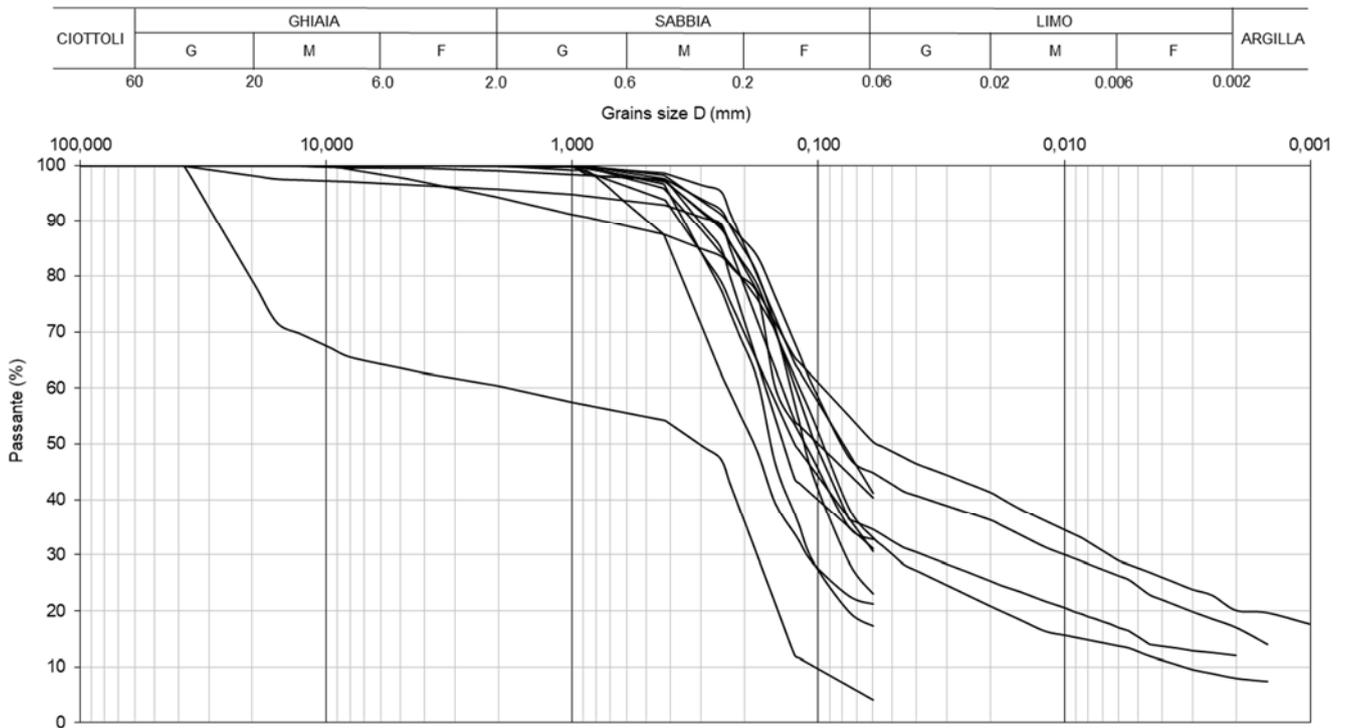


Figura 8-8 – Curve granulometriche

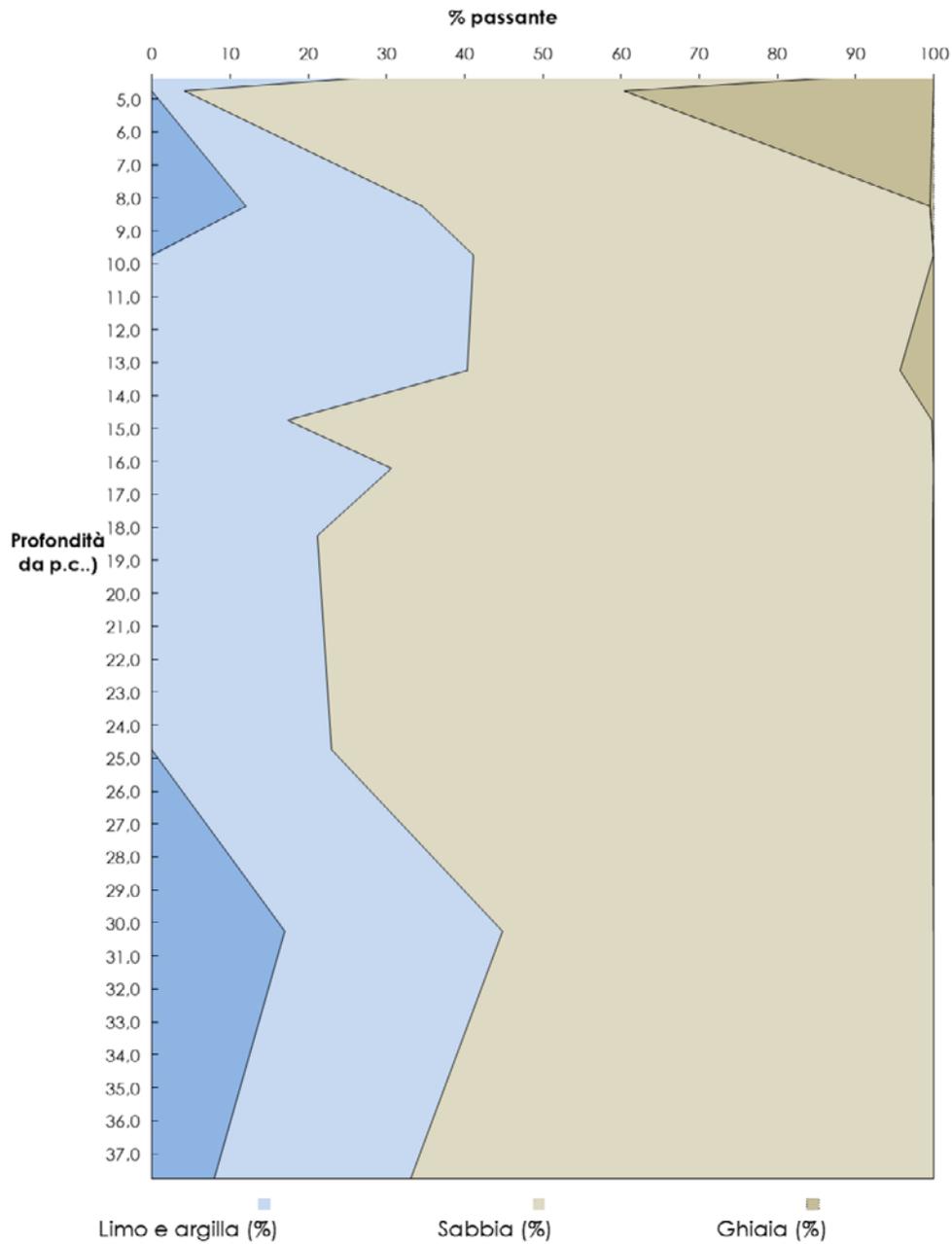


Figura 8-9 – Ripartizione granulometrica

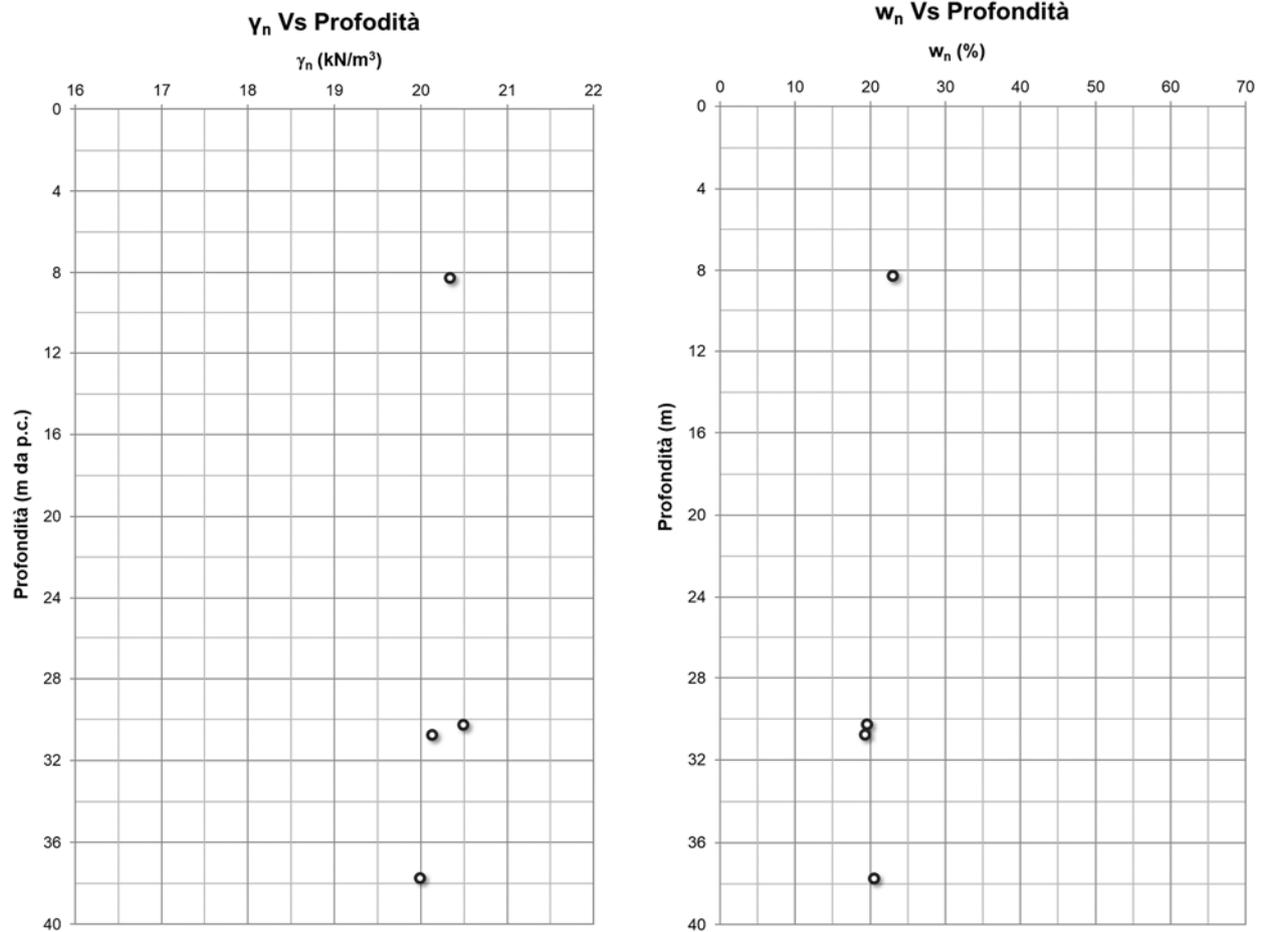


Figura 8-10 – Peso di volume naturale (a sinistra) e contenuto d'acqua naturale (a destra)

