

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE
DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

DIREZIONE TECNICA - CENTRO DI PRODUZIONE MILANO

PROGETTO DEFINITIVO PER APPALTO INTEGRATO

**POTENZIAMENTO DELLA LINEA RHO-ARONA. TRATTA RHO-GALLARATE
QUADRUPPLICAMENTO RHO-PARABIAGO E RACCORDO Y**

OPERE CIVILI - GEOTECNICA

Relazione geotecnica generale

SCALA :

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

MDL1 12 D 26 RB GE0005 001 A

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato / Data
A	Emissione Esecutiva	S.Gnoni	Ott.2010			S. Borelli		

File: MDL112D26RBGE0005001A

n. Elab:

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	5
2	SCOPO DEL DOCUMENTO	6
3	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	6
3.1	Documenti Referenziati.....	6
3.2	Documenti Correlati.....	7
4	CENNI GEOLOGICI ED IDROGEOLOGICI.....	8
4.1	Indagini	9
4.2	Prove di laboratorio.....	11
5	TERRENI – RISULTATI DELLE INDAGINI.....	12
5.1	Classificazione	12
5.2	Proprieta' indici.....	12
5.3	Composizione granulometrica.....	13
5.4	Elaborazione prove SPT.....	14
5.5	Resistenza al taglio.....	21
5.6	Deformabilità	24
5.7	Rigidezza.....	26
5.8	Permeabilità.....	27
5.9	Falda.....	28
6	RAPPORTI OPERE - TERRENI.....	30
7	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	31
8	POTENZIALI CRITICITÀ	33

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 - QUADRO DI RIFERIMENTO DELLE INDAGINI ESEGUITE	10
TABELLA 2 - CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI.....	12
TABELLA 3 - RISULTATI DELLE PROVE SPT - TERMINI LS.....	15
TABELLA 4 - RISULTATI DELLE PROVE SPT - TERMINI SL	15
TABELLA 5 - RISULTATI DELLE PROVE SPT - TERMINI GS' (PROFONDITÀ FINO A 5 M CIRCA DAL P.C.)	16
TABELLA 6 - RISULTATI DELLE PROVE SPT - TERMINI GS'' (PROFONDITÀ MAGGIORI DI 5 M DAL P.C.)	19
TABELLA 7 - RISULTATI DELLE PROVE SPT - TERMINI SG	20
TABELLA 8 - VALORI DELLA COESIONE NON DRENATA DEI TERRENI LS RICAVATI DALLE MISURE DI NSPT.....	23
TABELLA 9 - VALORI DELLA COESIONE NON DRENATA DEI TERRENI LS RICAVATI DALLA PRESSIONE MISURATA ALLA PUNTA DEL PENETROMETRO TASCABILE	23
TABELLA 10 - VALORI DEL MODULO EDOMETRICO EED	25
TABELLA 11 - RISULTATI DELLE PROVE DI CARICO SU PIASTRA - INTERVALLO DI PRESSIONE 0,05 ÷ 0,15 MPA	26
TABELLA 12 - RISULTATI DELLE PROVE DI CARICO SU PIASTRA - INTERVALLO DI PRESSIONE 0,10 ÷ 0,20 MPA	26
TABELLA 13 - RISULTATI DELLE PROVE DI PERMEABILITÀ IN FORO	28
TABELLA 14 - QUADRO DELLE LETTURE PIEZOMETRICHE DISPONIBILI	29
TABELLA 15 - PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO.....	32

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 - VALORI DEL CONTENUTO NATURALE D'ACQUA W IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	35
FIGURA 2 - TERRENI GS - CONTENUTO D'ACQUA W E LIMITI DI CONSISTENZA IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	36
FIGURA 3 - TERRENI SG - CONTENUTO D'ACQUA W E LIMITI DI CONSISTENZA IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	37
FIGURA 4 - TERRENI LS - CONTENUTO D'ACQUA W E LIMITI DI CONSISTENZA IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ	38
FIGURA 5 - TERRENI GS - DIAGRAMMA DI PLASTICITÀ	39
FIGURA 6 - TERRENI SG - DIAGRAMMA DI PLASTICITÀ	39
FIGURA 7 - TERRENI LS - DIAGRAMMA DI PLASTICITÀ.....	40
FIGURA 8 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI GS - SONDAGGI S1 ÷ S11.....	40
FIGURA 9 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI GS - SONDAGGI S12 ÷ S17.....	41
FIGURA 10 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI GS - SONDAGGI S18 ÷ S22.....	41
FIGURA 11 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI GS - SONDAGGI S23 ÷ S28.....	42
FIGURA 12 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI SG	42
FIGURA 13 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI SL.....	43
FIGURA 14 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI LS.....	43
FIGURA 15 - COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA DEI TERRENI R.....	44
FIGURA 16 - TERRENI GS' - DENSITÀ RELATIVA RICAVATA DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT.....	45
FIGURA 17 - TERRENI GS'' - DENSITÀ RELATIVA RICAVATA DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT	46

FIGURA 18 – TERRENI SG – DENSITÀ RELATIVA RICAVATA DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT	47
FIGURA 19 – TERRENI SL – DENSITÀ RELATIVA RICAVATA DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT.....	48
FIGURA 20 - TERRENI GS' - VALORI DELL'ANGOLO D'ATTRITO DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT	49
FIGURA 21 - TERRENI GS'' - VALORI DELL'ANGOLO D'ATTRITO DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT.....	49
FIGURA 22 - TERRENI SG - VALORI DELL'ANGOLO D'ATTRITO DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT.....	50
FIGURA 23 - TERRENI SL - VALORI DELL'ANGOLO D'ATTRITO DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT	50
FIGURA 24 - TERRENI LS - VALORI DELL'ANGOLO D'ATTRITO DAI RISULTATI DELLE PROVE SPT	51
FIGURA 25 - TERRENI GS - RISULTATI DELLE PROVE DI TAGLIO DIRETTO CD.....	52
FIGURA 26 - TERRENI SG – RISULTATI DELLE PROVE DI TAGLIO DIRETTO CD	52
FIGURA 27 - TERRENI SL - RISULTATI DELLE PROVE DI TAGLIO DIRETTO CD	53
FIGURA 28 - TERRENI LS - RISULTATI DELLE PROVE DI TAGLIO DIRETTO CD	53
FIGURA 29 - TERRENI LS - VALORI DELLA COESIONE NON DRENATA CU IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	54
FIGURA 30 – TERRENI GS' - VALORI DEL MODULO DI YOUNG E' DA PROVE SPT	54
FIGURA 31 – TERRENI GS'' - VALORI DEL MODULO DI YOUNG E' DA PROVE SPT	55
FIGURA 32 – TERRENI SG - VALORI DEL MODULO DI YOUNG E' DA PROVE SPT.....	56
FIGURA 33 – TERRENI SL - VALORI DEL MODULO DI YOUNG E' DA PROVE SPT.....	57
FIGURA 34 – TERRENI LS - VALORI DEL MODULO DI YOUNG E' DA PROVE SPT.....	58
FIGURA 35 – VALORI DEL MODULO DI EDOMETRICO EED.....	59
FIGURA 36 - VALORI DI Vs,30 IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	60
FIGURA 37 - VALORI DI G0 IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ.....	61

1 PREMESSA

Il presente studio geotecnico si colloca nell'ambito del progetto definitivo per il potenziamento infrastrutturale della linea ferroviaria Rho-Arona, nella tratta Rho-Gallarate.

Tale tratta è ubicata a Nord-Ovest del capoluogo lombardo ed interessa la provincia di Milano nella fascia di territorio compresa nei comuni di Rho, Pregnana Milanese, Vanzago, Pogliano Milanese, Nerviano, Parabiago, Canegrate, San Giorgio su Legnano e Legnano, e la provincia di Varese nella fascia di territorio compresa nei comuni di Castellanza, Busto Arsizio e Gallarate.

Il progetto prevede il quadruplicamento della linea dalla stazione di Rho alla progressiva 9+090, mentre per la rimanente parte del tracciato, l'ampliamento consiste nel triplicamento della tratta, ad eccezione delle stazioni di Busto Arsizio e Gallarate, in cui il numero di binari previsto è superiore a 3.

La tratta esaminata si sviluppa all'aperto e prevalentemente in rilevato. Sono previste opere di linea (viadotti) ed extralinea (cavalcavia); inoltre l'ampliamento della linea rende necessaria la realizzazione di diversi prolungamenti di sottopassi esistenti.

Tra le opere principali si ricorda il ponte sul fiume Olona e il nuovo ponte ferroviario in affiancamento sul Canale Villorosi.

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Nella presente relazione si illustrano le caratteristiche geotecniche dei terreni presenti nell'area in oggetto alla luce dei risultati delle indagini ed i rapporti tra le opere in progetto ed i terreni e si forniscono i parametri fisico-meccanici per la progettazione delle opere.

In particolare, vengono sviluppati i seguenti punti:

- breve cenno geologico;
- descrizione delle indagini in sito e di laboratorio;
- risultati delle indagini;
- descrizione dei profili geotecnici;
- caratterizzazione geotecnica dei terreni.

Infine, si esaminano alcune criticità connesse con la realizzazione delle opere.

3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

3.1 Documenti Referenziati

- Legge 2 Febbraio 1974, n. 64 "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- O.P.C.M. 20 marzo 2003, n.3274 e s.m.i. "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- Decreto Min. LL.PP. 11 Marzo 1988 "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, ed i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione".
- Circolare Min. LL.PP. 24 Settembre 1988, n. 30483 "Istruzioni riguardanti "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" di cui al D.M. 11 Marzo 1988".
- Raccomandazioni AGI giugno 1977 "Programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche".
- Raccomandazioni AGI maggio 1994 "Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio".
- Linee guida AGI 2005 "Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica".

- UNI EN 1997-1:2005 “Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali”.
- UNI EN 1998-5:2005 “Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici”.

3.2 Documenti Correlati

- Rif. Profilo geotecnico MDL112D26F5GE0005001A.
- Rif. Profilo geotecnico MDL112D26F5GE0005002A.

Per la redazione della presente relazione geotecnica, Italferr ha messo a disposizione la seguente documentazione:

- PRO.MO.GEO. S.r.l. – Prima campagna di indagini geognostiche per il progetto definitivo della Linea Gallarate-Rho.
- PRO.MO.GEO. S.r.l. – Seconda campagna di indagini geognostiche per il progetto definitivo della Linea Gallarate-Rho.
- GEOstudi S.r.l. – Prove di laboratorio geotecnica.
- Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica del progetto definitivo (MDL100D26RGGE0001001A).
- Relazione geotecnica delle pile del viadotto di Rho - III tratto (A201-24-C-F2-RB-VIIT-F-5-001_B) - Addendum relazione geotecnica (A201-24-C-F2-RB-VIIT-F-5-002_A) del Progetto costruttivo Linea AC Torino-Venezia (tratta Torino – Milano).

4 CENNI GEOLOGICI ED IDROGEOLOGICI

Il tracciato ferroviario di progetto si sviluppa all'interno dell'area nord-occidentale della Pianura Padana e corrisponde al settore centrale del margine settentrionale sud-alpino.

In particolare, la zona interessata dal tracciato si estende in un'area caratterizzata da una morfologia pianeggiante e da bassa sismicità, con riferimento agli eventi sismici registrati nel passato (cfr. relazione sismica – elaborato MDL112D26RBGE0005002A).

I rilievi e le indagini geologiche e geomorfologiche evidenziano che l'area in esame è caratterizzata dalla presenza di una formazione ghiaiosa – sabbiosa, fino ad una profondità di 20 ÷ 25 m circa dal piano di campagna, cui segue, fino alla massima profondità indagata, una formazione prevalentemente sabbiosa.

Dalla Relazione Geologica di progetto risulta, inoltre, che dal punto di vista idrogeologico l'area è caratterizzata da più falde idriche sotterranee sovrapposte, separate tra loro da orizzonti argilloso-limosi non sempre continui, la cui presenza tende ad aumentare con la profondità. In particolare, si osserva una progressiva diminuzione della granulometria dei terreni in senso verticale, riferibile a diverse fasi di deposizione, che comporta la formazione di tre acquiferi distinti. Il primo acquifero, che interagisce con le opere in progetto, è caratterizzato dalla netta prevalenza di litotipi grossolani che presentano spessore maggiore di 35 m, con lenti limoso-argillose di limitato spessore ed estensione areale.

indagini

Per lo sviluppo della progettazione delle opere civili relative alla tratta in esame e dell'allargamento dei rilevati, sono state eseguite indagini di carattere geologico e geotecnico finalizzate:

- al riconoscimento geologico e geotecnico dei terreni di fondazione;
- alla caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione, finalizzata alla definizione dei parametri per l'esecuzione dei calcoli geotecnici e strutturali;
- alla ricostruzione dei rapporti opere-terreni.

In particolare, si è fatto riferimento alle indagini in sito effettuate dalla PRO.MO.GEO S.r.l. di Torino ed alle prove di laboratorio eseguite dalla GEOstudi s.r.l. di Roma.

4.1 Indagini

Nel periodo settembre – dicembre 2008 sono stati eseguiti 25 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo, spinti fino ad una profondità massima di 30 m. All'interno dei fori sono state effettuate prove penetrometriche dinamiche (SPT) e prove di permeabilità tipo Lefranc.

Al fine di rilevare la profondità della superficie piezometrica della falda freatica, dodici sondaggi sono stati strumentati con piezometri a tubo aperto (diametro di 2 pollici).

In dettaglio, nel corso dei sondaggi sono state sviluppate le seguenti attività:

- prelievo di campioni indisturbati (n. 3) e rimaneggiati (n. 160), successivamente sottoposti a prove geotecniche di laboratorio;
- n. 165 prove SPT (Standard Penetration Test);
- n. 14 prove di permeabilità in foro tipo Lefranc;
- rilievo del livello dell'acqua all'interno dei fori di sondaggio, durante le operazioni di perforazione;
- misure speditive della resistenza alla punta con penetrometro tascabile, limitatamente ai termini LS, presenti nei sondaggi S25 – S26 – S27;
- stratigrafie dei terreni.

Le operazioni di perforazione sono state eseguite utilizzando un carotiere semplice con valvola in testa a sfera e calice per perforazione a secco, con un diametro nominale ϕ_{est} pari a 101 mm e lunghezza utile $l = 150 \div 300$ cm.

Nella Tabella 1 si riassumono, per ciascun sondaggio, la profondità di perforazione, il numero dei campioni prelevati e le prove eseguite in sito. La posizione dei sondaggi è indicata nei profili geotecnici (elaborati MDL112D26F5GE0005001A÷2A).

N.B. Pur essendo riportati nel presente elaborato tutti i sondaggi realizzati, quelli di interesse per il tratto oggetto del presente progetto sono quelli che vanno dal sondaggio S14 al sondaggio S27 ed in aggiunta il sondaggio S5 utile nella progettazione delle opere ricadenti nel tronchino denominato "Raccordo Y".

Codifica Italferr	Codifica studio geotecnico	Progr. [km]	Profondità di indagine [m]	Piezometro [m]	Campioni		Prove in sito	
					CI	CR	SPT	LE
PNMDL1C01	S1	21+745	30,0	30,0	-	8	7	-
PNMDL1R02	S2	19+972	15,0	15,0	-	4	4	-
SCMDL1R03	S3	18+425	15,0	-	-	4	4	-
PNMDL1O04	S4	17+735	15,0	15,0	-	4	4	1
PNMDL1U05	S5	16+875	30,0	30,0	-	7	8	-
SCMDL1O07	S7	15+980	20,0	-	-	5	5	-
PNMDL1O08	S8	15+200	30,0	30,0	-	7	7	1
SCMDL1O09	S9	13+365	20,0	-	-	5	5	-
SCMDL1O10	S10	12+725	30,0	-	-	8	8	1
SCMDL1O11	S11	12+135	30,0	-	-	8	8	1
PNMDL1O12	S12	10+550	30,0	30,0	-	8	8	1
SCMDL1O13	S13	10+050	20,0	-	-	5	5	-
PNMDL1O14	S14	8+750	30,0	30,0	-	8	9	1
SCMDL1U15	S15	8+375	15,0	-	-	3	3	-
SCMDL1P16	S16	7+490	30,0	-	-	8	8	1
SCMDL1P17 (*)	S17		10,0	-	-	1	-	-
SCMDL1P18 (*)	S18		5,00	-	-	1	-	-
SCMDL1P18bis (*)	S18bis		5,00	-	-	-	-	-
PNMDL1O19	S19	7+225	30,0	30,0	-	8	8	1
SCMDL1R20	S20	4+715	20,0	-	-	5	5	1
SCMDL1O21	S21	3+875	30,0	-	-	8	8	1
SCMDL1F22	S22	2+835	20,0	-	-	5	5	-
PNMDL1O23	S23	2+450	20,0	20,0	-	5	5	1
PNMDL1O24	S24	1+010	20,0	20,0	1	5	6	1
SCMDL1R25	S25	0+730	30,0	-	-	8	8	-
PNMDL1R26	S26	0+280	30,0	30,0	-	8	9	1
SCMDL1R27	S27	0+130	30,0	-	1	8	8	-
PNMDL1M28	S28	0+110	30,0	30,0	1	8	9	1

Tabella 1 - Quadro di riferimento delle indagini eseguite

In cui:

- CI Campioni indisturbati
- CR Campioni rimaneggiati
- SPT Standard Penetration Test
- LE Prove di permeabilità tipo Lefranc
- (*) Sondaggi eseguiti lungo il ponte sul Villoresi

In sito sono state eseguite anche tre prove di carico su piastra, al fine di determinare le caratteristiche di portanza dei terreni del piano di posa, in corrispondenza di alcuni punti significativi. Tali prove sono state ubicate in corrispondenza dei tratti in cui è prevista la realizzazione di nuovi sottopassi viari (nella zona di Castellanza, nei pressi del raccordo Y – in corrispondenza di via S. Giorgio di Canegrate – in via Olona a Nerviano).

Per maggiori dettagli sulle modalità esecutive delle indagini geognostiche, si rimanda agli specifici rapporti emessi dalla ditta esecutrice.

4.2 Prove di laboratorio

Sui campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati con i sondaggi, sono state eseguite prove di laboratorio di identificazione e meccaniche. In particolare, sono state effettuate determinazioni del contenuto naturale d'acqua w , del peso dell'unità di volume γ , del peso specifico dei grani γ_s , dei limiti di consistenza w_p e w_L e della composizione granulometrica.

Sono state eseguite anche n. 8 prove di taglio diretto CD e n. 1 prova di compressione triassiale consolidata non drenata (CU).

5 TERRENI – RISULTATI DELLE INDAGINI

Nel presente capitolo sono riportati i dati relativi alle proprietà fisico-meccaniche dei terreni, che consentono una caratterizzazione del sottosuolo ai fini geotecnici. I dati sono stati dedotti dai risultati dello studio geologico e delle prove in sito e di laboratorio.

5.1 Classificazione

I terreni che ricadono nel volume di terreno significativo ai fini geotecnici, sono stati raggruppati in 5 classi, per ciascuna delle quali possono distinguersi i termini principali indicati nella tabella seguente.

Terreni di copertura	
	Ghiaia con sabbia e sabbia limosa di colore marrone, sciolta o poco addensata (S). Localmente materiale di riporto costituito di ghiaia sabbiosa, di colore grigio, con frammenti di laterizi e calcestruzzo (R).
LS	Limo sabbioso, a tratti limo argilloso debolmente sabbioso, di colore marrone.
SL	Sabbia limosa debolmente ghiaiosa, di colore giallastro, con qualche elemento lapideo di dimensioni centimetriche.
SG	Sabbia ghiaiosa debolmente limosa di colore marrone.
GS - G	Ghiaia sabbiosa di colore marrone (GS), con presenza di clasti integri da arrotondati a sub angolari. Localmente si rinvencono lenti di sabbia ghiaiosa SG . A tratti è intercalata a ghiaia in matrice sabbiosa (G). Locale presenza di elementi di dimensioni maggiori di 60 mm.