e Vs Profondità

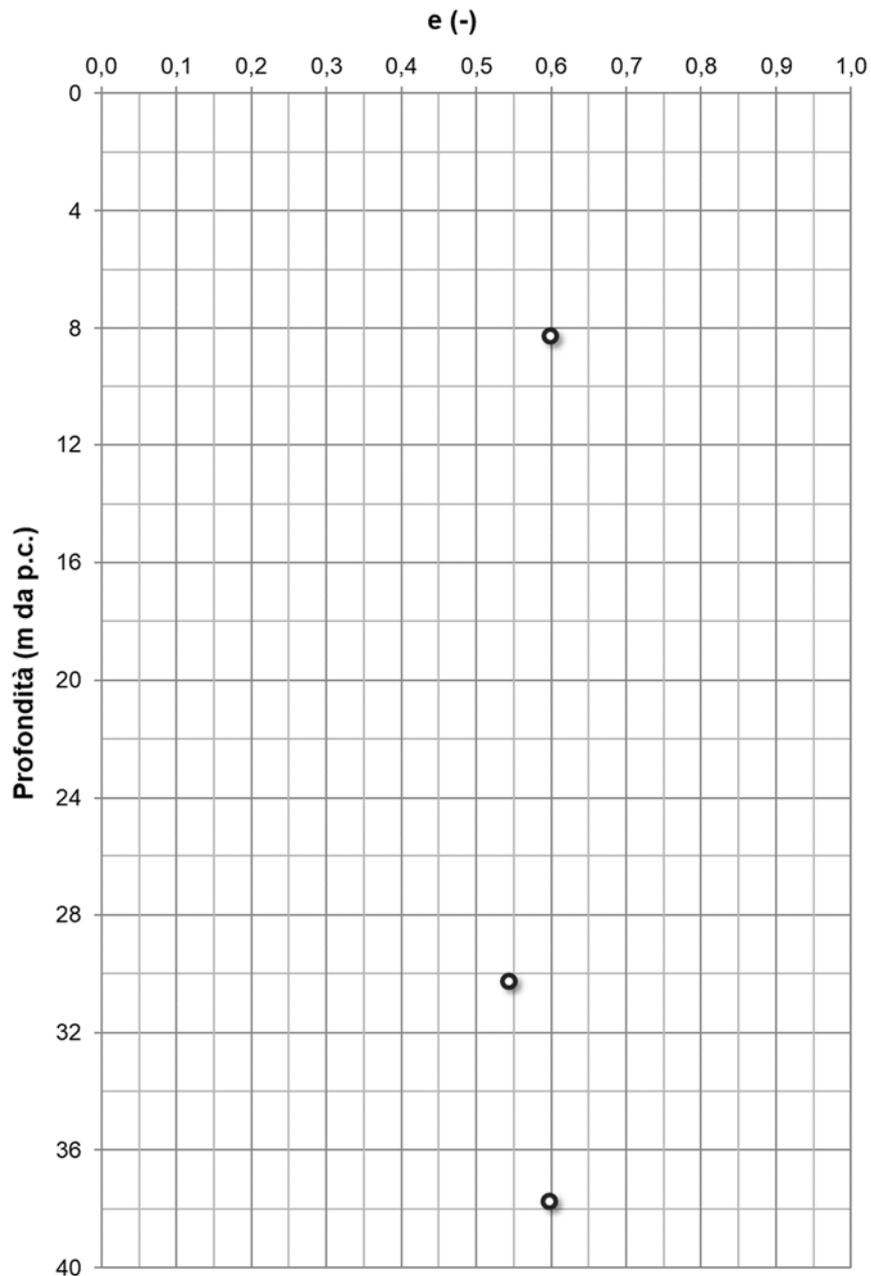


Figura 8-11 – Indice dei vuoti

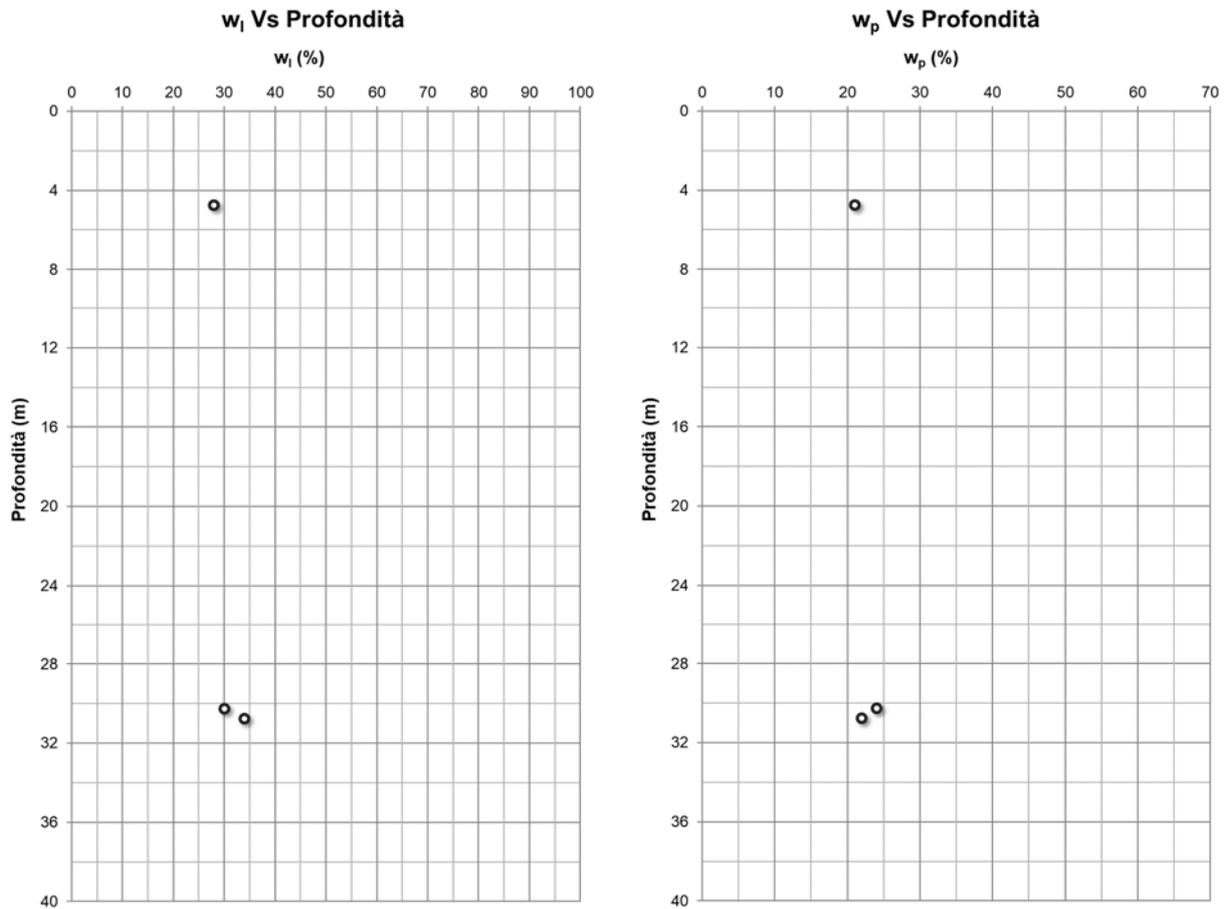


Figura 8-12 – Caratteristiche di plasticità: Limite liquido (a sinistra) e Limite plastico (a destra)