Tabella 2 – Classificazione geotecnica dei terreni

I terreni **GS** sono stati ulteriormente suddivisi in due classi (**GS'** – **GS''**) in funzione della profondità dal piano di campagna. In particolare, alla classe **GS'** appartengono i campioni prelevati entro i primi 5 m dal p.c., mentre alla classe **GS''** appartengono i campioni più profondi. Gli stessi terreni **GS** includono anche livelli di ghiaia in matrice sabbiosa (indicati con la sigla **G**). Tali livelli, che derivano essenzialmente da considerazioni di carattere stratigrafico, vengono distinti solo negli elaborati relativi ai rapporti opere-terreni ed alla caratterizzazione geotecnica.

5.2 Proprieta' indici

Peso dell'unità di volume γ

I terreni a grana grossa **GS** hanno un peso dell'unità di volume γ compreso tra 20 kN/m³ e 21,2 kN/m³, mentre l'unico valore disponibile per la sabbia ghiaiosa **SG** risulta pari a circa 21 kN/m³ (campione S8-Cr6). Valori simili o leggermente superiori si ottengono per la sabbia limosa **SL** ($\gamma \cong 21,4$ kN/m³ - campione S28-cr8) e per il limo sabbioso **LS** ($\gamma \cong 20,8$ kN/m³ - campioni S27-ci1 e S27-cr4).

Contenuto naturale d'acqua w_n

I valori del contenuto naturale d'acqua w_n sono riportati nella figura 1 in funzione della profondità di prelievo.

I valori di w_n dei terreni GS, variano tra il 2% ed il 22%, con una concentrazione più elevata nell'intervallo 5 ÷ 10%. In generale, il contenuto d'acqua aumenta con la profondità.

Per i terreni SG i valori di w_n variano in un intervallo molto ristretto ($w_n = 13 \div 18\%$), mentre per i terreni LS il campo di variazione è 19 ÷ 29%. Per le sabbie limose SL sono disponibili solo due determinazioni di w_n , rispettivamente pari al 15% e 18%.

Limiti di Atterberg

Le figure 2 ÷ 4 mostrano l'andamento dei limiti di consistenza dei terreni GS, SG e LS in funzione della profondità. Ai fini di una migliore interpretazione dei dati, nel grafico sono riportati anche i valori del contenuto naturale d'acqua w_n di cui al precedente punto.

I valori del limite di plasticità w_p e del limite di liquidità w_L dei terreni GS, SG ed LS, gli unici per i quali sono disponibili determinazioni, variano all'interno di intervalli simili, piuttosto ristretti, di seguito riportati:

$$w_p = 14\% \div 23\% ; w_L = 17\% \div 31\%.$$

I dati mostrano anche che per i suddetti terreni la plasticità è bassa, come si evince dalle figure 5 ÷ 7, dove è rappresentato l'indice di plasticità I_p valutato secondo il sistema unificato (Unified Soil Classification System adottato dal Corps of Engineers e da Bureau of Reclamation Statunitensi).

5.3 Composizione granulometrica

Le ghiaie sabbiose GS' e GS'' mostrano una prevalente frazione ghiaiosa, indipendentemente dalla posizione e dalla profondità di prelievo (v. figure 8 ÷ 11). Infatti, la granulometria è variabile dalla ghiaia con blocchi sabbiosa alla ghiaia con sabbia o sabbiosa, limosa, talora debolmente argillosa. Solo un campione (S1-cr1) è classificato come ghiaia, dal momento che oltre il 90% del passante in peso ha un diametro maggiore di 2 mm.

I terreni SG hanno granulometria compresa tra la sabbia con ghiaia limosa e la sabbia con limo ghiaiosa argillosa (fig. 12).

Passando ad analizzare le frazioni più fini, per le quali sono disponibili solo un limitato numero di determinazioni, si osserva che i terreni SL hanno composizione granulometrica variabile dalla sabbia con limo con ghiaia argillosa e la sabbia con limo argillosa (v. fig. 13), mentre i terreni LS sono classificabili come limo con sabbia o sabbioso argilloso (fig. 14).

Infine, i materiali di riporto hanno la granulometria della ghiaia con sabbia o sabbiosa limosa (v. fig. 15).

5.4 Elaborazione prove SPT

Nelle tabelle 3 ÷ 7 si riportano i risultati delle *prove SPT*. In particolare, per ciascuna prova sono indicati la profondità, i valori dei numeri di colpi N_1 , N_2 , N_3 ed N_{SPT} , nonché i valori della tensione verticale efficace σ'_{v0} , del coefficiente di correzione C_N e di SPT normalizzato N_{norm} . E' stata anche riportata la profondità della falda, laddove risulta minore della profondità di prova.

I dati desunti dalle prove SPT sono stati elaborati tramite opportune correlazioni empiriche funzione del tipo di terreno rinvenuto nei sondaggi, al fine di stimare alcuni parametri geotecnici.

I valori di N_{SPT} , ricavati dalla somma dei numeri di colpi N_2 ed N_3 , sono stati normalizzati per tener conto dell'influenza del valore della tensione verticale efficace alla quota di esecuzione della prova, attraverso il fattore di correzione C_N , calcolato secondo la formula di *Liao e Whitman* (1986):

$$C_N = \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5}$$

dove:

σ'_0 è la pressione litostatica di riferimento, assunta pari a 100 kPa;

σ'_{v0} è la pressione verticale efficace alla quota della prova.

I valori di SPT normalizzati sono stati ottenuti considerando l'espressione seguente:

$$N_{norm} = C_N * N_{SPT}$$

Si fa presente che la maggior parte delle prove eseguite in corrispondenza dei terreni costituiti da ghiaie e ghiaie sabbiose (nel seguito indicati con la sigla GS), hanno fornito valori a rifiuto. In questi casi, nelle elaborazioni è stato considerato cautelativamente un valore di N_{SPT} pari a 60.

Per i terreni GS, nei primi 5 m di profondità dal p.c. la maggior parte dei valori di N_{SPT} varia nel campo 4 ÷ 35, mentre per profondità maggiori, fino a 20 m circa, varia da 25 a 60.

I terreni SG (sabbie ghiaiose) sono caratterizzati da valori compresi tra 30 e 60. Valori dello stesso ordine di grandezza si ottengono per le sabbie limose SL, mentre i limi sabbiosi presentano valori di N_{SPT} più bassi, compresi nell'intervallo 4 ÷ 37.

Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	$\sigma'v$ [kPa]	C _N	N _{norm}
S24	I1	9,40	-	4	14	23	37	188	0,73	27
S25	R2	6,00	-	6	7	5	12	120	0,91	11
S27	I1	10,70	-	4	10	11	21	214	0,68	14
S28	R1	3,00	-	2	2	2	4	60	1,29	5

Tabella 3 - Risultati delle prove SPT – Termini LS

Sondaggio	Campione	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	$\sigma'v$ [kPa]	C _N	N _{norm}
S1	R7	25,30	-	27	R	R	60	506	0,44	27
S14	R2	6,00	-	23	41	47	88	120	0,91	80
S28	R4	14,70	6,80	7	11	12	23	215	0,68	16
	R8	30,00		16	22	30	52	368	0,52	27

Tabella 4 - Risultati delle prove SPT – Termini SL

Sondaggio	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'_v [kPa]	C _N	N _{norm}
S2	3,00	-	27	R	R	60	60	1,29	77
S3	1,50	-	7	7	7	14	30	1,83	26
	4,50		R	R	R	60	90	1,05	63
S4	1,50	-	13	19	27	46	30	1,83	84
	4,60		31	50	R	60	92	1,04	63
S5	4,50	-	27	R	R	60	90	1,05	63
S8	3,00	-	34	50	R	60	60	1,29	77
S9	3,00	-	19	50	R	60	60	1,29	77
S11	1,50	-	12	13	21	34	30	1,83	62
	4,50		26	36	38	74	90	1,05	78
S12	3,00	-	7	11	13	24	60	1,29	31
S15	5,00	-	34	50	R	60	100	1,00	60
S16	1,60	-	17	33	47	80	32	1,77	141
	4,50		22	29	46	75	90	1,05	79
S19	1,50	-	4	4	3	7	30	1,83	13
	4,50		24	21	19	40	90	1,05	42
S20	3,00	-	7	7	14	21	60	1,29	27
S21	3,00	-	3	4	5	9	60	1,29	12
S22	3,00	-	6	8	10	18	60	1,29	23
S23	3,00	-	3	3	3	6	60	1,29	8
S24	2,00	-	3	4	4	8	40	1,58	13
	5,00		17	19	20	39	100	1,00	39
S25	3,00	-	5	5	5	10	60	1,29	13
S26	1,70	-	3	2	2	4	34	1,71	7
	4,70		3	4	5	9	94	1,03	9
S27	5,00	-	4	4	5	9	100	1,00	9

Tabella 5 - Risultati delle prove SPT – Termini GS' (profondità fino a 5 m circa dal p.c.)

Sondaggio	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'_v [kPa]	C _N	N _{norm}
S1	6,00	-	19	19	8	27	120	0,91	25
	9,00		25	R	R	60	180	0,75	45
	12,00		21	46	R	60	240	0,65	39
	15,00		23	R	R	60	300	0,58	35
S2	6,00	-	R	R	R	60	120	0,91	55
	9,00		R	R	R	60	180	0,75	45
	12,00		R	R	R	60	240	0,65	39
S3	7,50	-	R	R	R	60	150	0,82	49
	14,00		R	R	R	60	280	0,60	36
S4	6,30	-	R	R	R	60	126	0,89	53
	9,00		R	R	R	60	180	0,75	45
S5	6,00	-	21	R	R	60	120	0,91	55
	9,00		23	R	R	60	180	0,75	45
	12,00		R	R	R	60	240	0,65	39
	14,80		R	R	R	60	296	0,58	35
	20,00		29	R	R	60	400	0,50	30
	21,90		R	R	R	60	438	0,48	29
S7	6,00	-	12	19	R	60	120	0,91	55
	9,00		19	50	R	60	180	0,75	45
	11,80		21	50	R	60	236	0,65	39
	18,10		17	42	R	60	362	0,53	32
S8	6,00	-	50	R	R	60	120	0,91	55
	9,00		41	50	R	60	180	0,75	45
	12,00		15	12	10	22	240	0,65	14
	20,00		50	R	R	60	400	0,50	30
S9	6,00	-	50	R	R	60	120	0,91	55
	9,00		15	21	33	54	180	0,75	40
	15,20		39	50	R	60	304	0,57	34
	17,90		50	R	R	60	358	0,53	32
S10	6,00	-	11	39	R	60	120	0,91	55
	9,00		50	R	R	60	180	0,75	45
	12,00		50	R	R	60	240	0,65	39
	15,00		35	50	R	60	300	0,58	35
	20,00		50	R	R	60	400	0,50	30
S11	7,50	-	R	R	R	60	150	0,82	49
	10,50		29	R	R	60	210	0,69	41
	13,00		36	41	R	60	260	0,62	37
	18,10		R	R	R	60	362	0,53	32
	24,50		22	33	R	60	490	0,45	27
	27,50		29	34	41	75	550	0,43	32

Sondaggio	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'_v [kPa]	C _N	N _{norm}
S12	6,00	-	24	28	33	61	120	0,91	56
	9,00		21	34	41	75	180	0,75	56
	15,00		12	11	8	19	300	0,58	11
	18,00		18	20	19	39	360	0,53	21
	21,00		24	29	37	66	420	0,49	32
S13	6,00	8,80	16	27	31	58	120	0,91	53
	9,00		19	34	41	75	180	0,75	56
	15,00		23	42	R	60	238	0,65	39
	20,00		9	12	11	23	288	0,59	14
S14	9,00	6,70	30	44	R	60	157	0,80	48
	12,00		40	R	R	60	187	0,73	44
	15,00		18	23	21	44	217	0,68	30
	18,00		15	17	16	33	247	0,64	21
	21,00		16	14	15	29	277	0,60	17
S15	10,30	-	29	50	R	60	206	0,70	42
	15,00		31	50	R	60	300	0,58	35
S16	7,50	19,30	19	32	R	60	150	0,82	49
	10,50		20	27	44	71	210	0,69	49
	13,50		20	20	20	40	270	0,61	24
	18,00		21	23	26	49	360	0,53	26
	24,00		19	22	29	51	433	0,48	25
S19	7,50	-	R	R	R	60	150	0,82	49
	10,50		39	R	R	60	210	0,69	41
	13,50		13	12	11	23	270	0,61	14
	18,00		14	19	17	36	360	0,53	19
	24,00		19	22	23	45	480	0,46	21
S20	6,00	-	30	42	R	60	120	0,91	55
	9,00		28	44	R	60	180	0,75	45
	12,00		32	50	R	60	240	0,65	39
	18,00		29	50	R	60	360	0,53	32
S21	6,50	15,50	19	18	47	65	130	0,88	57
	9,50		22	41	R	60	190	0,73	44
	12,30		19	38	R	60	246	0,64	38
	19,50		16	27	35	62	350	0,53	33
	23,90		19	33	44	77	394	0,50	39
	28,90		15	26	33	59	444	0,47	28
S22	6,00	14,20	5	7	9	16	120	0,91	15
	9,00		14	19	24	43	180	0,75	32
	15,00		11	15	19	34	292	0,59	20
	20,00		13	15	22	37	342	0,54	20

Sondaggio	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'_v [kPa]	C _N	N _{norm}
S23	6,00	11,45	5	7	6	13	120	0,91	12
	9,00		14	13	21	34	180	0,75	25
	15,00		27	25	34	59	265	0,61	36
	18,00		11	16	18	34	295	0,58	20
S24	10,60	9,60	14	18	18	36	202	0,70	25
	15,00		13	14	13	27	246	0,64	17
S25	12,00	6,40	9	13	14	27	184	0,74	20
	29,00		14	19	27	46	354	0,53	24
S26	7,50	7,90	7	9	10	19	150	0,82	16
	10,50		9	13	13	26	184	0,74	19
	12,00		8	10	12	22	199	0,71	16
	13,50		9	14	17	31	214	0,68	21
S27	8,00	11,50	3	3	4	7	160	0,79	6
	19,50		13	13	13	26	310	0,57	15
	25,00		18	9	25	34	365	0,52	18
S28	6,00	6,80	6	11	7	18	120	0,91	16
	9,50		4	4	6	10	163	0,78	8
	12,00		5	8	10	18	188	0,73	13
	18,00		11	15	16	31	248	0,64	20
	27,00		15	20	24	44	338	0,54	24

Tabella 6 - Risultati delle prove SPT – Termini GS'' (profondità maggiori di 5 m dal p.c.)

Sondaggio	Prof. [m]	Prof. falda [m]	N ₁	N ₂	N ₃	N _{SPT}	σ'v [kPa]	C _N	N _{norm}
S1	20,00	-	19	R	R	60	400	0,50	30
S8	25,00	24,60	10	14	16	30	496	0,45	13
	28,00		16	21	24	45	526	0,44	20
S10	24,80	-	16	25	37	62	496	0,45	28
	28,20		24	42	R	60	564	0,42	25
S12	25,00	27,12	9	14	18	32	500	0,45	14
	29,00		19	27	39	66	561	0,42	28
S14	24,00	6,70	18	11	24	35	307	0,57	20
	27,00		19	24	26	50	337	0,54	27
S16	27,00	19,30	50	R	R	60	463	0,46	28
S19	27,00	24,40	12	21	28	49	514	0,44	22
S21	15,00	-	22	39	R	60	300	0,58	35
S24	20,00	9,60	22	32	37	69	296	0,58	40
S25	9,00	6,40	10	10	11	21	154	0,81	17
	15,00		9	15	14	29	214	0,68	20
	20,00		10	14	15	29	264	0,62	18
	24,00		18	29	38	67	304	0,57	38
S26	18,00	7,90	12	18	30	48	259	0,62	30
	24,00		14	24	21	45	319	0,56	25
	27,00		15	22	24	46	349	0,54	25
S27	15,00	11,50	6	10	9	19	265	0,61	12
	30,00		20	29	36	65	415	0,49	32
S28	24,00	6,80	16	19	22	41	308	0,57	23

Tabella 7 - Risultati delle prove SPT – Termini SG

Densità relativa D_R

Per la valutazione del grado di addensamento medio si è fatto riferimento alla relazione proposta da *Meyerhof* (1957) basata sui dati sperimentali di *Gibbs & Holtz* (1957), che fornisce il valore della densità relativa D_R in funzione del parametro N_{SPT} e della pressione verticale efficace agente al livello indagato con la prova SPT, secondo la seguente espressione:

$$D_R = 21 [N_{SPT}/(\sigma'_v + 0,7)]^{0,5}$$

con il valore di σ'_v è espresso in kg/cm^2 .

Generalmente la correlazione di *Meyerhof* risulta poco indicata per i terreni granulari più o meno grossolani, dal momento che si ottengono valori di D_R superiori all'80%, fisicamente non riscontrabili. Pertanto è stata utilizzata anche la formulazione proposta da *Skempton* (1986):

$$D_R = [N_{SPT}/(a + b \times \sigma'_v)]^{0,5}$$

dove:

- σ'_v = pressione verticale efficace agente alla quota della prova;
- a, b = costanti empiriche (pari rispettivamente a 43,3 e 21,7 per sabbie grosse normalconsolidate e 27,5 per sabbie fini).

I valori della densità relativa D_R ricavati con entrambe le correlazioni sono riportati nelle Figure 16 ÷ 19 in funzione della profondità.

Per le ghiaie sabbiose GS' e GS'' e per le sabbie ghiaiose SG i valori di D_R risultano dispersi in un ampio intervallo (30% ÷ 90%), mentre i valori disponibili per i termini SL variano dal 50% al 70%.

5.5 Resistenza al taglio

Resistenza a lungo termine

La valutazione dell'angolo d'attrito ϕ' , che caratterizza i terreni incoerenti, è stata ottenuta mediante:

- l'interpretazione delle prove SPT, utilizzando le usuali correlazioni della letteratura geotecnica;
- i risultati delle prove di taglio diretto e delle prove di compressione triassiale.

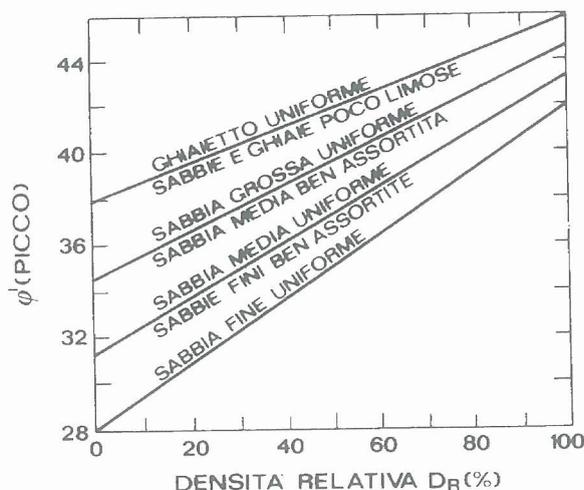
Nel primo caso sono stati utilizzati diversi approcci. Innanzitutto è stato adottato il *metodo di correlazione diretta RBS (Road Bridge Specification)*, che si basa sulla relazione:

$$\phi' = \sqrt{15 \cdot N_{norm}} + 15$$

dove N_{norm} è il numero di colpi normalizzato (v. tabelle 3 ÷ 7).