Ip Vs profondità

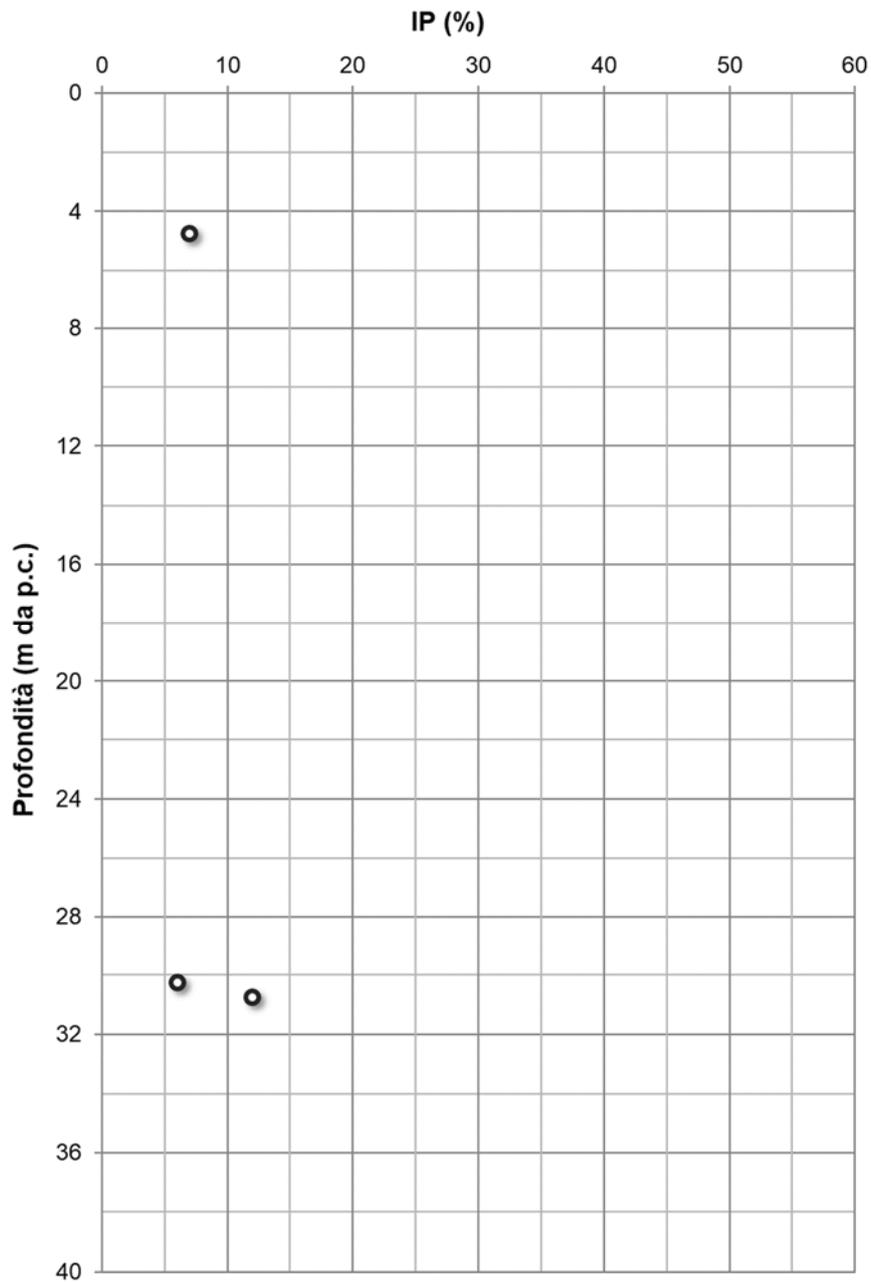


Figura 8-13 – Caratteristiche di plasticità: Indice di plasticità

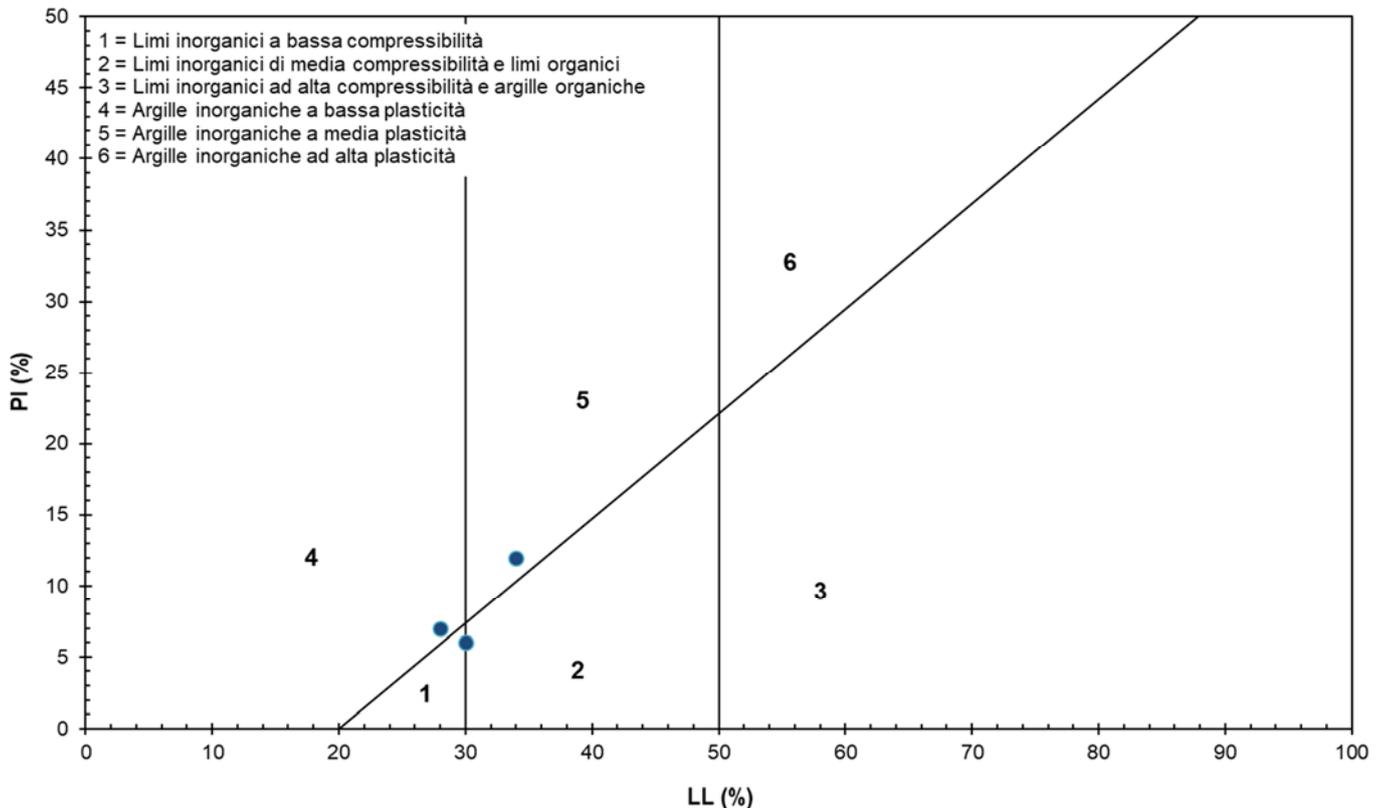


Figura 8-14 – Carta di plasticità di Casagrande

8.4.2 Caratteristiche di resistenza al taglio non drenata e in termini di sforzi efficaci

La campagna d'indagini ha previsto la realizzazione di n°3 prove di taglio diretto per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate. In Figura 8-15 si riportano per completezza i risultati, i quali sono stati trascurati a causa della scarsa numerosità delle prove e il possibile disturbo dei campioni dovuto alla natura del materiale in sito..

Data la natura prevalentemente granulare del materiale si sono trascurati i risultati della prova Tx-UU. Dato quanto sopra esposto e la mancanza di ulteriori prove di laboratorio (e.g. Prove