I valori dell'angolo d'attrito ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati tramite le *correlazioni di Schmertmann* (1978) in funzione del grado di addensamento D_R (v. figura sotto). In particolare, per i terreni in esame è stata considerata l'espressione relativa alle "Sabbie e ghiaie poco limose":

$$\varphi' = 38 + 0,08 \cdot D_R$$



Correlazione tra D_R e φ in funzione della granulometria (SCHMERTMANN, 1978)

I risultati delle elaborazioni sono riportati nella figure 20 ÷ 24, in funzione della profondità di indagine, suddivisi per tipo di terreno.

Per i terreni GS' e GS'', i valori di φ' ottenuti con l'approccio RBS variano in un ampio intervallo ($\varphi' = 25^\circ \div 45^\circ$). L'intervallo di variazione risulta più contenuto con la *correlazioni di Schmertmann* ($\varphi' = 40^\circ \div 48^\circ$).

Per i terreni SG, i valori di φ' risultano variabili nell'intervallo $30^\circ \div 45^\circ$. Valori piuttosto dispersi si ottengono per i termini LS e SL.

Per i materiali di riporto R si ricavano valori di φ' compresi tra 29° e 36° .

Passando ad esaminare i dati di laboratorio, da cinque prove di taglio diretto CD eseguite sui terreni GS (v. fig. 25) si ottengono valori della coesione efficace c' e dell'angolo d'attrito φ' rispettivamente pari a:

$$c' = 0; \quad \varphi' = 36^\circ.$$

Valori dell'angolo d'attrito maggiori di 35° si ottengono per i terreni SG e SL (v. figure 26, 27).

Per quanto riguarda i terreni LS, sono disponibili una prova di taglio CD (fig. 28) ed una prova di compressione triassiale CU. Le elaborazioni forniscono:

$$c' = 0 \div 40 \text{ kPa}; \quad \varphi' = 30^\circ \div 32^\circ.$$

Resistenza a breve termine

Per la valutazione della coesione non drenata c_u sono disponibili i risultati di:

- prove in foro SPT;
- misure della resistenza alla punta con penetrometro tascabile p_p all'atto del prelievo.

Per quanto riguarda i terreni LS, la coesione non drenata è stata stimata a partire dai risultati delle prove SPT con la *correlazione empirica di Stroud* (1974):

$$c_u = f_1 \cdot N_{SPT}$$

in cui f_1 è un coefficiente funzione dell'indice di plasticità, che assume valori compresi tra 3,5 e 6,5 kPa. Nel caso in esame, le elaborazioni (v. Tabella 8) sono state eseguite adottando un valore medio $f_1 = 4,4$ kPa.

Sondaggio	Prof. [m]	N_{SPT}	c_u [kPa]
S24-I1	9,4	37	163
S25-R2	6,0	12	53
S27-I1	10,7	21	92
S28-R1	3,0	4	18

Tabella 8 - Valori della coesione non drenata dei terreni LS ricavati dalle misure di NSPT

Sempre per i terreni LS, in Tabella 9 sono riassunti i risultati delle misure eseguite con penetrometro tascabile ed i corrispondenti valori di c_u ricavati adottando un coefficiente di correlazione k pari a 0,5 secondo la seguente relazione:

$$c_u = k * p_p$$

Sondaggio	Prof. [m]	P_p [kPa]	c_u [kPa]
S25	6,0	137-98-137	62
S26	8,0	118-186-118	70
S27	9,0	118-69-88	46

Tabella 9 - Valori della coesione non drenata dei terreni LS ricavati dalla pressione misurata alla punta del penetrometro tascabile

I valori di coesione non drenata ottenuti per i terreni LS sono presentati in funzione della profondità di indagine in figura 29.

5.6 Deformabilità

Modulo di Young E'

Per la determinazione del modulo elastico, in assenza di specifiche prove di laboratorio, si è fatto ricorso a correlazioni empiriche sulla base dei risultati delle prove SPT.

Un primo tipo di approccio è quello di *Jamiolkowski et al.* (1988). Secondo tale metodo, il modulo di Young “operativo” può essere assunto pari a quello corrispondente a tensioni dell’ordine del 25% di quelle a rottura.

Gli autori hanno proposto la seguente correlazione valida per terreni normalconsolidati:

$$E'_{25} = (10,5 - 3,5 * D_R) * N_{SPT}$$

essendo E'_{25} = modulo di Young secante (espresso in kg/cm^2), cui corrisponde un grado di mobilitazione della resistenza ultima pari al 25%.

Tale percentuale è infatti quella normalmente riscontrabile nelle immediate vicinanze di strutture di fondazione calcolate per garantire un coefficiente di sicurezza nei confronti della rottura nell’ordine di 2,5÷3,0.

Per la determinazione del valore di E'_{25} sono stati considerati i valori di densità relativa ricavati con Skempton e i valori normalizzati N_{norm} (v. paragrafo 6.3).

Il valore del modulo di Young è stato determinato anche con la *formula di Denver* (1982):

$$E' = S_1 * N_{SPT} + S_2 \quad [MPa]$$

dove S_1 ed S_2 sono costanti, che assumono valori in funzione della granulometria e della litologia; in particolare, per sabbie e ghiaie normalconsolidate $S_1 = 0,756$ ed $S_2 = 18,75$ (*D'Apollonia et al.*, 1970).

Infine, una stima attendibile del modulo elastico E' a partire dai risultati delle prove SPT, si ottiene con la relazione seguente (rif. *Bowles* – “Fondazioni” – Mc Graw- Hill, 1991):

$$E' = C_1 * (N'_{55} + C_2) \quad [kPa]$$

dove C_1 ed C_2 sono coefficienti variabili in funzione del tipo di terreno ed N'_{55} si ricava a partire dal numero di colpi standard N'_{70} , calcolato, a partire dal valore N_{SPT} , con la seguente relazione:

$$N'_{70} = C_N * N_{SPT} * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

in cui:

- C_N è un coefficiente che tiene conto del sovraccarico, ed è calcolato secondo la formula di *Liao e Withman* (1986) riportata al paragrafo 6.3. I valori di C_N sono riportati nelle tabelle 3 ÷ 7;
- $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ sono fattori correttivi che dipendono rispettivamente dal tipo di maglio, dalla lunghezza della fune, dal tipo di sonda campionatrice e dal diametro del foro. Nel caso in esame, si è considerato un valore di η_1 pari a 0,857 ($\eta_1 = E_r/E_{rb} = 60/70$, essendo E_r il rapporto energetico medio e E_{rb} è il valore standard). I coefficienti η_2, η_3, η_4 sono invece stati considerati pari all’unità (rif. *Bowles* - Tab. 3.3).

Per passare da N'_{70} a N'_{55} si utilizza la seguente espressione (rif. *Bowles* - par. 3.7):

$$N'_{55} = (70/55) * N'_{70}$$

In corrispondenza di terreni ghiaiosi-sabbiosi, per $N_{SPT} > 15$, il modulo elastico E' si ricava mediante la seguente relazione (cfr. *Bowles* - Tab. 5.5):

$$E' = 600 * (N'_{55} + 6) + 2000 \quad [\text{kPa}]$$

Per le sabbie limose viene invece adottata la relazione (cfr. *Bowles* - Tab. 5.5):

$$E' = 300 * (N'_{55} + 6) \quad [\text{kPa}]$$

I valori del modulo di Young, ricavati con le diverse correlazioni, sono rappresentati graficamente nelle figure 30 ÷ 34.

Si osserva che i valori di E' ricavati con le correlazioni di N'_{55} e con la formula di *Jamiolkowski* sono ben correlabili fra di loro e generalmente più cautelativi dei valori ottenuti con la formula di Denver.

Modulo di compressione edometrica E_{ed}

I valori del modulo di compressione edometrica E_{ed} sono stati ricavati con la seguente formula, a partire dai valori del modulo di elasticità E' ricavati con la relazione di *Bowles*, assumendo per il coefficiente di Poisson ν il valore 0,3:

$$E_{ed} = E' \frac{(1 - \nu')}{(1 + \nu') \cdot (1 - 2\nu')}$$

I valori del modulo edometrico sono riportati in tabella 10 e rappresentati in figura 35 in funzione della profondità.

	UNITA'				
	GS'	GS''	SG	SL	LS
E_{ed} [MPa]	15 ÷ 40	20 ÷ 50	20 ÷ 40	10 ÷ 30	10 ÷ 15

Tabella 10 - Valori del modulo edometrico E_{ed}

Modulo di deformazione M_d

Il modulo di deformazione M_d ricavato dalle prove di carico su piastra è stato calcolato negli intervalli 0,05 ÷ 0,15 MPa e 0,10 ÷ 0,20 MPa.

I risultati sono riportati nelle tabelle 11 e 12.

Prova n.	Terreni	M_d [MPa]
1	R	30,30
2	GS	23,08
3	S	34,48

Tabella 11 – Risultati delle prove di carico su piastra – intervallo di pressione 0,05 ÷ 0,15 MPa

Prova n.	Terreni	M_d [MPa]
1	R	26,09
2	GS	20,41
3	S	30,00

Tabella 12 – Risultati delle prove di carico su piastra – intervallo di pressione 0,10 ÷ 0,20 MPa

Coefficiente di consolidazione c_v

I valori del coefficiente di consolidazione primaria c_v dei terreni LS sono stati desunti dallo studio geotecnico relativo alle fondazioni delle pile del viadotto di Rho, nell'ambito del progetto costruttivo della linea A.C. Torino–Venezia, Tratta Torino–Milano (rif. Relazione geotecnica A20124CF2RBV11TF5001B).

I valori di c_v si possono assumere pari rispettivamente a $3 \cdot 10^{-3}$ cm²/s per gli strati di limo più superficiali e $5 \cdot 10^{-3}$ cm²/s per quelli di limo mediamente profondi o profondi.

5.7 Rigidezza

Velocità di propagazione delle onde di taglio V_s

In assenza di misure dirette, la velocità di propagazione delle onde di taglio v_s è stata stimata sulla base dei risultati delle prove SPT, con la correlazione empirica proposta da *Ohta e Goto* (1978):

$$v_s = C \cdot (N_{60})^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \quad [\text{m/s}]$$

dove:

$$C = 67,3;$$

N_{60} è il valore di N_{SPT} corretto per un'energia pari al 60% di quella teorica;

z è la profondità (espressa in metri) dal piano campagna;

f_A è un coefficiente che dipende dall'età geologica del deposito (per depositi del Pleistocene $f_A = 1,3$);

f_G è un coefficiente che dipende dalla composizione granulometrica (1,45 nel caso delle ghiaie; 1,15 nel caso delle sabbie ghiaiose).

I valori delle velocità delle onde di taglio v_s forniti da tale relazione sono rappresentati in figura 36, in funzione della profondità dal p.c., per i terreni GS', GS'' e SG.

I grafici mostrano un quadro di generale uniformità delle caratteristiche stratigrafiche, con valori di v_s progressivamente crescenti con la profondità.

Le ghiaie sabbiose sono caratterizzate da valori di v_s variabili tra 200 e 350 m/s per i primi 5 m di profondità (GS') e tra 250 e 450 m/s, per profondità maggiori fino a 20 m circa (GS'').

Per le sabbie ghiaiose SG di base (profondità variabili da 20 m a 30 m circa) risultano valori di v_s compresi generalmente tra 300 e 400 m/s.

Modulo di taglio dinamico G_0

Il modulo di rigidezza a taglio "iniziale" o "dinamico" G_0 , cioè il modulo corrispondente alle piccole deformazioni tipicamente indotte dalle azioni dinamiche, è stato calcolato con la seguente relazione:

$$G_0 = \frac{\gamma_t \cdot v_s^2}{g}$$

dove:

γ_t è il peso dell'unità di volume del terreno (espresso in kN/m³);

v_s è la velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s.

I valori di G_0 sono rappresentati in fig. 37 in funzione della profondità dal piano campagna.

Si ricavano valori di G_0 variabili da 70 MPa a 250 MPa per i terreni GS' e tra 150 e 400 MPa per i termini GS''.

Nel caso delle sabbie ghiaiose SG si ottengono valori di G_0 variabili da 200 MPa a 350 MPa.

5.8 Permeabilità

In Tabella 13, sono riportati i valori del coefficiente di permeabilità k desunti dalle prove di permeabilità Lefranc a carico costante.

Le ghiaie sabbiose GS'' e le sabbie limose SL mostrano valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di 10⁻³ cm/s.

Valori di un ordine di grandezza inferiore si ottengono per le sabbie ghiaiose SG ($k \cong 10^{-4}$ cm/s). Valori ancora più bassi si deducono per i terreni LS ($k \cong 10^{-5}$ cm/s).

Sondaggio	Unità	Profondità [m]	Permeabilità [cm/s]
S4	GS''	10,3	$1,38 \cdot 10^{-2}$
S8	SG	28 ÷ 29	$2,82 \cdot 10^{-4}$
S10	SG	28,5 ÷ 29,1	$4,74 \cdot 10^{-4}$
S11	GS''	15,5 ÷ 16,0	$1,79 \cdot 10^{-3}$
S12	GS''	19,5	$4,41 \cdot 10^{-4}$
S14	GS''	22,0 ÷ 22,5	$1,73 \cdot 10^{-3}$
S16	GS''	24,0 ÷ 24,7	$1,17 \cdot 10^{-3}$
S19	SG	26,0 ÷ 27,0	$1,42 \cdot 10^{-4}$
S20	GS''	18,0 ÷ 18,7	$1,32 \cdot 10^{-3}$
S21	SG	15,5	$9,66 \cdot 10^{-3}$
S23	GS''	14,0 ÷ 15,0	$1,06 \cdot 10^{-3}$
S24	GS''	15,0	$5,17 \cdot 10^{-3}$
S26	LS	10,0 ÷ 10,5	$6,46 \cdot 10^{-5}$
S28	SL	14,0 ÷ 14,7	$3,40 \cdot 10^{-3}$

Tabella 13 - Risultati delle prove di permeabilità in foro

5.9 Falda

In Tabella 14 sono riportate le misure piezometriche disponibili, dedotte dalle stratigrafie di dettaglio e dalla Relazione Geologica di progetto.

Sondaggio	Tipo di piezometro	Località	Profondità falda ⁽¹⁾ [m da p.c.]	Profondità falda ⁽²⁾ [m da p.c.]	Profondità falda ⁽³⁾ [m da p.c.]
S8	a tubo aperto – 30m	Legnano (MI)	24,6	27,45	27,13
S10	-		25,1		-
S12	a tubo aperto – 30m	Canegrate (MI)	-	27,02	27,12
S13	-		8,8		-
S14	a tubo aperto – 30m	Parabiago (MI)	6,7	25,50	-
S16	-		19,3		-
S19	a tubo aperto – 30m	Parabiago (MI)	24,4	23,63	23,45
S20	-		18,3		-
S21	-		15,5		-
S22	-		14,2		-
S23	a tubo aperto – 20m	Vanzago (MI)	11,45	11,47	11,17
S24	a tubo aperto – 20m	Pregnana Milanese (MI)	9,6	5,65	5,69
S25	-		6,4		-
S26	a tubo aperto – 30m	Rho (MI)	7,9	6,50	6,67
S27	-		11,5		-
S28	a tubo aperto – 30m		6,8	6,70	6,90

(1): lettura al termine delle operazioni di perforazione

(2): letture del 5/2/2009 (3): letture del 5/3/2009 (rif. Relazione geol. MDL100D26RGGE0001001A)

Tabella 14 - Quadro delle letture piezometriche disponibili

6 RAPPORTI OPERE - TERRENI

I rapporti fra le opere ed i terreni sono stati ricostruiti nei profili geotecnici (elaborati MDL112D26F5GE0005001÷2A).

In tali profili si riportano la posizione dei sondaggi, l'indicazione dei sondaggi attrezzati con piezometro a tubo aperto, l'ubicazione delle prove SPT ed i relativi risultati, la posizione dei campioni prelevati durante le perforazioni.

E' indicata, inoltre, con simbologia diversa la profondità della falda rilevata durante le perforazioni e quella misurata con i piezometri agli inizi del 2009.

Nei profili sono riportati inoltre alcuni sondaggi realizzati durante precedenti campagne di indagine.

In generale, lungo l'intera tratta si osserva una sequenza stratigrafica abbastanza omogenea. In particolare, partendo dall'alto si distinguono:

- ✓ **Terreni di copertura** costituiti di riporto R e sabbie limose e sabbie ghiaiose S, per spessori di 2 ÷ 3 m, localmente anche maggiori di 4 m. A partire dalla stazione di Busto Arsizio, spostandosi in direzione Gallarate, gli spessori risultano più contenuti (1 ÷ 2 m).

Tali terreni risultano assenti nel tratto compreso tra il km 8+389.85 fino al km 9+817.33.

- ✓ Un **banco di ghiaia sabbiosa GS** che assume uno spessore medio di 20 m.

Nella zona di Rho si rinviene, all'interno dei terreni GS, un livello di limo sabbioso LS, a partire da una profondità di 8 ÷ 10 m dal p.c. e per uno spessore medio di 1 m circa. All'interno dei terreni GS si rinvencono, inoltre, lenti di ghiaia G:

- in corrispondenza del sondaggio S23;
- nell'area compresa tra il nuovo sottopasso ciclopedonale canale Villoresi al km 7+468 ed il sottovia di via Minghetti al km 8+700, a partire da una profondità di circa 8 m e per spessori di circa 3 m;
- più superficialmente (da circa 2 m dal p.c.) a partire dall'ultimo sottovia citato, fino al km 9+817.33, per spessori che possono essere compresi tra 2.5 e 3 m.

Più in generale su tutta la tratta si ha:

- nella zona della fermata di Legnano, a partire da profondità maggiori (12 ÷ 20 m);
- nell'area del sondaggio S8, a partire da 4 m dal p.c. e per spessori di circa 4 m;
- tra i sondaggio S3 ed S4 a partire da una profondità media di 9 m e per spessori di circa 6 m;
- in corrispondenza del sondaggio S1, in due livelli distinti, a partire, rispettivamente, da profondità di 1,3 m e 10 m e per spessori di circa 4 m e 8 m circa.

- ✓ **Sabbie ghiaiose SG** a profondità maggiori di 20 m. Tali terreni costituiscono i termini rinvenuti alla base di quasi tutti i sondaggi.

Più in generale per tutta la tratta, si ha:

- ✓ Livelli di circa 2 m di sabbia limosa SL si rinvencono nell'area del sondaggio S28, al tetto del banco, ed in corrispondenza del sondaggio S1, da circa 26 m di profondità.
- ✓ Una lente di limo sabbioso LS è presente nel sondaggio S5 a fondo foro.

Si fa presente che, la presenza delle diverse lenti di ghiaia G evidenziate nei profili geotecnici è stata dedotta sulla base di quanto riportato nella descrizione stratigrafica della PRO.MO.GEO. s.r.l., che spesso indica la presenza di elementi delle dimensioni maggiori di 5 – 6 mm.

7 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Con riferimento ai terreni che costituiscono il volume significativo ai fini del dimensionamento geotecnico delle opere in progetto, in Tabella 15 si riportano gli intervalli assunti per i principali parametri geotecnici.

Il valore del peso dell'unità di volume dei terreni superficiali R ed S è stato dedotto da dati di letteratura.

I parametri di resistenza al taglio sono stati ridotti, cautelativamente, rispetto a quanto risulta dalle elaborazioni effettuate, in considerazione dell'ampia dispersione dei valori ottenuti nel corso delle indagini. I parametri sono in linea, comunque, con i valori medi attribuibili ai terreni in esame.

In considerazione dei pochi dati disponibili, per i terreni LS, presenti prevalentemente nella zona di Rho, è stato considerato cautelativamente un intervallo di variazione di c_u tra 30 e 100 kPa. Per la caratterizzazione degli stessi terreni in termini di deformabilità, sono stati utilizzati i risultati di indagini eseguite in zone limitrofe, riportati nella Relazione Geotecnica del progetto costruttivo delle pile del viadotto di Rho.

Per quanto riguarda gli intervalli di variazione del modulo di Young per fondazioni ed opere di sostegno, sono stati assunti i valori ricavati con le correlazioni di N_{55} e quelli ottenuti con la formula di Jamiolkowski.

Per il calcolo dei cedimenti di fondazione dei rilevati, cautelativamente, sono stati adottati valori del modulo di Young operativo inferiori rispetto a quelli sopra citati.

Per la velocità delle onde di taglio e per il modulo dinamico sono stati adottati i valori ricavati dalla correlazione di Ohta e Goto.

I valori di N_{SPT} della ghiaia sabbiosa GS'' sono da ritenersi cautelativi, dal momento che molte prove SPT sono andate a rifiuto.

Parametri	TERRENI						
	G	GS'	GS''	SG	SL	LS	S/R
Profondità dal p.c. [m]	intercalate a GS	0 ÷ 5	5 ÷ 25	20 ÷ 25	20 ÷ 25	6 ÷ 12	0 ÷ 5
Peso di volume γ [kN/m ³]	20	19 ÷ 20.5	19 ÷ 20.5	20 ÷ 21	20 ÷ 21.5	20	18
Densità relativa D_r [%]	30 ÷ 80	40 ÷ 80	40 ÷ 80	40 ÷ 65	30 ÷ 60		
Angolo d'attrito operativo ϕ' [°]	38	35 ÷ 37	36 ÷ 38	32 ÷ 35	30 ÷ 32	25 ÷ 30	30
Coesione efficace c' [kPa]						10 ÷ 30	
Coesione non drenata c_u [kPa]						30 ÷ 100	
Velocità delle onde di taglio V_s [m/s]		200 ÷ 350	250 ÷ 450	300 ÷ 400			
Modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 [MPa]		70 ÷ 250	150 ÷ 400	200 ÷ 350			
Modulo di Young operativo per fondazioni [MPa]	40 ÷ 50	15 ÷ 40	30 ÷ 50	20 ÷ 40	18 ÷ 20	10 ÷ 20	
Modulo di Young operativi per opere di sostegno flessibili [MPa]	40 ÷ 50	15 ÷ 40	30 ÷ 50	20 ÷ 40	18 ÷ 20	10 ÷ 20	
Modulo di Young operativo per il calcolo dei cedimenti di fondazioni di rilevati [MPa]	30 ÷ 40	10 ÷ 30	20 ÷ 40	15 ÷ 35	10 ÷ 15	10 ÷ 15	10 ÷ 20
Modulo edometrico [MPa]		15 ÷ 40	20 ÷ 50	20 ÷ 40	10 ÷ 30	10 ÷ 15	
Valore di N_{SPT} di riferimento nel calcolo dei pali di fondazione [colpi/30cm]		4 ÷ 35	25 ÷ 60	30 ÷ 60			
Coefficiente di consolidazione primaria C_v [cm ² /s]						$3 \times 10^{-3}^{(1)}$ $5 \times 10^{-3}^{(2)}$	
Coefficiente di consolidazione secondaria c_α [%]						-	
Coefficiente di permeabilità k [cm/s]			10^{-3}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-5}	

Tabella 15 - Parametri geotecnici di riferimento

G = Ghiaia intercalata ai terreni GS

GS' = Ghiaia sabbiosa - livelli superficiali (0 ÷ 5)

GS'' = Ghiaia sabbiosa - livelli profondi (5 ÷ 25)

SG = Sabbia ghiaiosa

SL = Sabbia limosa

LS = Limo sabbioso

S = Sabbia limosa ghiaiosa superficiale

R = Riporto

(1) Valore valido per lo strato di limo più superficiale

(2) Valore valido per gli altri strati di limo mediamente profondi o profondi.

8 POTENZIALI CRITICITÀ

Nel presente capitolo vengono individuate le principali criticità individuate sulla base dei dati disponibili e delle elaborazioni condotte nel presente studio. È evidente che durante le fasi progettuali più avanzate sarà necessario verificare ed analizzare tali aspetti con maggiore dettaglio, al fine di chiarire con precisione le problematiche qui accennate.

In linea generale la tratta Rho - Gallarate della linea Rho - Arona si sviluppa in un contesto geologico caratterizzato da terreni a grana grossa di origine alluvionale.

L'ampliamento del corpo ferroviario richiede la realizzazione, principalmente, di rilevati in affiancamento a quelli esistenti.

Si rileva a partire dal piano di campagna e con continuità la presenza di materiali di riporto e/o di terreni di mediocri caratteristiche geotecniche, con spessori localmente superiori a 5 metri. La presenza di tali materiali richiederà interventi di bonifica, con asportazione dello strato superficiale per spessori dipendenti dall'altezza dei rilevati e sostituzione con materiali di buone caratteristiche meccaniche e drenanti.

Laddove le ghiaie G e le ghiaie sabbiose GS affiorano sul p.c., occorrerà prevedere opportune modalità di realizzazione delle opere provvisorie e delle fondazioni profonde.

Nell'area di Rho, la presenza di un livello di limo sabbioso LS alla profondità di 8 ÷ 10 m costituisce il letto di una locale falda sospesa. Questi ultimi terreni potranno costituire criticità solo per manufatti con fondazioni profonde. In tale zona, particolare attenzione dovrà essere posta nella realizzazione delle opere di regimazione e di smaltimento delle acque, al fine di evitare alterazioni della circolazione idrica e del locale assetto idrogeologico.

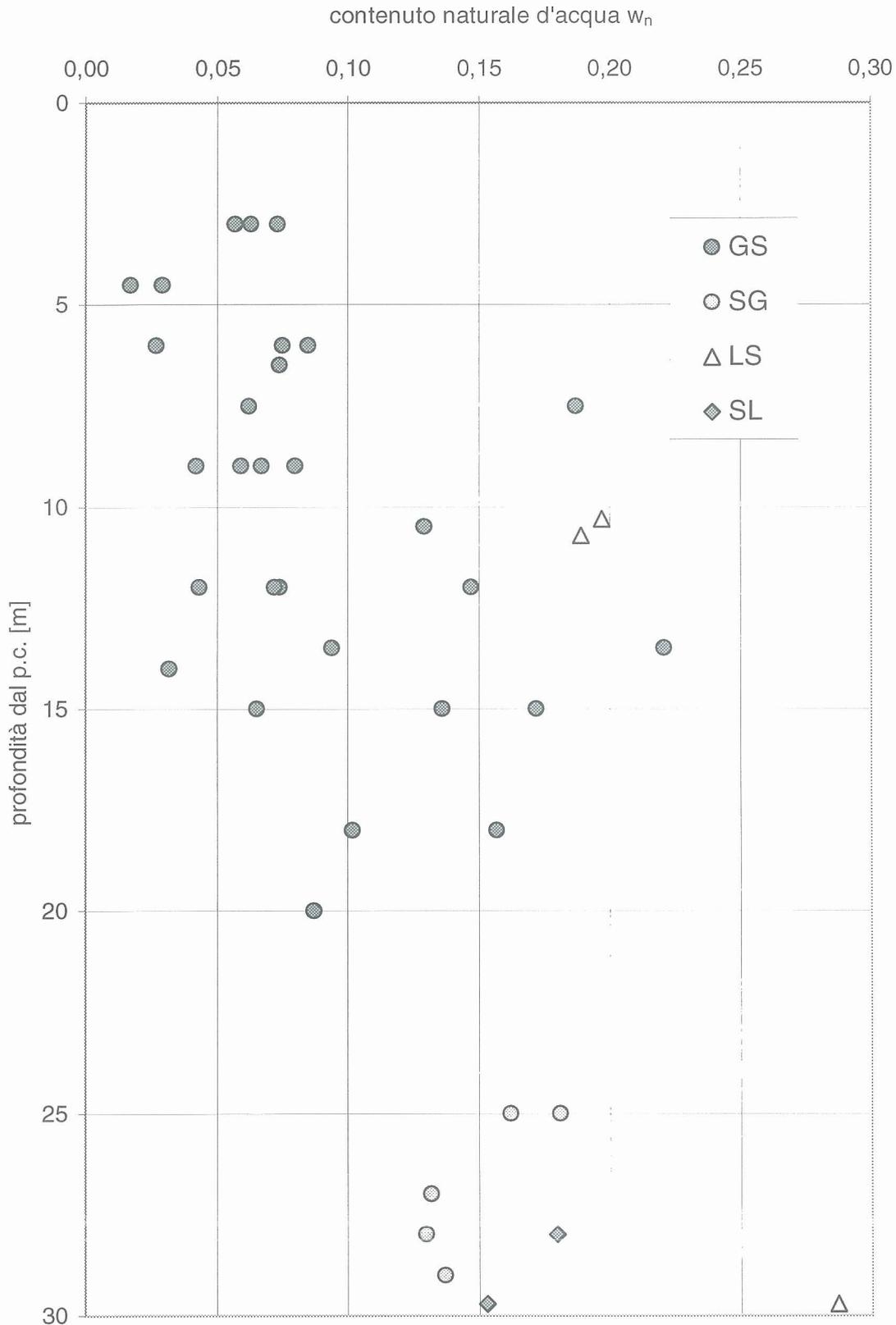


**POTENZIAMENTO DELLA LINEA RHO-ARONA
PROGETTO DEFINITIVO PER APPALTO INTEGRATO
QUADRUPPLICAMENTO RHO-PARABIAGO E RACCORDO Y**

RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
MDL1	12	D 26RB	GE 00 05 001	A	34 di 61

FIGURE



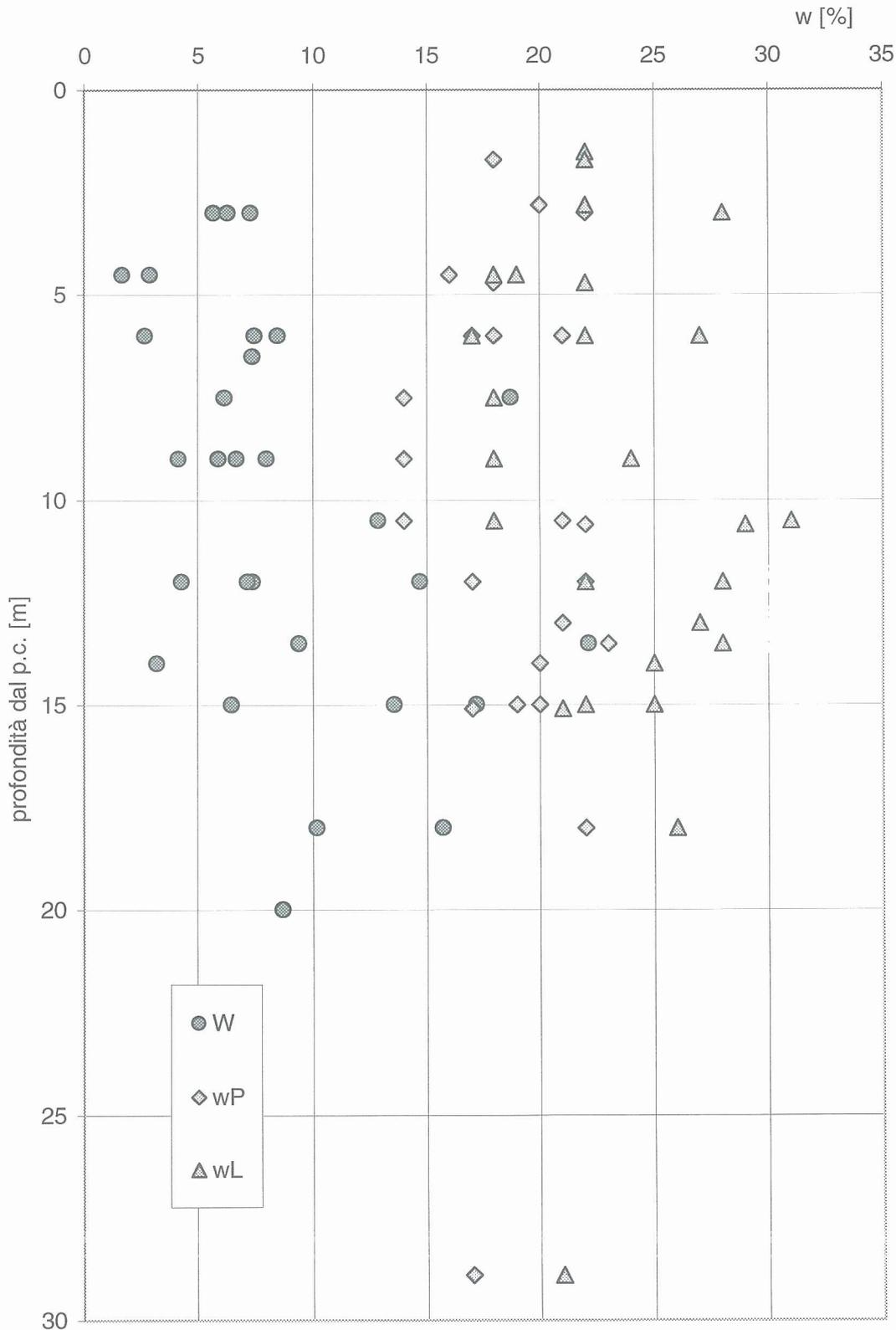


Figura 2 – Terreni GS – Contenuto d'acqua w e limiti di consistenza in funzione della profondità

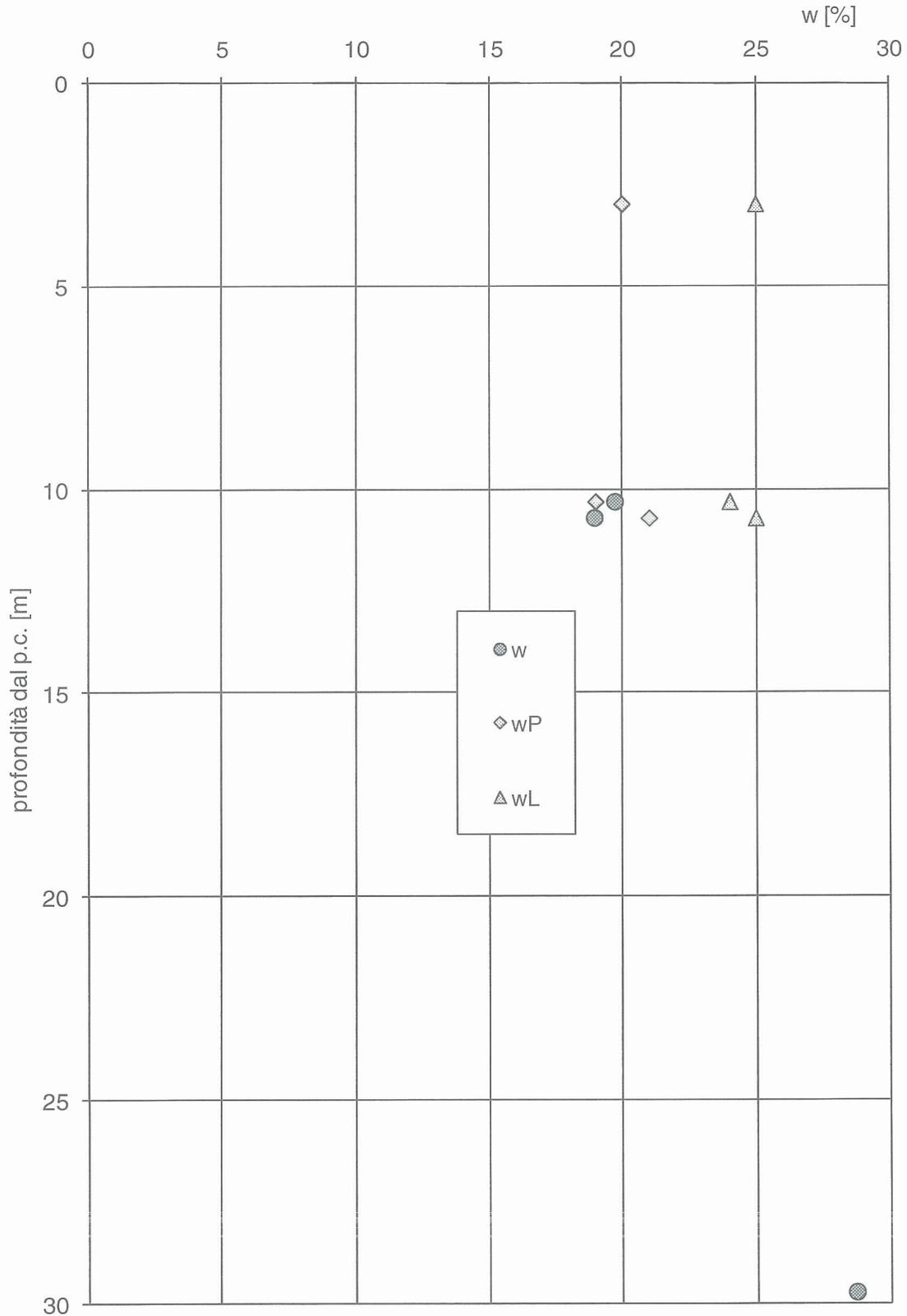


Figura 4 – Terreni LS – Contenuto d'acqua w e limiti di consistenza in funzione della profondità