di compressione assiale), la definizione dei parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate è stata effettuata in accordo alle prove in sito.

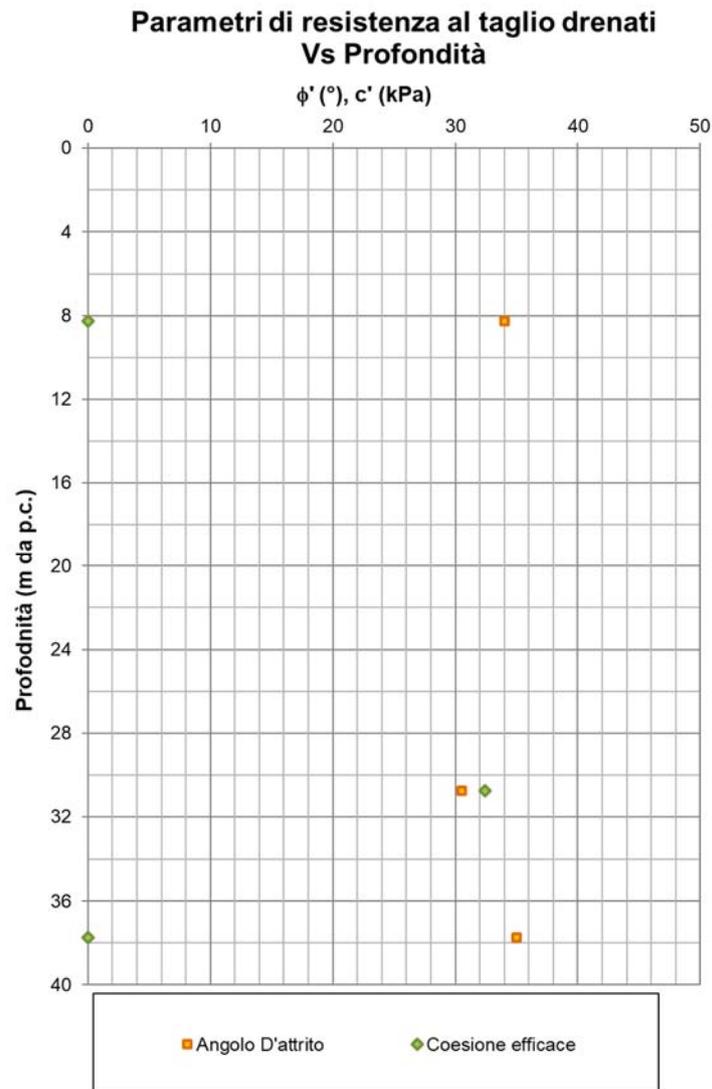


Figura 8-15 – Parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate

8.5 Caratteristiche di conducibilità idraulica

Con riferimento allo strato di materiali limosi appartenenti alla Facies B, il coefficiente di permeabilità in sito è stato determinato direttamente in sito con prova Lefranc (Figura 8-16), ottenendo una conducibilità idraulica variabile tra $1,1E-05$ m/s e $1,16E-06$ m/s. La medesima prova è stata effettuata a profondità da piano campagna tali da interessare i materiali appartenenti alla della Facies C (9,7 m e 10,4 m),ottenendo un valori del coefficiente di permeabilità variabile tra $4,08E-05$ m/s e $1,16E-04$ m/s.