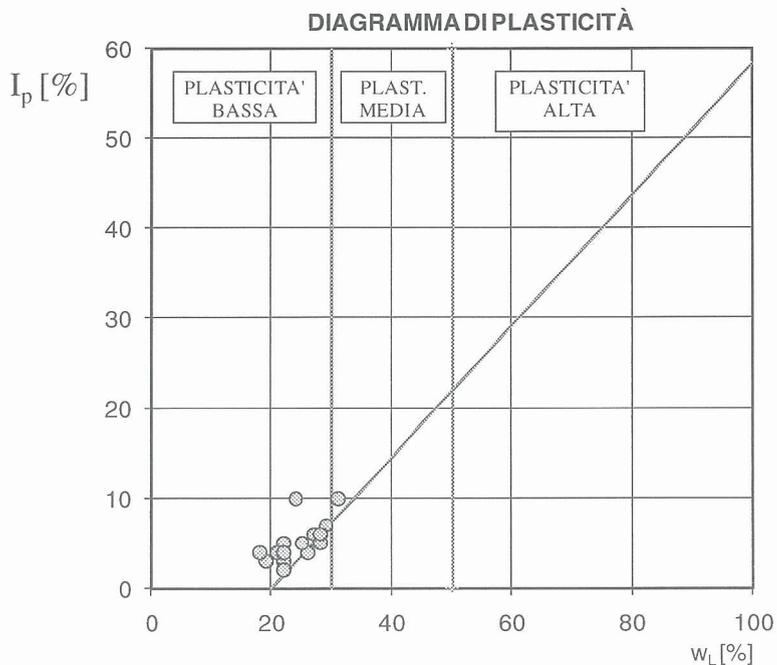


Figura 5 – Terreni GS – Diagramma di plasticità

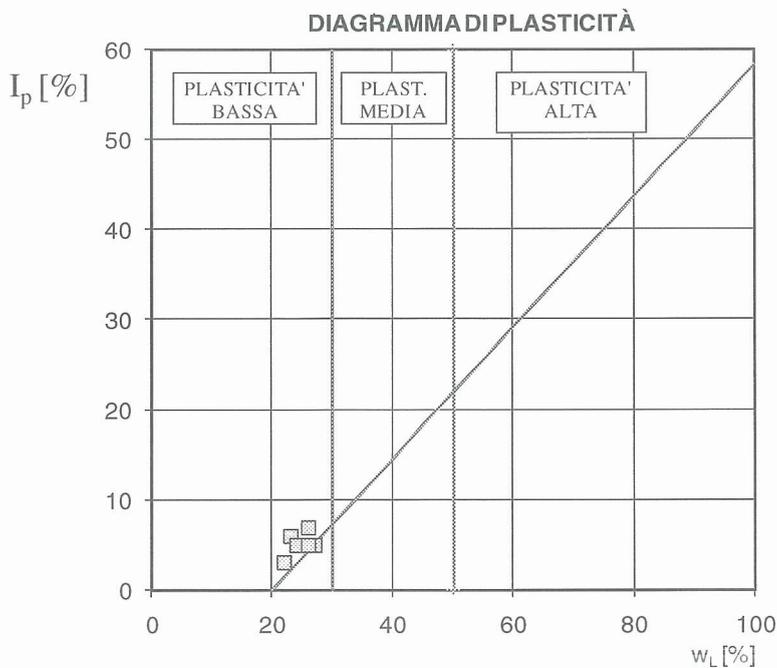


Figura 6 – Terreni SG – Diagramma di plasticità

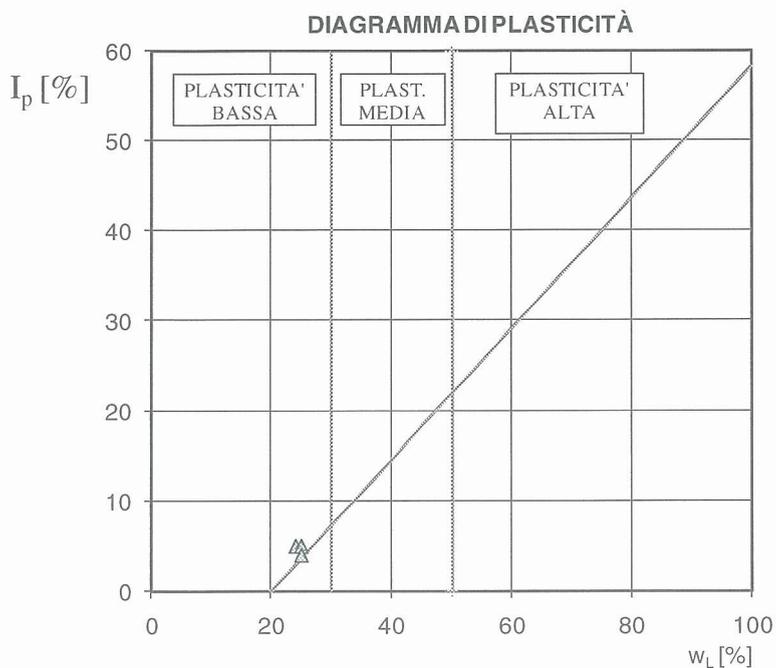


Figura 7 – Terreni LS – Diagramma di plasticità

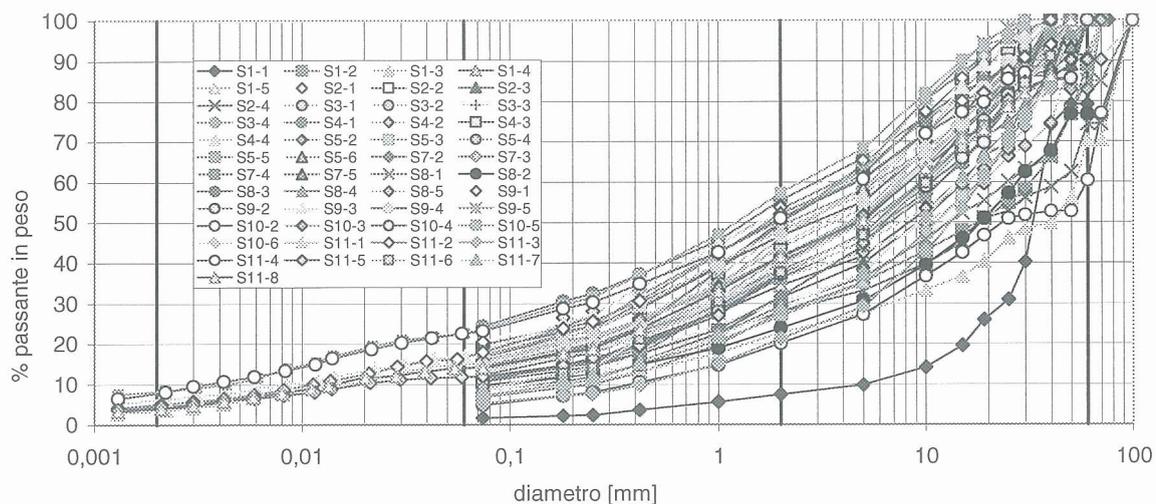


Figura 8 – Composizione granulometrica dei Terreni GS – Sondaggi S1 ÷ S11

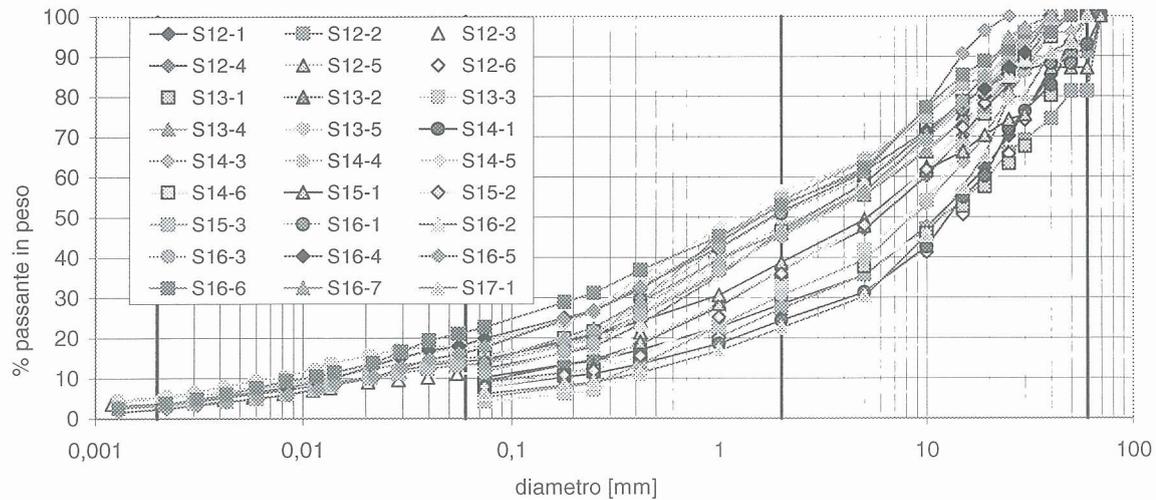


Figura 9 – Composizione granulometrica dei Terreni GS – Sondaggi S12 ÷ S17

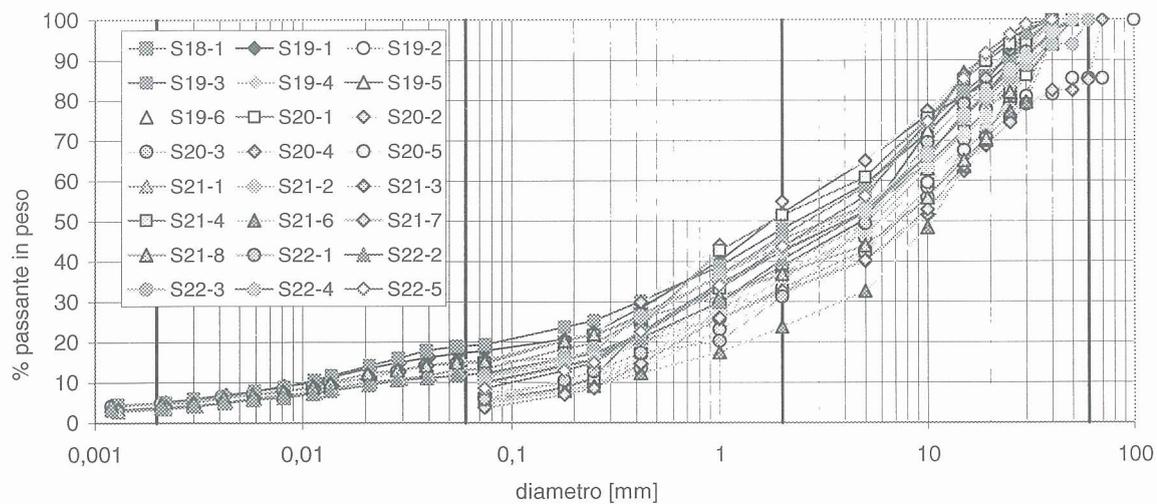


Figura 10 – Composizione granulometrica dei Terreni GS – Sondaggi S18 ÷ S22

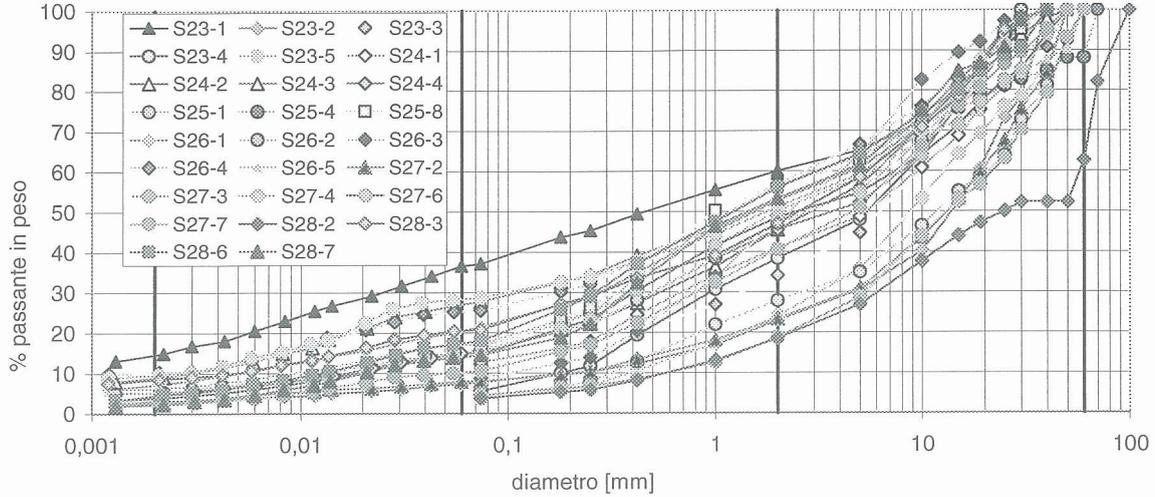


Figura 11 – Composizione granulometrica dei Terreni GS – Sondaggi S23 ÷ S28

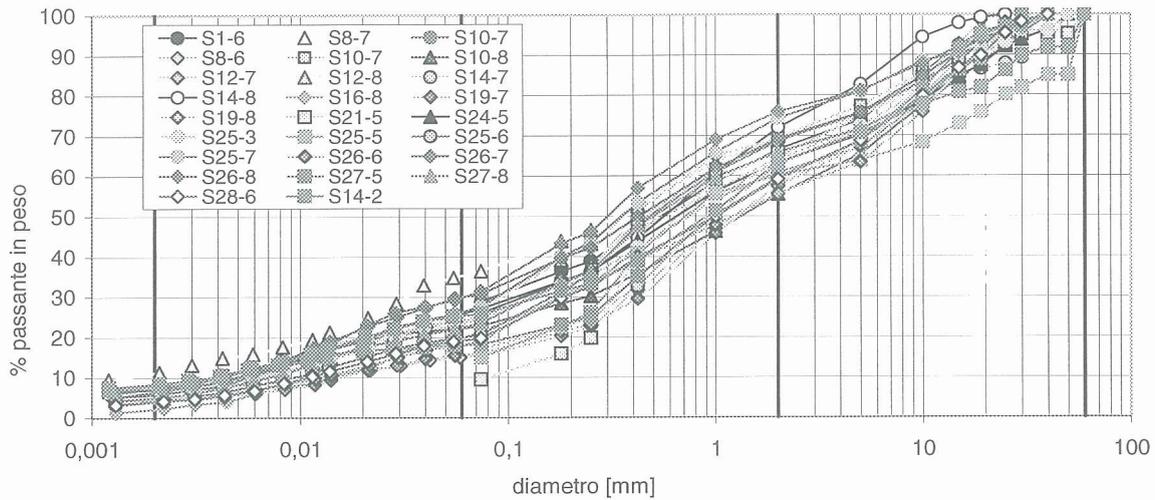


Figura 12 – Composizione granulometrica dei Terreni SG

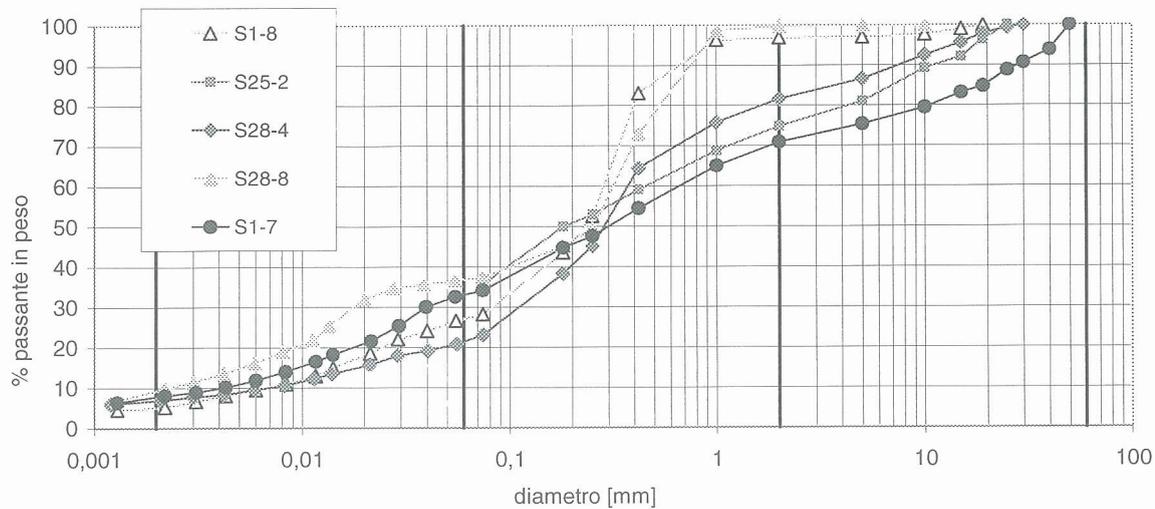


Figura 13 – Composizione granulometrica dei Terreni SL

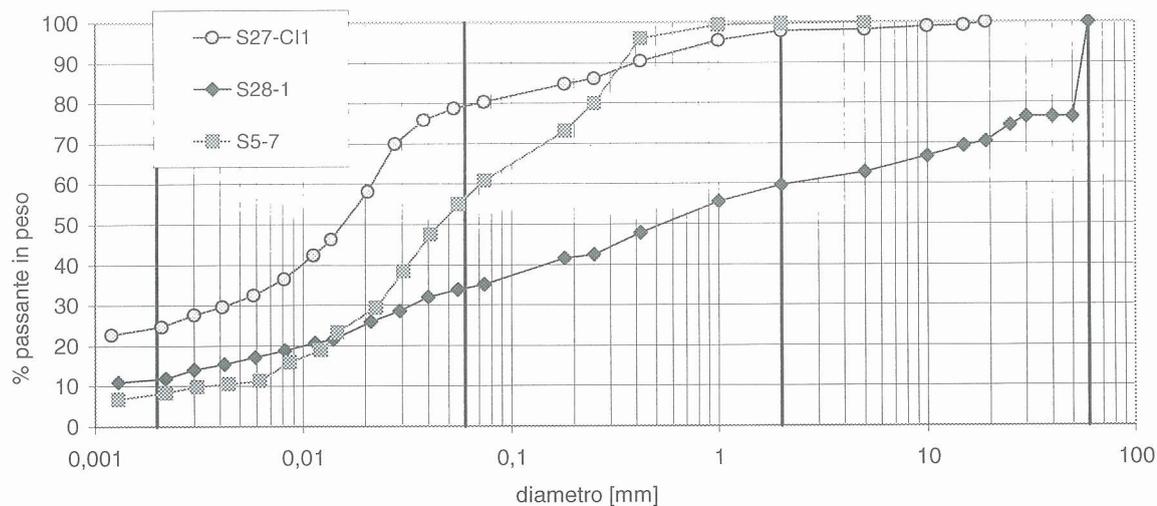


Figura 14 – Composizione granulometrica dei Terreni LS

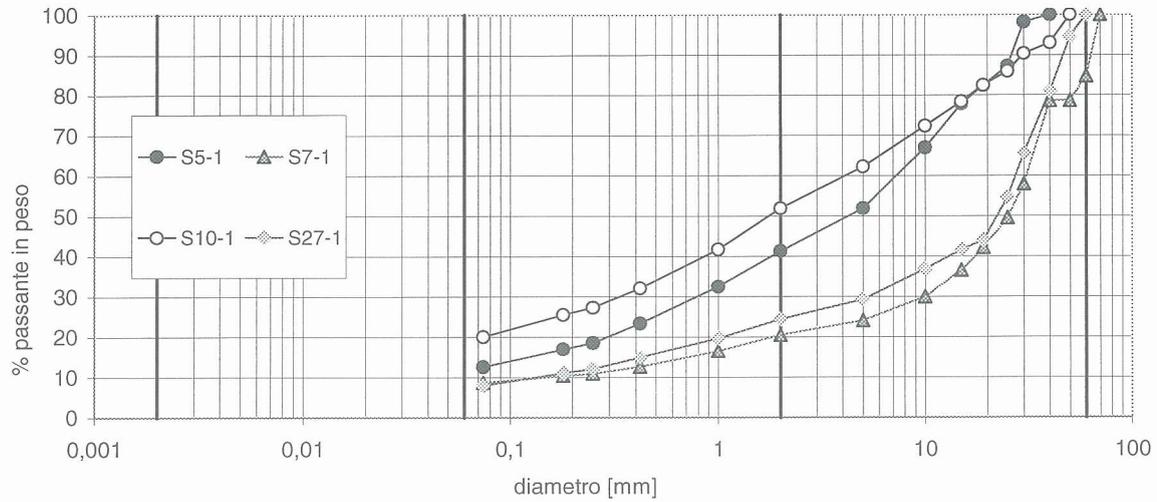


Figura 15 – Composizione granulometrica dei Terreni R

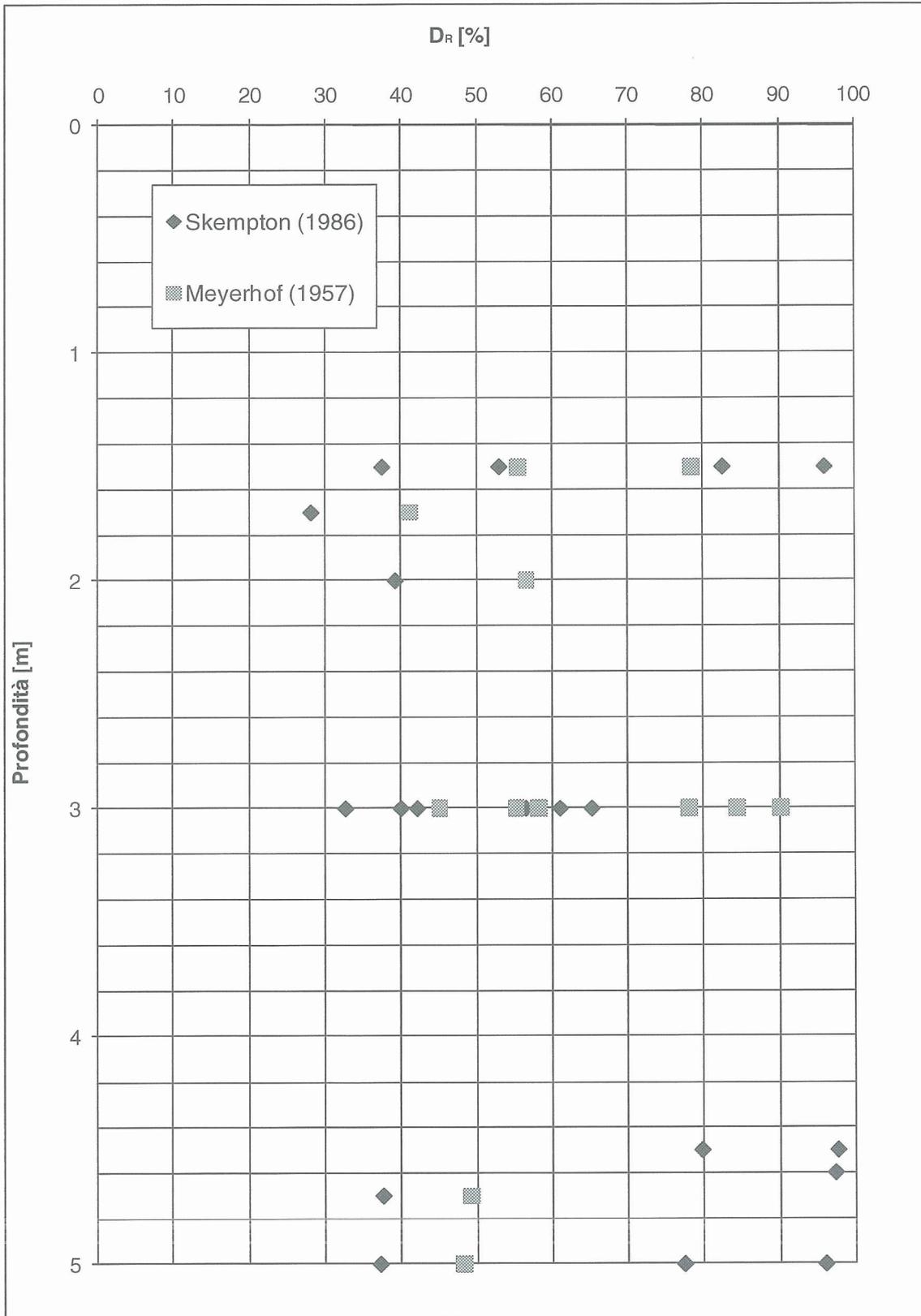


Figura 16 – Terreni GS' – Densità relativa ricavata dai risultati delle prove SPT

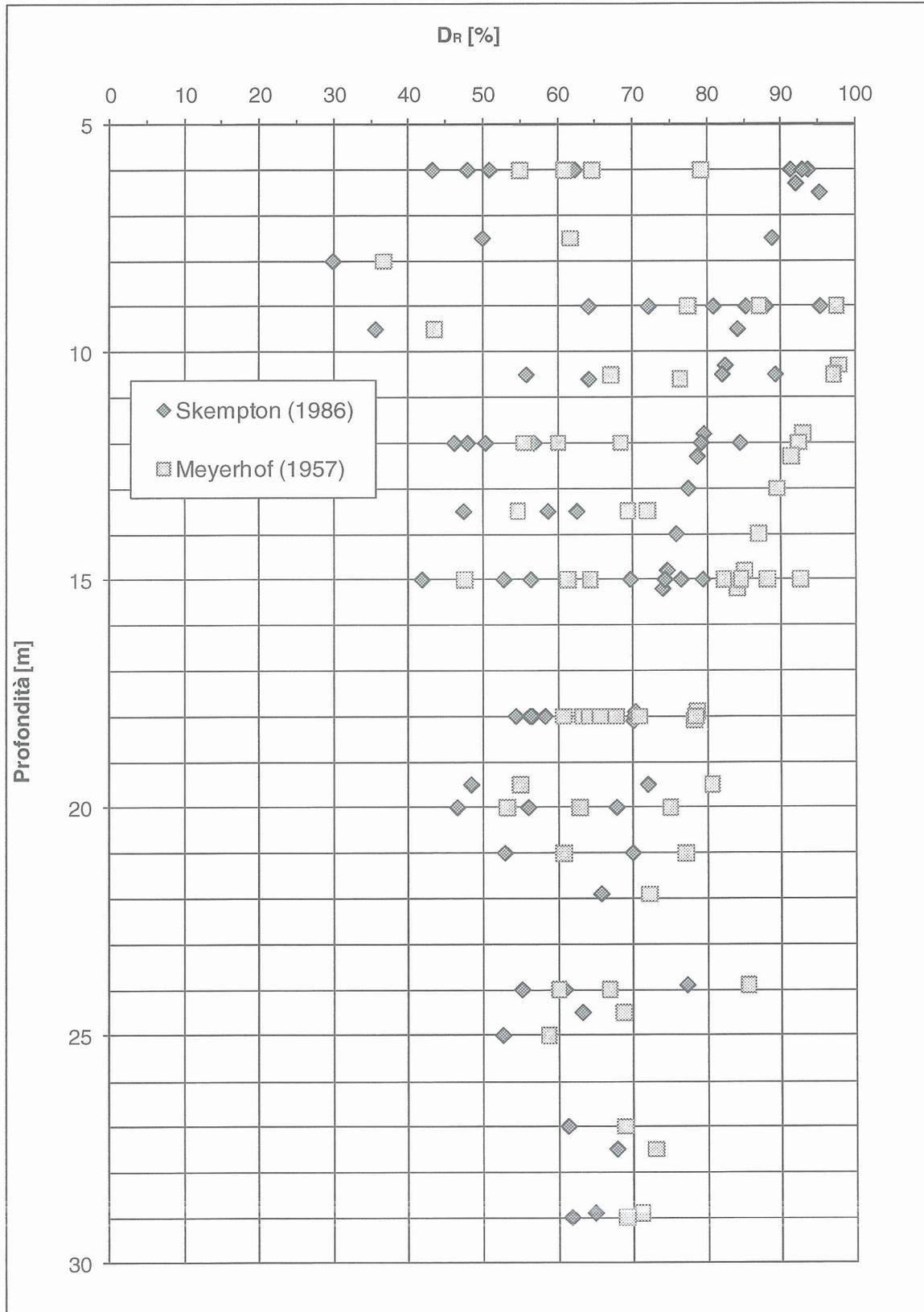


Figura 17 – Terreni GS'' – Densità relativa ricavata dai risultati delle prove SPT

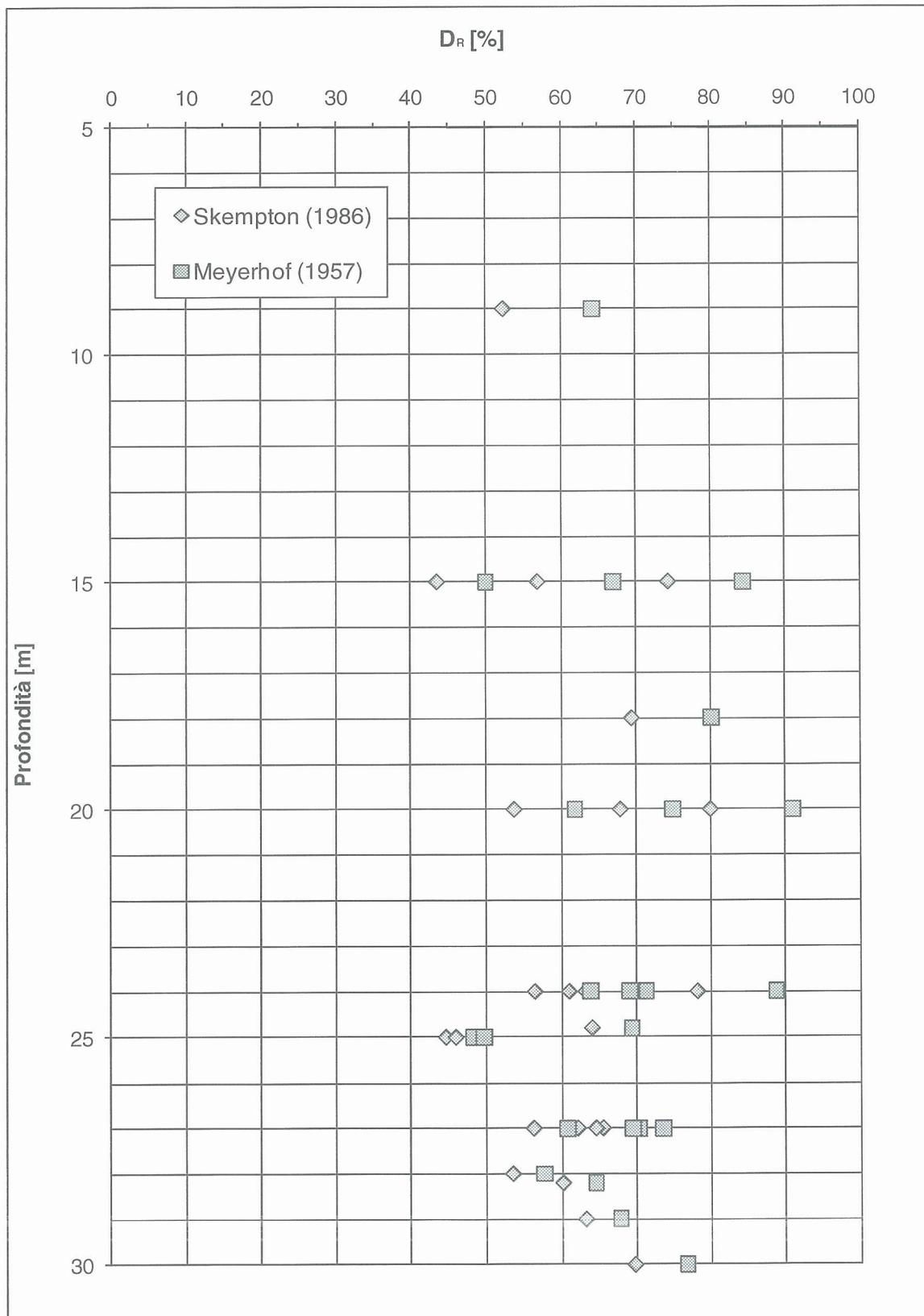


Figura 18 – Terreni SG – Densità relativa ricavata dai risultati delle prove SPT

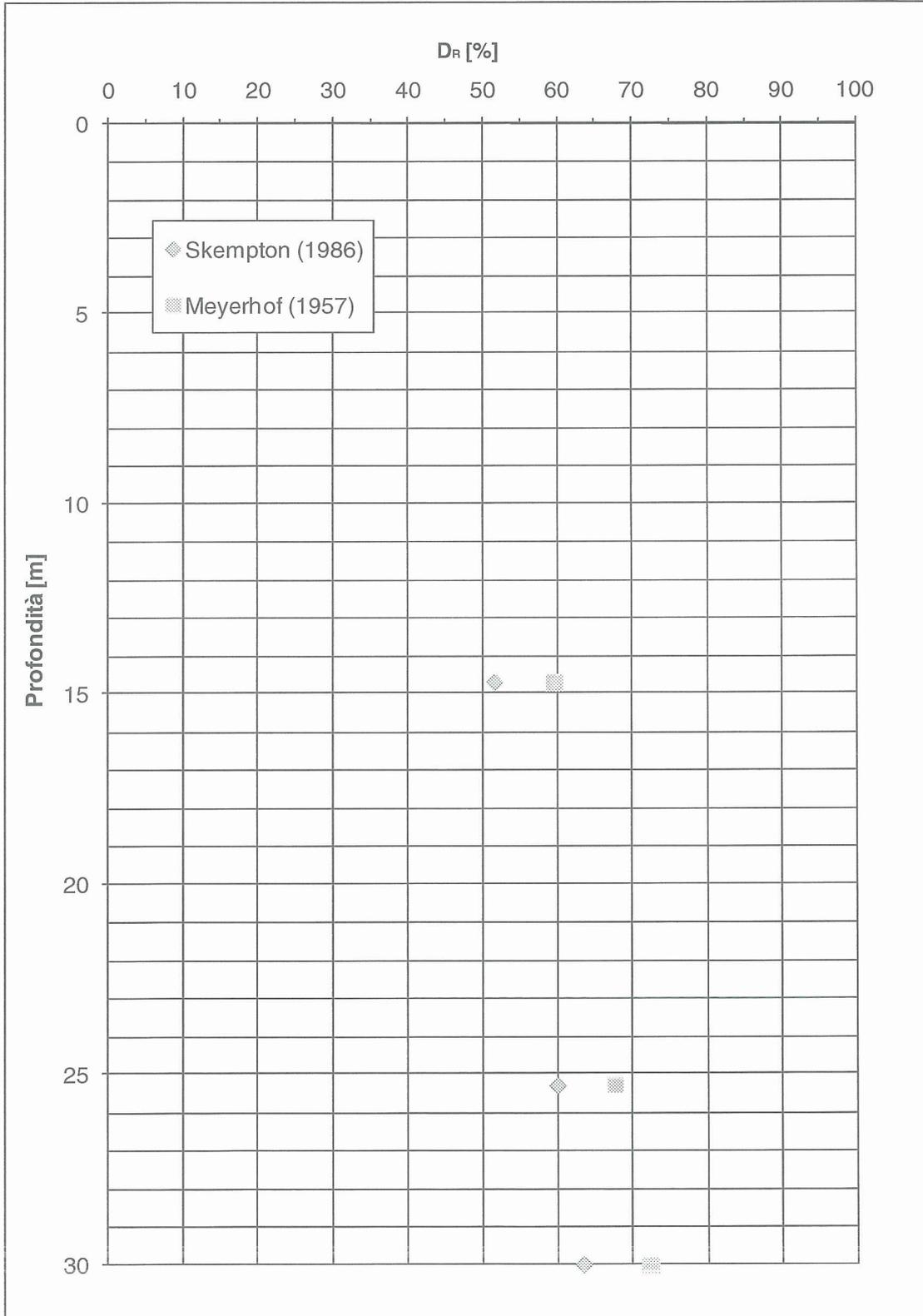


Figura 19 – Terreni SL – Densità relativa ricavata dai risultati delle prove SPT

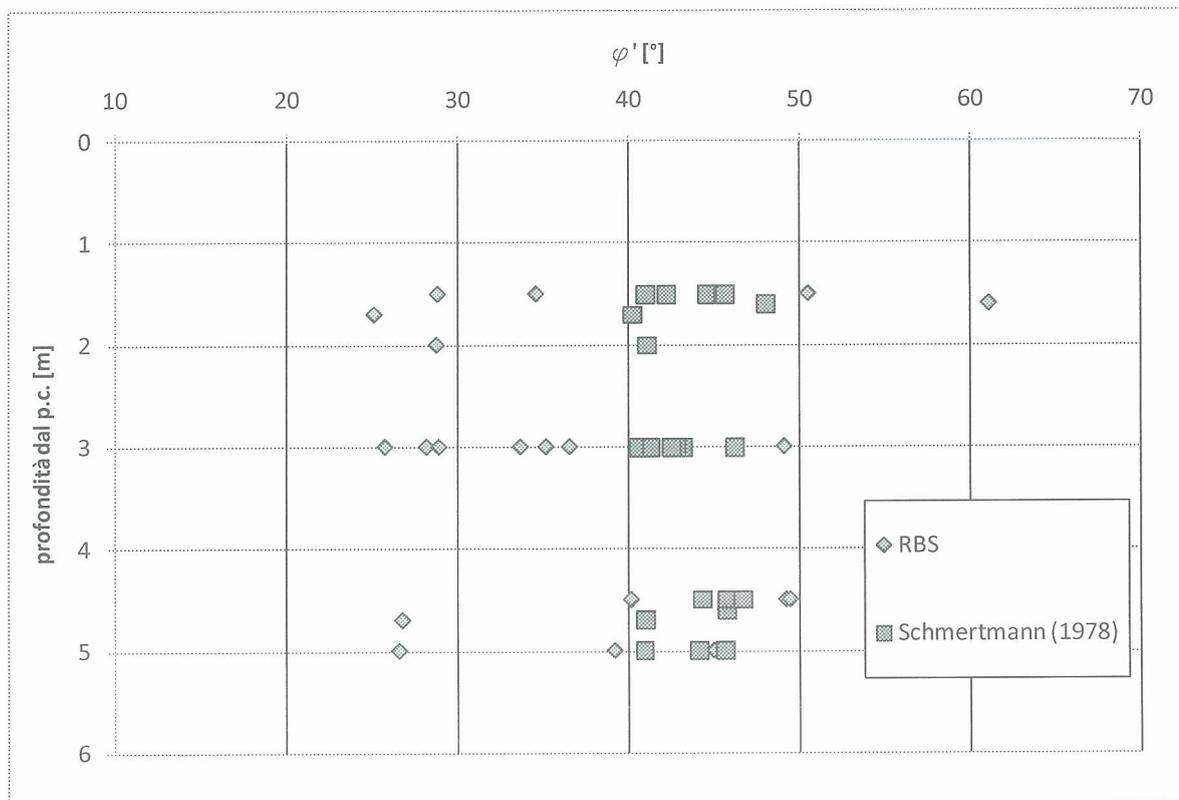


Figura 20 - Terreni GS' - Valori dell'angolo d'attrito dai risultati delle prove SPT

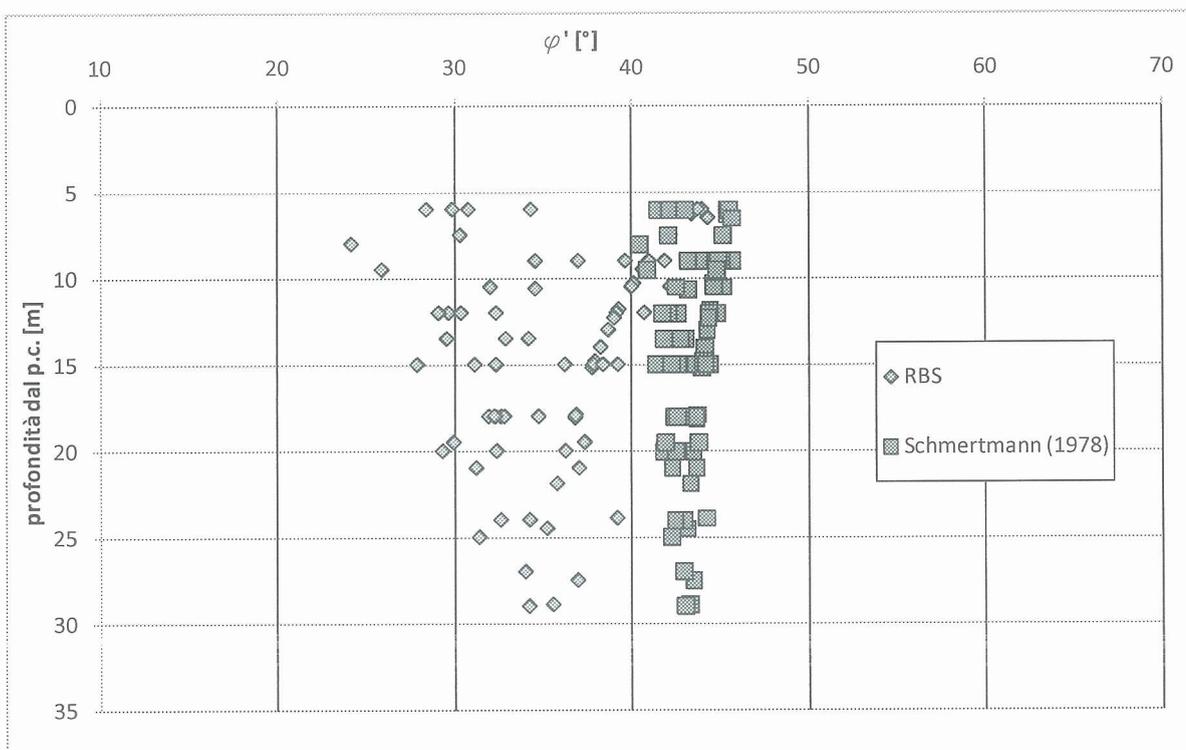


Figura 21 - Terreni GS'' - Valori dell'angolo d'attrito dai risultati delle prove SPT