Per ulteriori valutazioni riguardanti la conducibilità idraulica in sito si rimanda al Doc. Rif. [20].

Conducibilità idraulica Vs Profondità

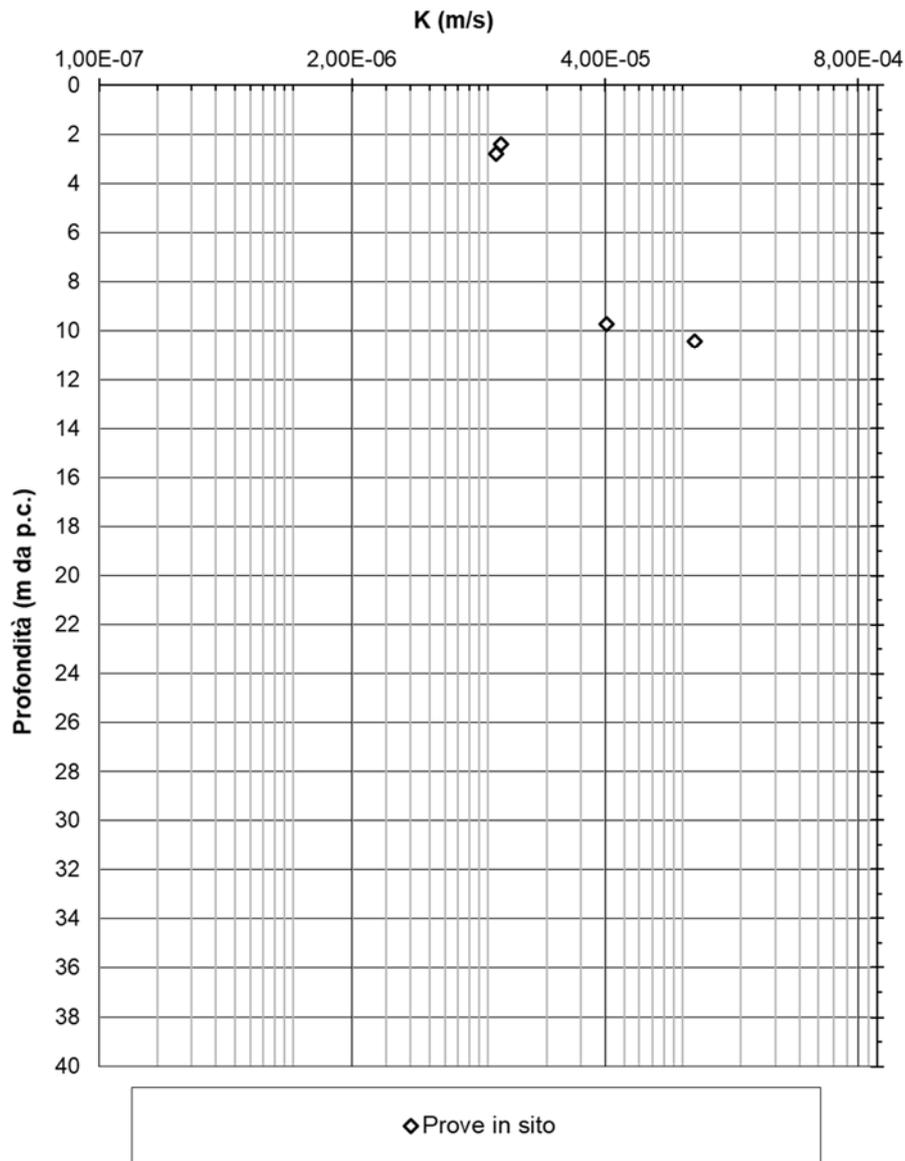


Figura 8-16 – Coefficienti di permeabilità

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

9 MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

Sulla scorta della caratterizzazione geotecnica del sito discussa al capitolo precedente, ai fini del dimensionamento delle opere di fondazione si fa riferimento al modello geotecnico riportato in Tabella 9-1.

Tabella 9-1 – Stratigrafia di progetto

Strato	Profondità (m)	Facies	Descrizione
1	0,0 - 2,0	Riporto	Sabbie e ghiaie
2	2,0 - 6,0	B	Sabbie e ghiaie con limo
3	>6,0	C	Sabbia limosa argillosa

In assenza di dati derivanti da ulteriori indagini nelle aree strettamente limitrofe, la stratigrafia è stata definita sulla base del sondaggio S22, del sondaggio S26 e delle sezioni geologiche.

9.1 Parametri geotecnici caratteristici dei materiali

Secondo le NTC2018 [1] il “valore caratteristico” di un parametro geotecnico deve rappresentare una stima ragionata e cautelativa del parametro nello stato limite considerato.

Gli stati limite da considerare per le opere in progetto riguardano sostanzialmente stabilità, collasso e deformazioni di strutture a sostegno di scavi profondi o di strutture di fondazione che, per le dimensioni e le rigidezze in gioco, coinvolgono volumi elevati di terreno. La valutazione degli stati limite è effettuata mediante analisi di interazione, in cui si tiene conto della rigidezza delle opere.

I valori caratteristici dei parametri geotecnici di riferimento sono scelti in modo da costituire, per ciascuno di essi, una stima cautelativa, prossima o inferiore al valore medio ricavato dai risultati delle indagini.

I valori caratteristici dei parametri geotecnici rilevanti per le analisi qui presentate sono riepilogati in Tabella 9-2 .

Tabella 9-2 – Parametri geotecnici caratteristici dei materiali

Strato	Profondità fondo strato	γ_n	φ'	c'	OCR	Eop	K
	[m da	[kN/m ³]	[°]	[kPA]	[-]	[MPa]	[m/s]
1	2	19	33	-	-	15	-
2	6	19	35	-	-	30	1,1E-05
3	-	20,5	41	-	-	80+2,94z*	-

z* = profondità dal tetto dello strato

10 PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI FONDAZIONE

10.1 Tipologia di fondazione

Dato il ridotto valore dei carichi agenti e le buone caratteristiche geotecniche dei terreni presenti, l'opera in progetto verrà fondata su fondazioni dirette. Tipicamente si realizzano fondazioni a trave rovescia e plinti di dimensioni limitate: larghezza di base pari a 1 m e spessore pari a 0,35m.

In Figura 10-1 Figura 10-2 si riportano, a titolo d'esempio, alcuni estratti dalle tavole delle fondazioni per sottostazioni elettriche realizzate in altri siti.

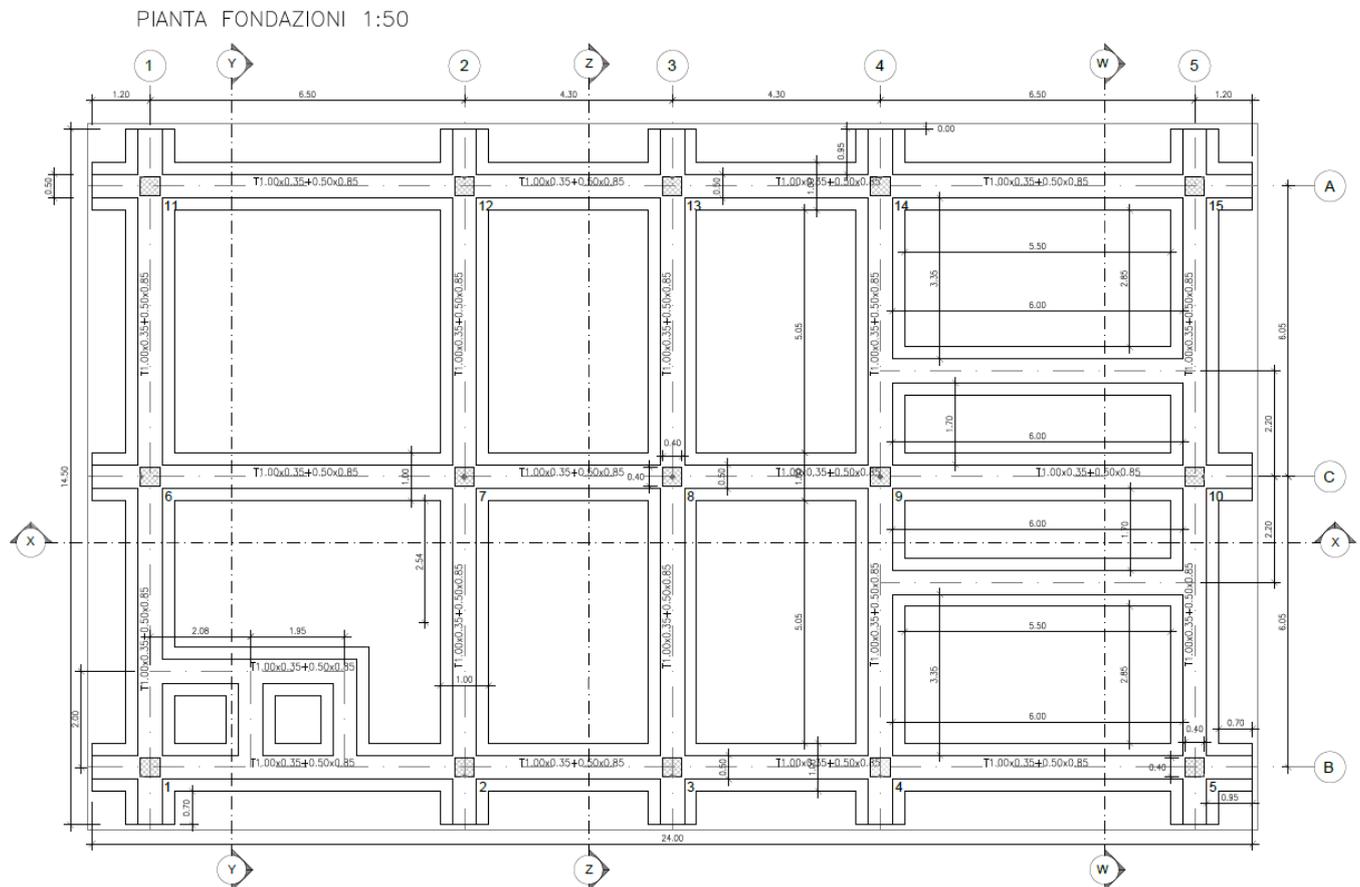


Figura 10-1 - Esempio di pianta fondazioni per strutture come quella in progetto

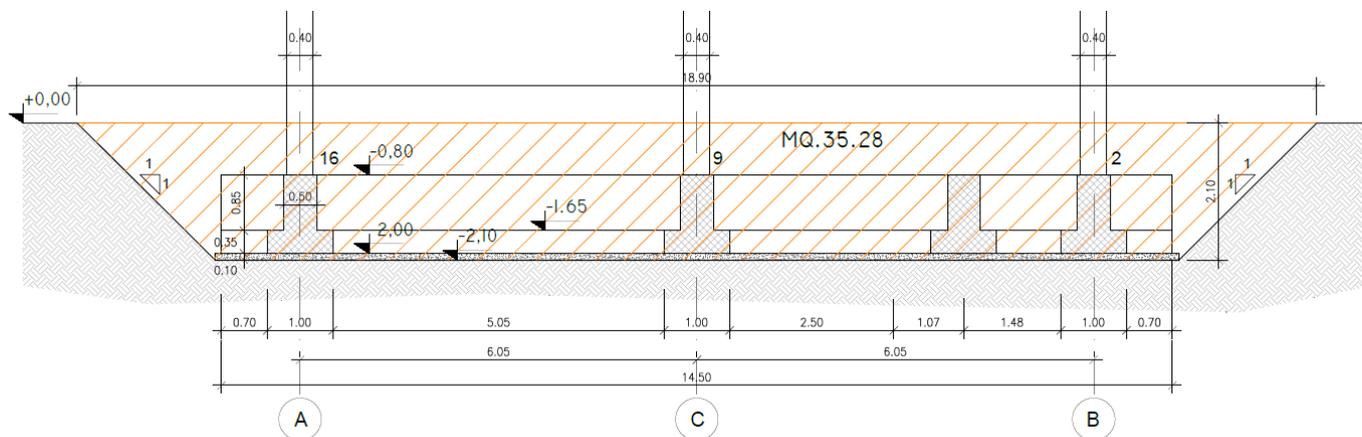


Figura 10-2 – Esempio di sezione trasversale delle fondazioni tipiche per strutture come quella in progetto

10.2 Capacità portante

10.2.1 Metodologia

Il calcolo della resistenza di progetto nei confronti della capacità portante R_d per le fondazioni dell'opera in progetto è sviluppato in accordo alle NTC2018 [1].

Le valutazioni riguardanti le fondazioni dirette della SSE vengono sviluppate come segue:

- Valutazione della resistenza geotecnica in condizioni statiche (SLU): Approccio 2 Cap. 6.4.2 NTC2018 [1] (A1+M1+R3). I coefficienti parziali sulle azioni A1, sui parametri geotecnici dei terreni M1 e sulle resistenze R3 sono riportati rispettivamente in Figura 10-3, Figura 10-4, Figura 10-5;
- La verifica della resistenza geotecnica in condizioni sismiche (SLV) prevede che i coefficienti sulle azioni e sui materiali siano posti uguali all'unità e che i coefficienti sulle resistenze siano gli stessi considerati in condizioni statiche, riportati in Figura 10-5, pertanto la resistenza di progetto R_d sarà la medesima delle condizioni statiche.

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_f (o γ_{G1})	Coefficiente Parziale		
			EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Figura 10-3. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni per le verifiche SLU (Tab.6.2.I NTC2018 [1])

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0

Figura 10-4. Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno per le verifiche SLU (Tab.6.2.II NTC2018 [1])

La capacità portante di progetto della fondazione superficiale R_d è stata valutata dividendo il valore caratteristico per il valore di γ_r

Verifica	Coefficiente parziale
	(R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

Figura 10-5. Coefficienti parziali γ_R sulle resistenze caratteristiche dei pali per verifiche SLU (Tab.6.4.I NTC2018 [1])

La capacità portante di progetto della fondazione superficiale R_d viene valutata a partire dal valore caratteristico in accordo alla seguente equazione:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_r} = \frac{q_{lim} * B' * L'}{\gamma_r}$$

essendo:

$B' * L' =$ area resistente efficace in accordo a Meyerhof, 1963 [41] (Figura 10-6)

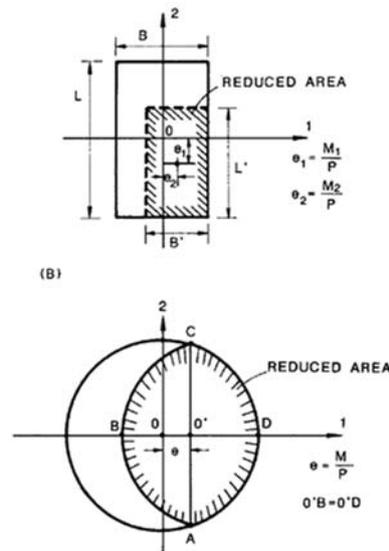


Figura 10-6 – Dimensioni efficaci per fondazioni quadrate e circolari sottoposte a carichi eccentrici (Meyerhof, 1963 [41])

Il valore caratteristico e successivamente quello di progetto della capacità portante R_d è stato calcolato con riferimento alla formulazione di Brinch-Hansen (1970 [25]) e Vesic (1973 [51]) .