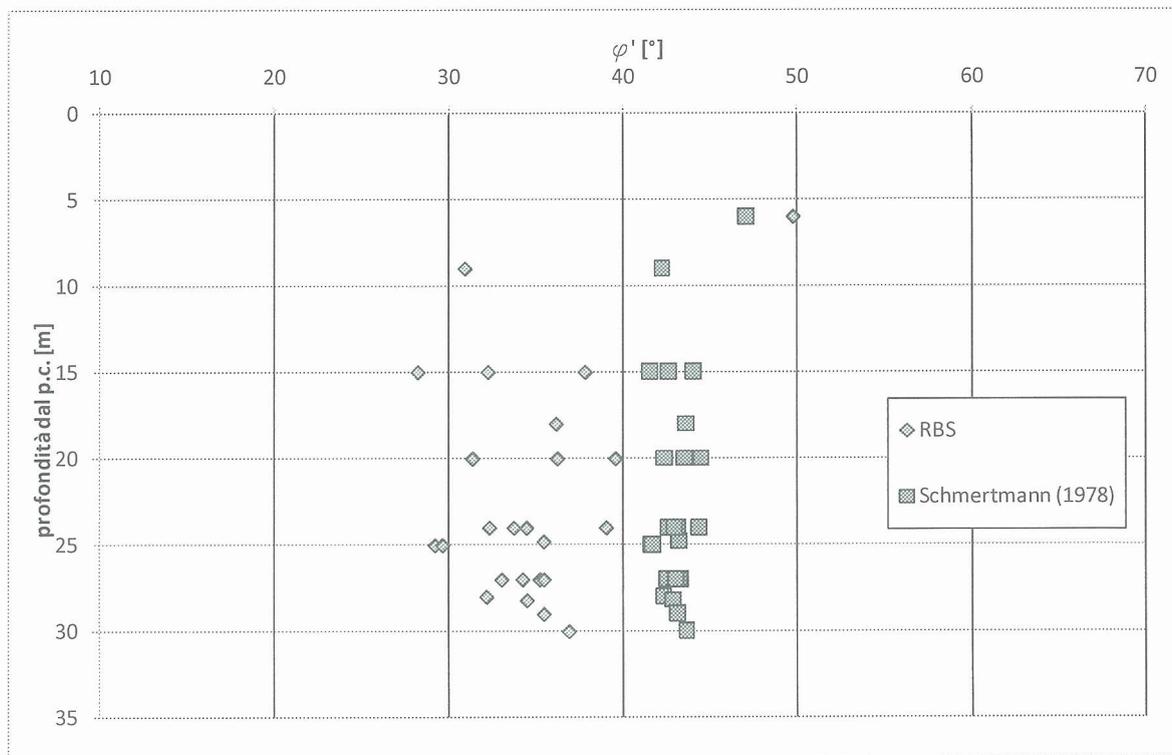


Figura 22 - Terreni SG - Valori dell'angolo d'attrito dai risultati delle prove SPT

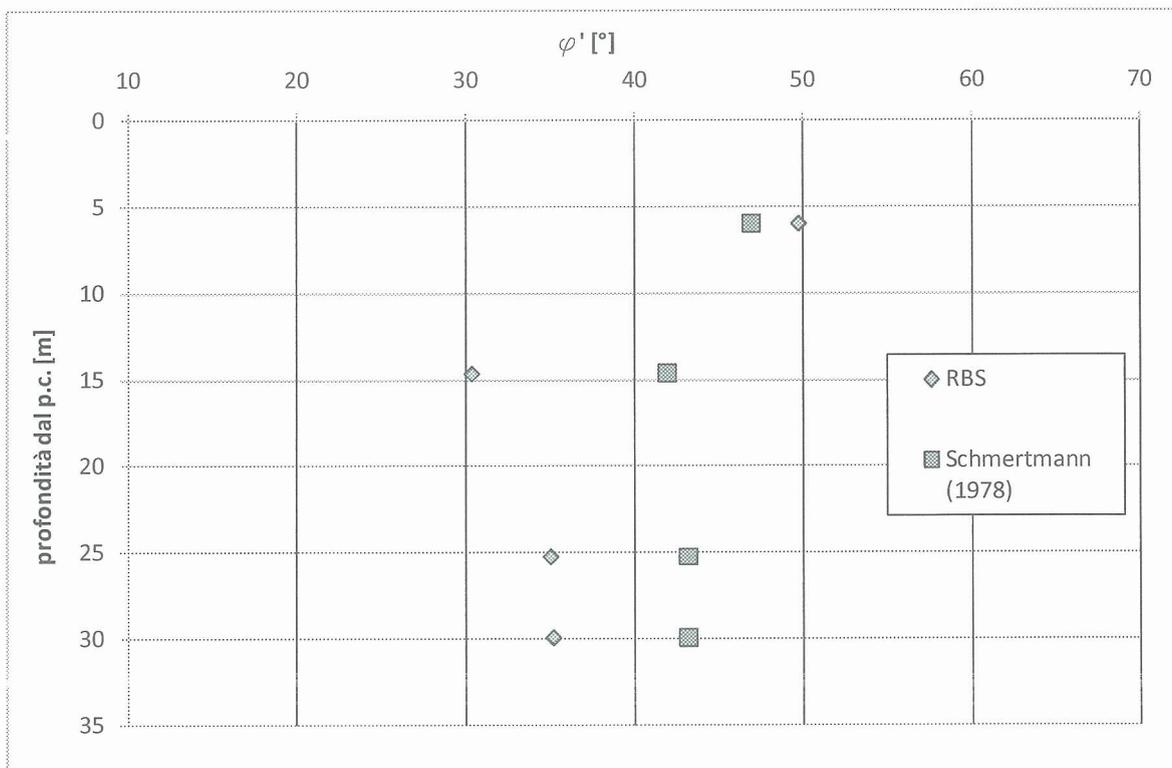


Figura 23 - Terreni SL - Valori dell'angolo d'attrito dai risultati delle prove SPT

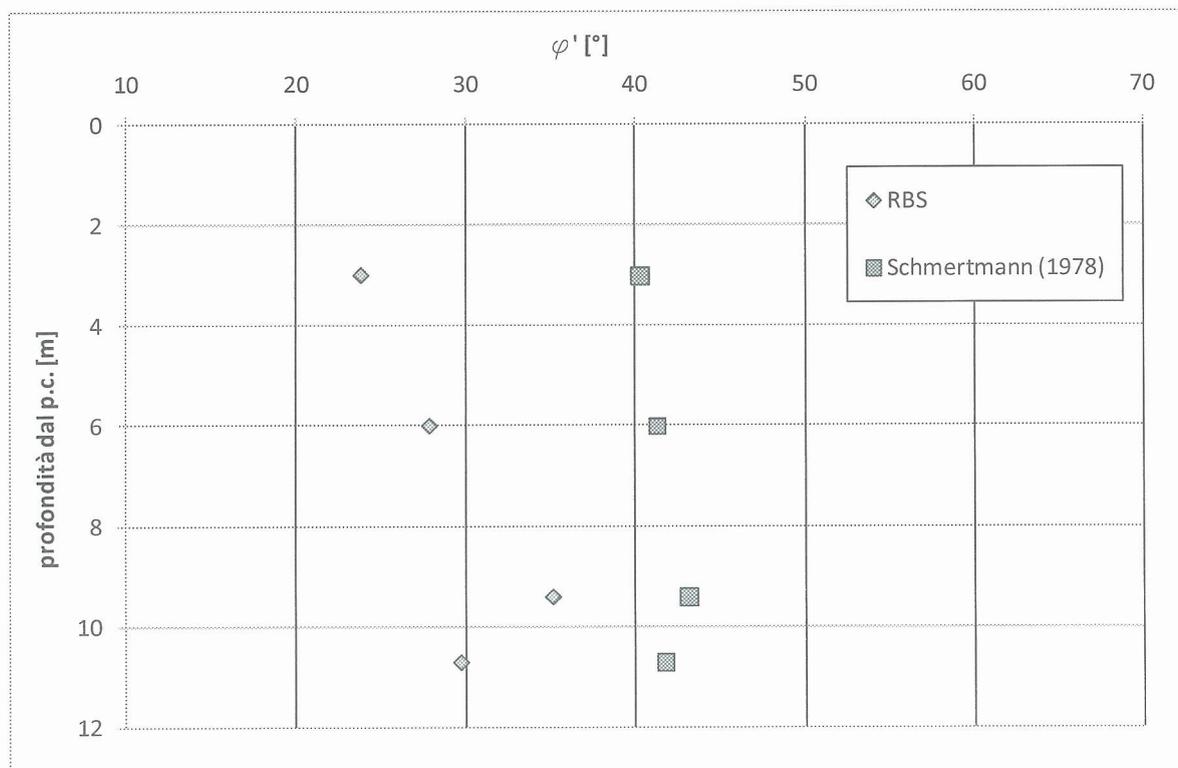


Figura 24 - Terreni LS - Valori dell'angolo d'attrito dai risultati delle prove SPT