In accordo alle NTC2018 [1] la verifica è da ritenersi soddisfatta se la resistenza di progetto R_d risulta non inferiore alle azioni di progetto:

$$E_d \leq R_d$$

10.2.2 Risultati

Nel presente paragrafo si riportano i valori resistenza di progetto R_d di progetto per fondazioni superficiali aventi dimensioni assimilabili a quelle previste per l'opera in progetto (Tabella 10-1).

Tabella 10-1 – Dimensioni delle fondazioni studiate

Fondazione	B'	L'
	[m]	[m]
1	1	1
2	1	2
3	1	∞
4	2	2
5	2	∞

Dato l'assetto stratigrafico (presenza di terreni a grana grossa in superficie), le ridotte dimensioni delle fondazioni e i bassi valori di carico, la capacità portante è stata valutata per le sole condizioni drenate. In

favore di sicurezza il calcolo è stato svolto considerando uno strato omogeneo caratterizzato dai parametri geotecnici dello strato più superficiale appartenente alla Facies B.

In Figura 10-7 si mostrano i valori della resistenza di progetto R_d ottenuti rispettivamente per H/N (rapporto tra azione verticale e orizzontale) nullo e pari al 10%, oltre che per profondità del piano di posa pari a 0,5 m, 1 m e 2 m.

Si noti che i valori di resistenza di progetto R_d fanno riferimento alle dimensioni efficaci della fondazione B' ed L' , definite in accordo al paragrafo precedente.

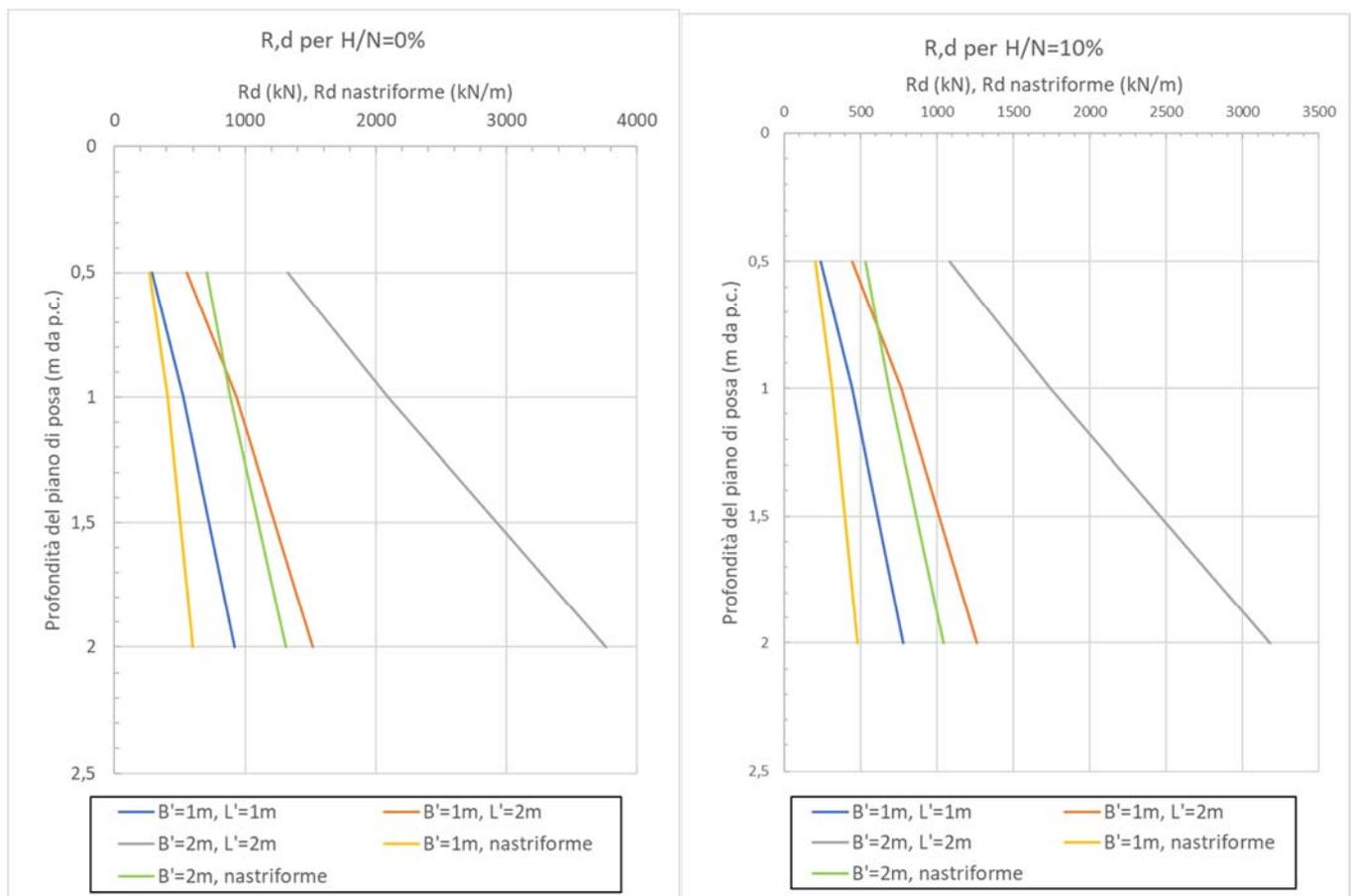


Figura 10-7 – Valori di R_d ottenuti per $H/N=0\%$ (a sinistra) e $H/N=10\%$ (a destra)

	PROGETTO DEFINITIVO - ELETTRIFICAZIONE LINEA CAGLIARI-ORISTANO					
	SSE CAGLIARI Relazione Geotecnica Piazzale	COMMESSA RR0S	LOTTO 00	CODIFICA D 29 GE	DOCUMENTO GE 0100 001	REV. A

10.3 Calcolo dei cedimenti

10.3.1 Metodologia

In accordo alla stratigrafia e i parametri caratteristici dei terreni descritti al §9.1, il calcolo del cedimento è stato svolto considerando l'incremento di sforzo nel terreno con la profondità in accordo alla teoria elastica di Boussinesq (1885) [26], la quale assimila il terreno ad un semi-spazio elastico lineare, omogeneo, isotropo ed un carico uniformemente distribuito.

Il valore totale del cedimento è stato calcolato come la somma dei cedimenti degli strati di terreno a grana grossa e degli strati di terreno a grana fine dovuti all'incremento di sforzo nel singolo strato. Per entrambe le tipologie di terreno il cedimento è stato ottenuto integrando la soluzione di Boussinesq (1885) [26] (Si veda Poulos and Davis, 1974 [44]). Il cedimento totale al piano di posa della fondazione è stato ottenuto sommando il contributo di ogni strato dove l'incremento di sforzo dovuto ai carichi applicati risulta maggiore del 10% rispetto allo stato di sforzo originario in sito.

Per considerare l'interazione tra terreno e fondazione si è definito il parametro di rigidità relativa per fondazioni rettangolari K_R (Fraser e Wardle, 1986 [32]) :

$$K_r = \frac{4 E_f}{3 E'} * \left(\frac{1 - \nu^2}{1 - \nu_f^2} \right) * \left(\frac{t}{B} \right)^2$$

essendo:

- E_f = il modulo elastico del calcestruzzo;
- E' = il modulo elastico del terreno;
- ν = il coefficiente di Poisson del calcestruzzo;
- ν_f = il coefficiente di Poisson del terreno;
- t = lo spessore della fondazione;
- B = la larghezza della fondazione.

La fondazione è da considerarsi rigida se $K_R > 10$ e flessibile per $K_R < 0,05$. Per i casi intermedi verranno forniti i cedimenti in centro e allo spigolo della fondazione e quelli per fondazione rigida.

La stima del cedimento è stata svolta con riferimento alla pressione netta p_{net} , ovvero l'incremento di sforzo agente sul piano di posa della fondazione rispetto alla tensione geostatica preesistente.

Il calcolo è stato svolto per le medesime fondazioni di cui al paragrafo precedente.

10.3.2 Risultati

Nelle tabelle mostrate in seguito si riportano i cedimenti ottenuti per fondazioni aventi dimensioni plausibili con riferimento alla struttura, la profondità del piano di posa è stata considerata pari a 2 m da piano

campagna. Il valore del cedimento è stato stimato per valori di p_{net} pari a 40 kPa (Tabella 10-2), 80 kPa (Tabella 10-3) e 120 kPa (Tabella 10-4).

Tabella 10-2 - Valori di cedimento atteso – $p_{net} = 40$ kPa

Tipo di fondazione	K_R	Cedimento al centro	Cedimento allo spigolo	Cedimento rigido
	(-)	(cm)	(cm)	(cm)
B=1m, L=1m	46	-	-	0,1
B=1m, L=2m	46	-	-	0,1
B=1m, nastriforme	46	-	-	0,2
B=2m, L=2m	5	0,2	0,1	0,2
B=2m, nastriforme	5	0,3	0,2	0,3

Tabella 10-3 - Valori di cedimento atteso – $p_{net} = 80$ kPa

Tipo di fondazione	K_R	Cedimento al centro	Cedimento allo spigolo	Cedimento rigido
	(-)	(cm)	(cm)	(cm)
B=1m, L=1m	46	-	-	0,2
B=1m, L=2m	46	-	-	0,3
B=1m, nastriforme	46	-	-	0,4
B=2m, L=2m	5	0,5	0,2	0,4
B=2m, nastriforme	5	0,7	0,3	0,6

Tabella 10-4 - Valori di cedimento atteso – $p_{net} = 120$ kPa

Tipo di fondazione	K_R	Cedimento al centro	Cedimento allo spigolo	Cedimento rigido
	(-)	(cm)	(cm)	(cm)
B=1m, L=1m	46	-	-	0,3
B=1m, L=2m	46	-	-	0,4
B=1m, nastriforme	46	-	-	0,6
B=2m, L=2m	5	0,7	0,3	0,6
B=2m, nastriforme	5	1,0	0,5	0,9

10.4 Modulo di reazione di sottofondo

10.4.1 Metodologia

Nei calcoli strutturali l'interazione terreno-struttura può essere modellata in maniera semplificata adottando il ben noto modello di Winkler. Il modello assume che tra la pressione (p) in un punto della superficie e il corrispondente cedimento (w) esiste una proporzionalità diretta, esprimibile mediante il coefficiente $k_s = p/w$ che prende il nome di coefficiente di sottofondo o coefficiente di Winkler e che, nel modello,

diventa una caratteristica del terreno. L'interazione tra fondazione e terreno è quindi ricondotta a quella di una piastra (o trave) che poggia su un letto di molle elastiche, indipendenti tra loro, di rigidezza costante k_s .

Il modello si caratterizza per il fatto che il cedimento resta localizzato al di sotto dell'impronta della fondazione e che il suo valore, una volta che sia assegnato quello di k_s non dipende dalle dimensioni in pianta della fondazione. Nonostante tali effetti non siano realistici, il modello viene generalmente utilizzato per il calcolo delle fondazioni, avendo il pregio di essere molto semplice e di fornire valori di sollecitazioni che sono poco sensibili al variare di k_s in un intervallo molto ampio.

In letteratura sono presenti numerose correlazioni che permettono di stimare il valore della costante k_s in funzione delle dimensioni della fondazione B ed L, del modulo di Young del calcestruzzo E, del modulo di Young del terreno E_s e del coefficiente di Poisson ν_s .

Nella presente, in funzione della granulometria prevalente del materiale, si è fatto riferimento alle seguenti correlazioni:

- Meyerhof (1963, [40]);
- Vesic (1963, [50]);
- Selvadurai (1979, [47]);
- Bowles (1960, [27]).

In accordo a Meyerhof (1963, [40]) il valore del coefficiente k_s può essere definito con la seguente legge:

$$k_s = \frac{E_s}{B * (1 - \nu_s^2)}$$

Vesic (1963, [50]) la seguente formulazione per la determinazione del coefficiente di reazione di sottofondo:

$$k_s = \frac{0.65 * E_s}{B * (1 - \nu_s^2)} * \sqrt[12]{\frac{B^4 * E_s}{EI}}$$

essendo:

I = l'inerzia della sezione trasversale della fondazione

Il valore del coefficiente k_s può essere definito anche sulla base della correlazione proposta da Selvadurai (1979, [47]):

$$k_s = \frac{0.65}{B} \frac{E_s}{(1 - \nu_s^2)}$$

Per tenere in considerazione la tridimensionalità delle opere di fondazione, Bowles (1960, [27]) ha proposto una correlazione dipendente anche dalla lunghezza L della fondazione:

$$k_s = \frac{E_s}{B * (1 - \nu_s^2) * c_t}$$

essendo:

c_t = Un coefficiente di forma definito in accordo alla Tabella 10-5

Tabella 10-5 – Fattori di forma per la stima di k_s – Bowles (1960, [27])

Fattore di forma per la stima del coefficiente k_s	
Fondazione rigida	c_t
Rettangolare con $L/B < 10$	$0.853 + 0.534 \ln(L/B)$
Rettangolare con $L/B > 10$	$2 + 0.0089(L/B)$

10.4.2 Risultati

In Tabella 10-6 Nelle tabelle mostrate in seguito si riportano i valori di k_s ottenuti per fondazioni aventi dimensioni plausibili con riferimento alla struttura in progetto e considerando il piano di posa ad una profondità pari a 2 m da piano campagna.

Tabella 10-6 – Costanti di Winkler k_s

Tipo di fondazione	Meyerhof (1963)	Vesic (1963)	Selavadurai (1979)	Bowles (1960)
	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³
B=1m, L=1m	32000	10700	20800	37520
B=1m, L=2m	32000	10700	20800	26160
B=1m, nastriforme	32000	10700	20800	14570
B=2m, L=2m	16000	11120	10400	33140
B=2m, nastriforme	16000	11120	10400	7630