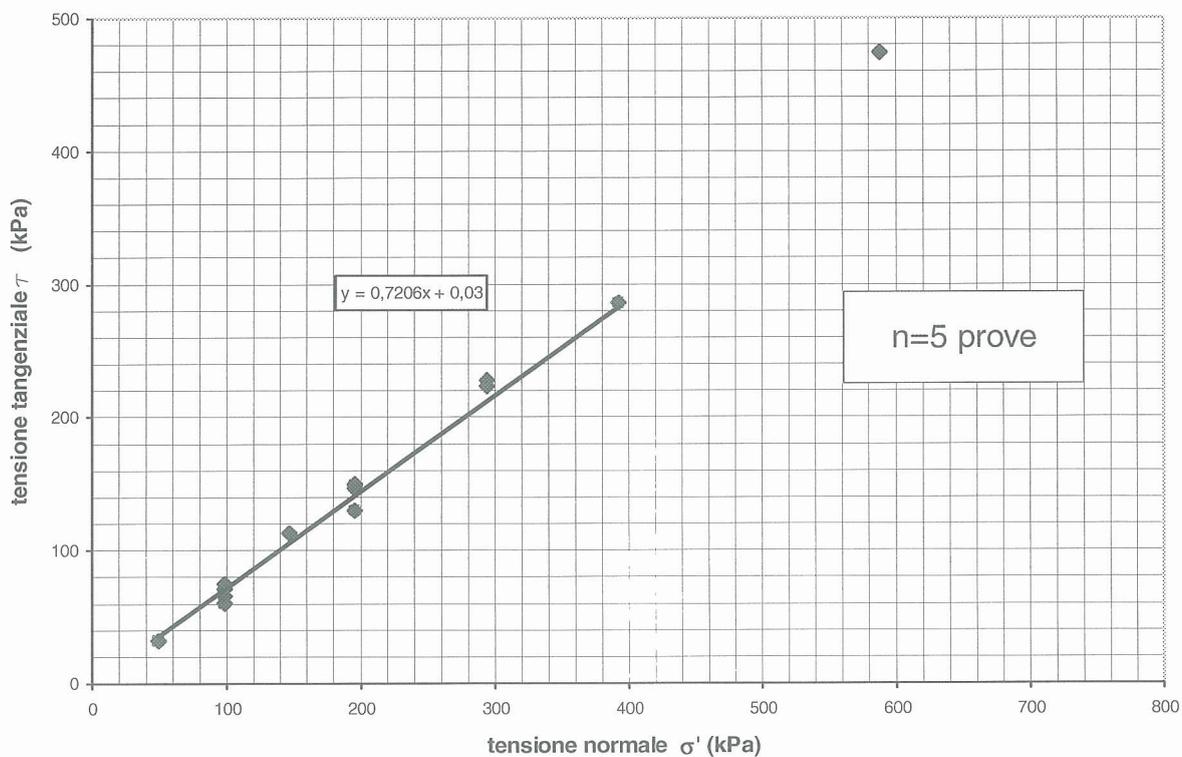


Figura 25 - Terreni GS - Risultati delle prove di taglio diretto CD

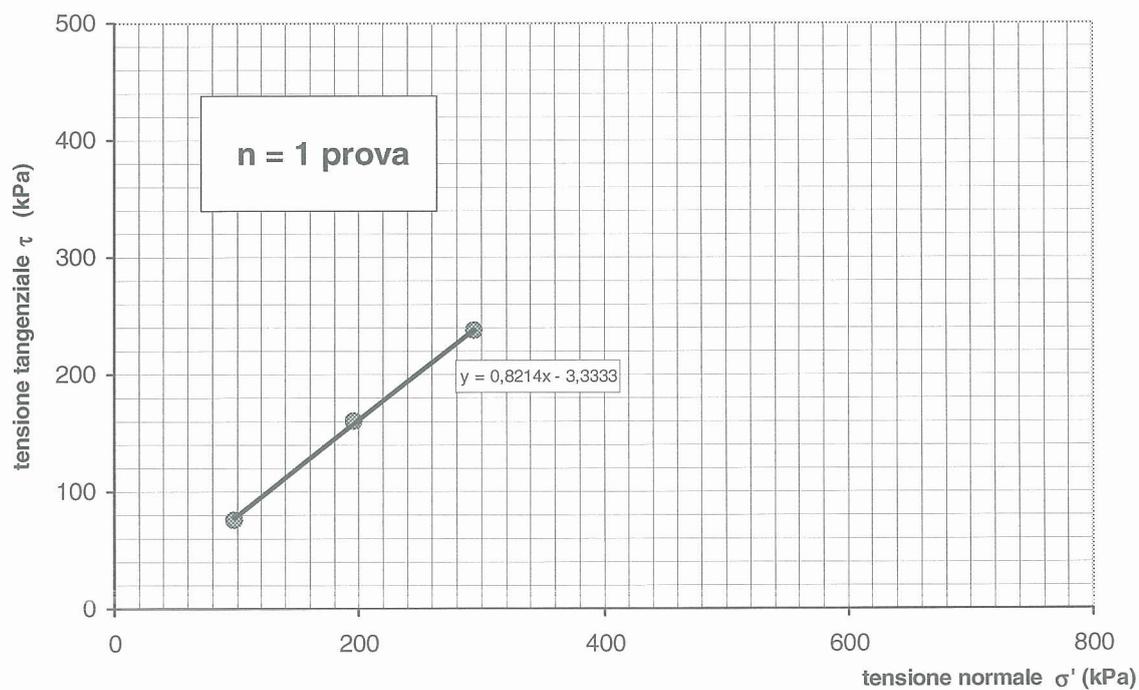


Figura 26 - Terreni SG - Risultati delle prove di taglio diretto CD

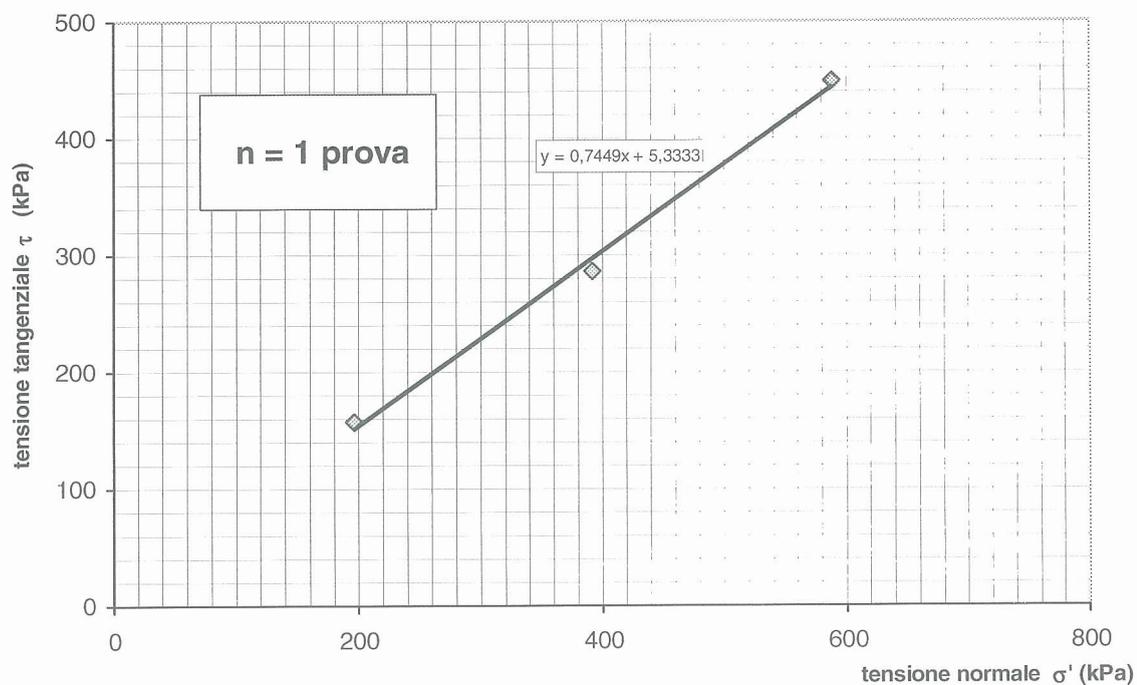


Figura 27 - Terreni SL - Risultati delle prove di taglio diretto CD

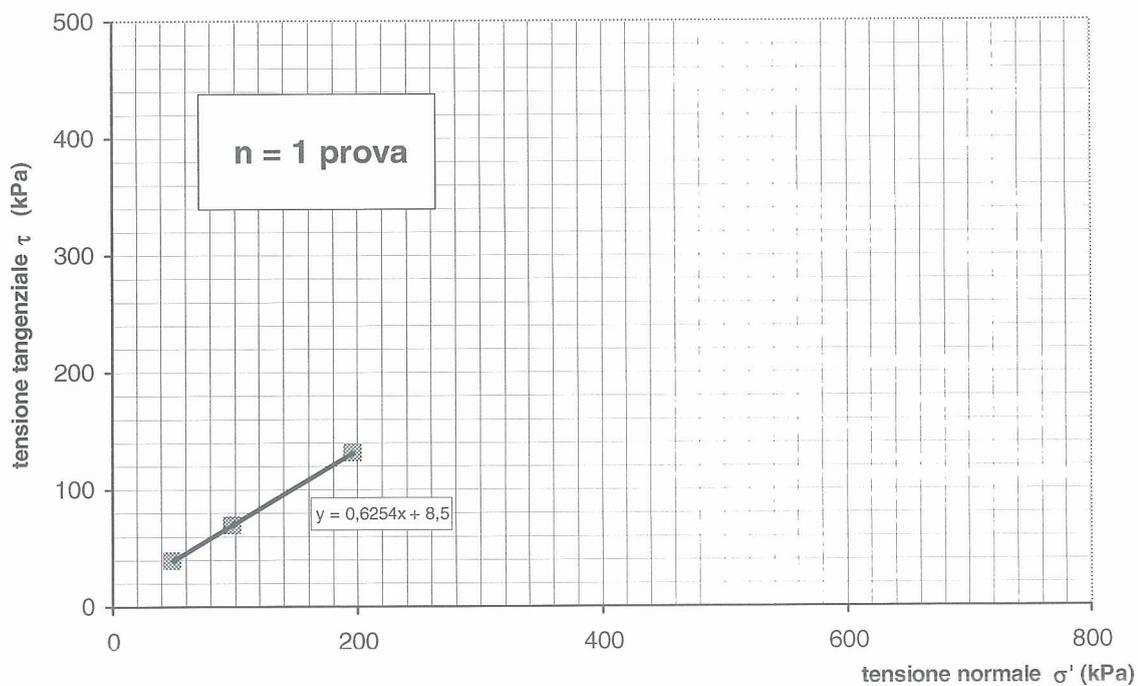


Figura 28 - Terreni LS - Risultati delle prove di taglio diretto CD

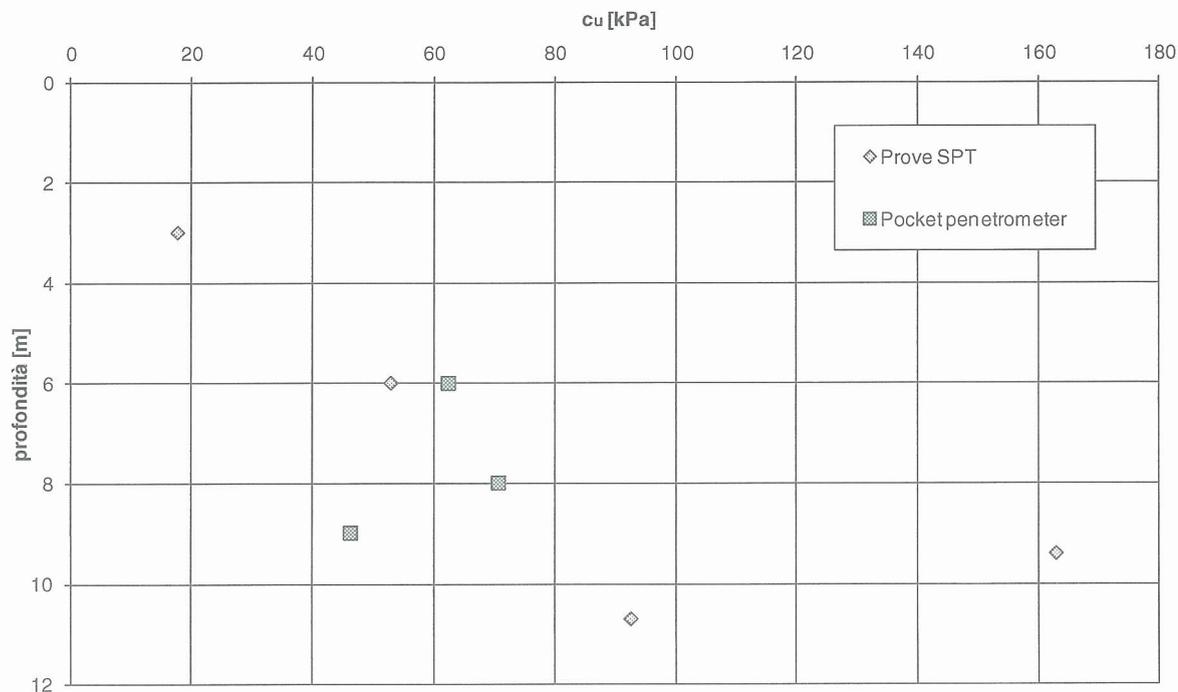


Figura 29 - Terreni LS - Valori della coesione non drenata cu in funzione della profondità

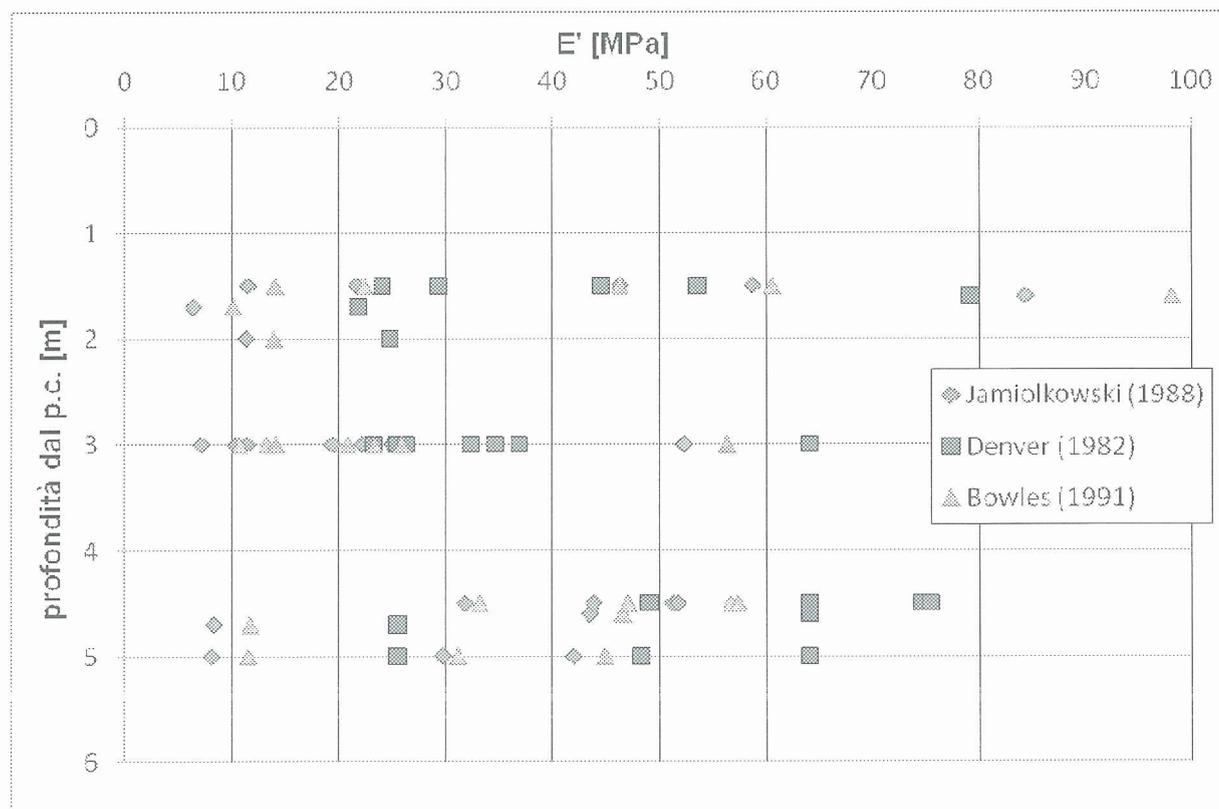


Figura 30 - Terreni GS' - Valori del modulo di Young E' da prove SPT

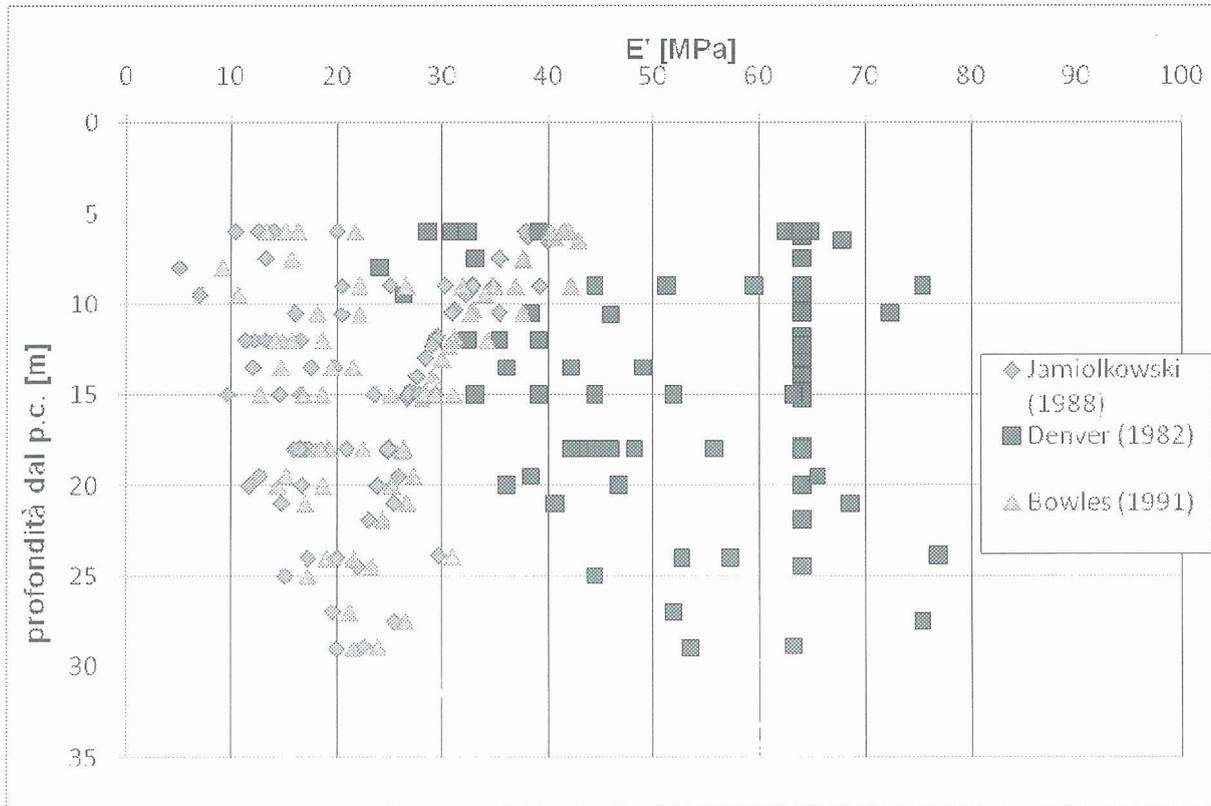


Figura 31 – Terreni GS'' - Valori del modulo di Young E' da prove SPT

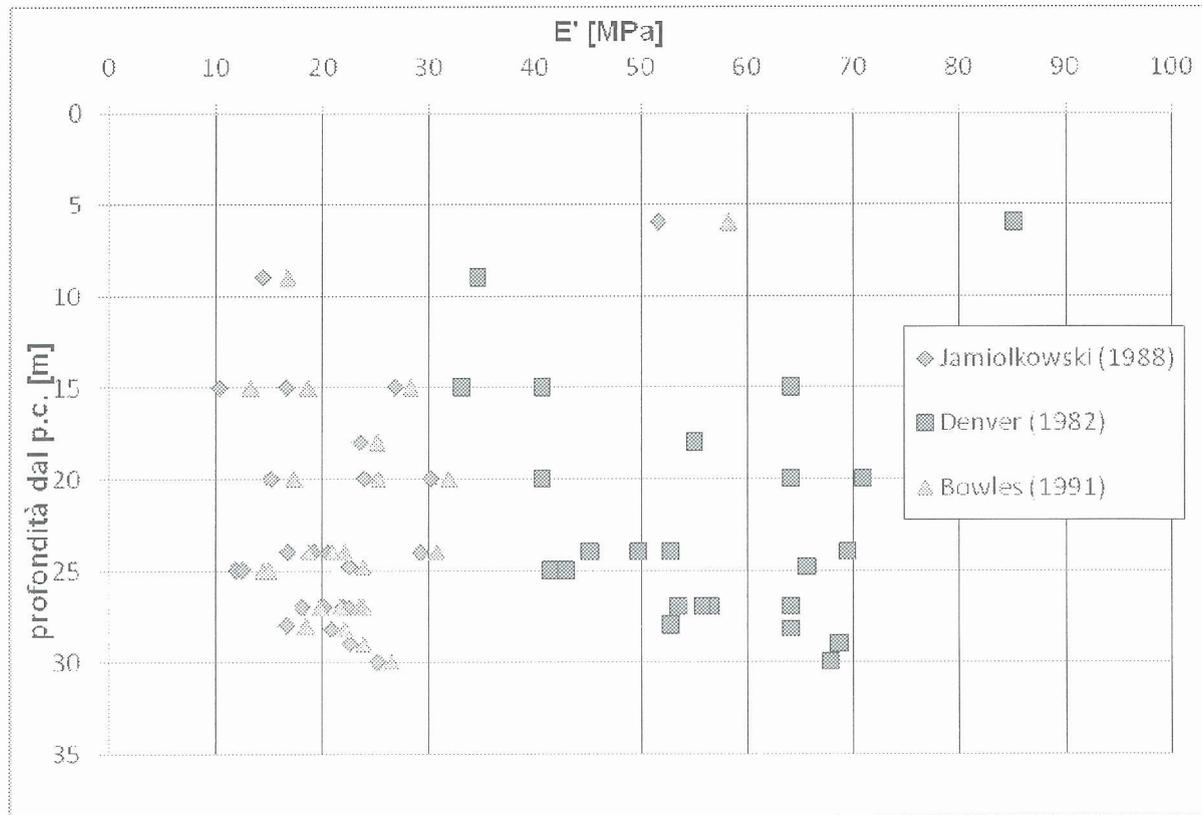


Figura 32 – Terreni SG - Valori del modulo di Young E' da prove SPT

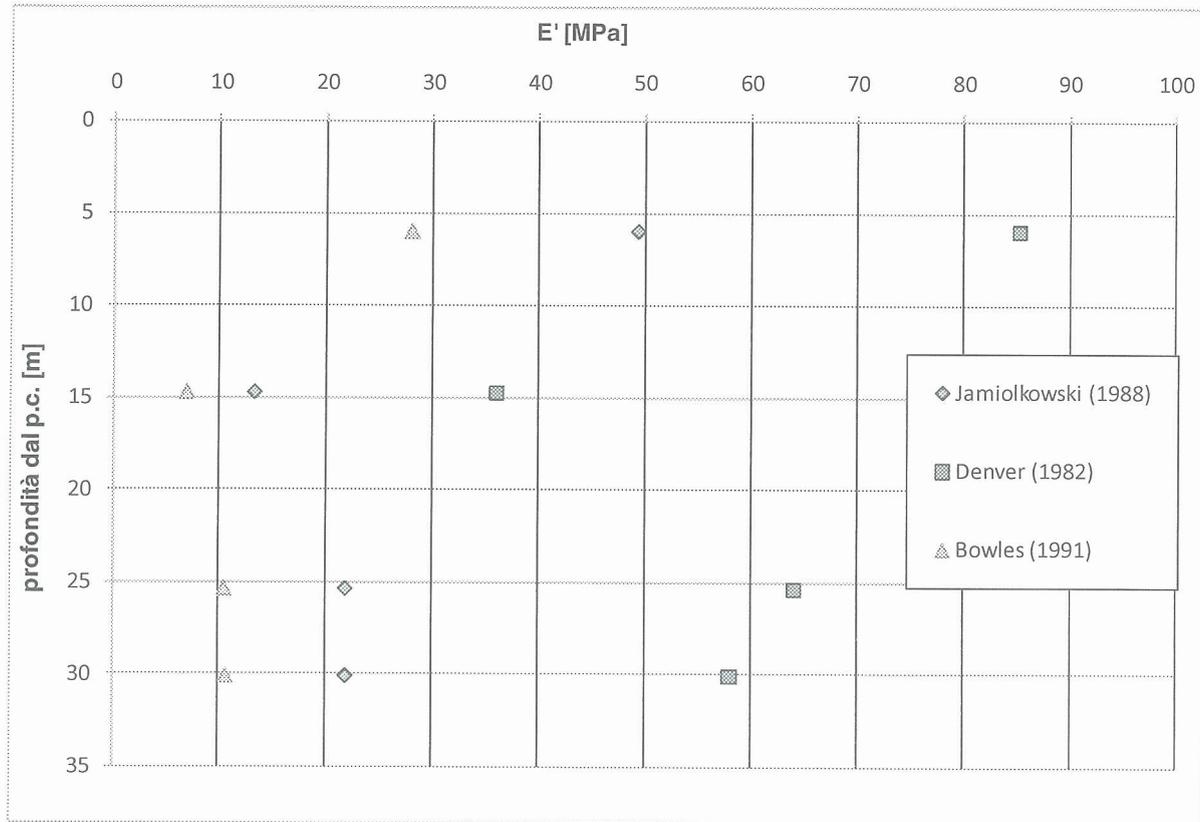


Figura 33 – Terreni SL - Valori del modulo di Young E' da prove SPT

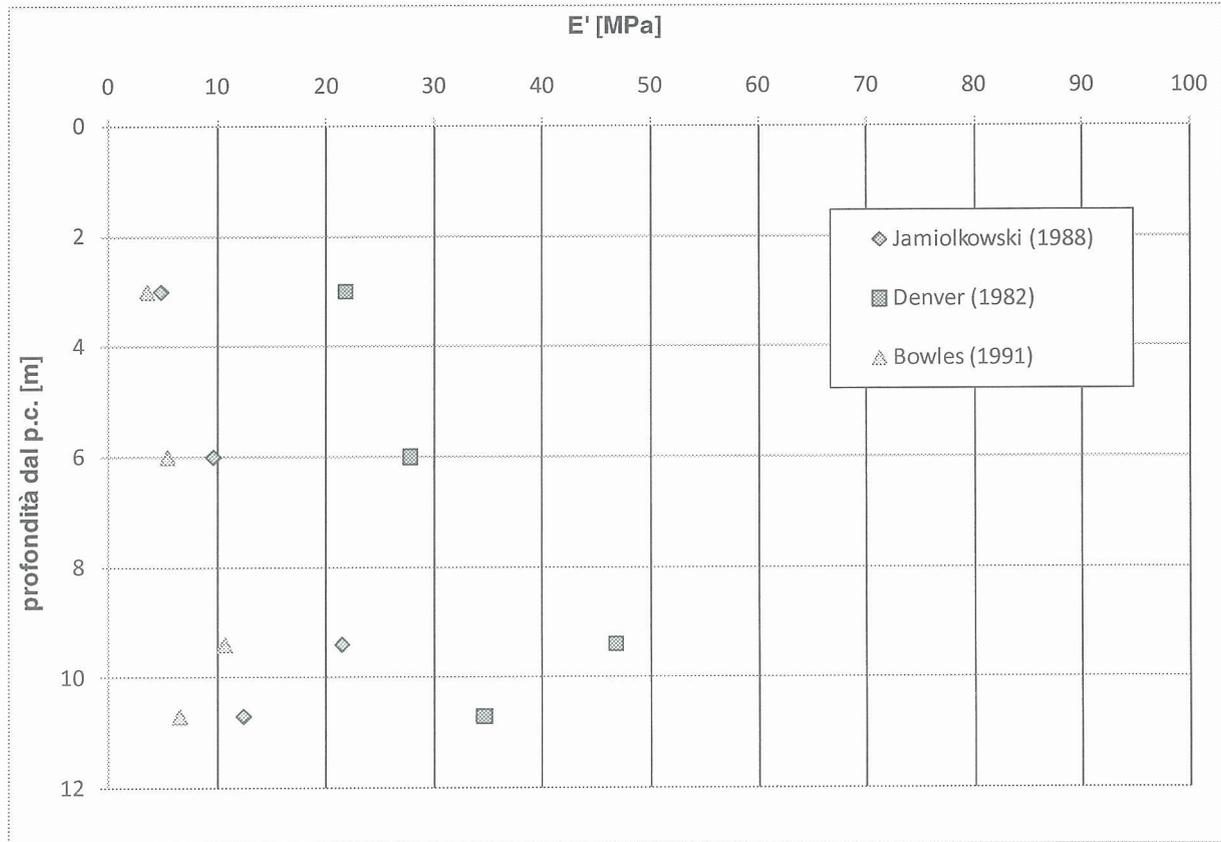


Figura 34 – Terreni LS - Valori del modulo di Young E' da prove SPT

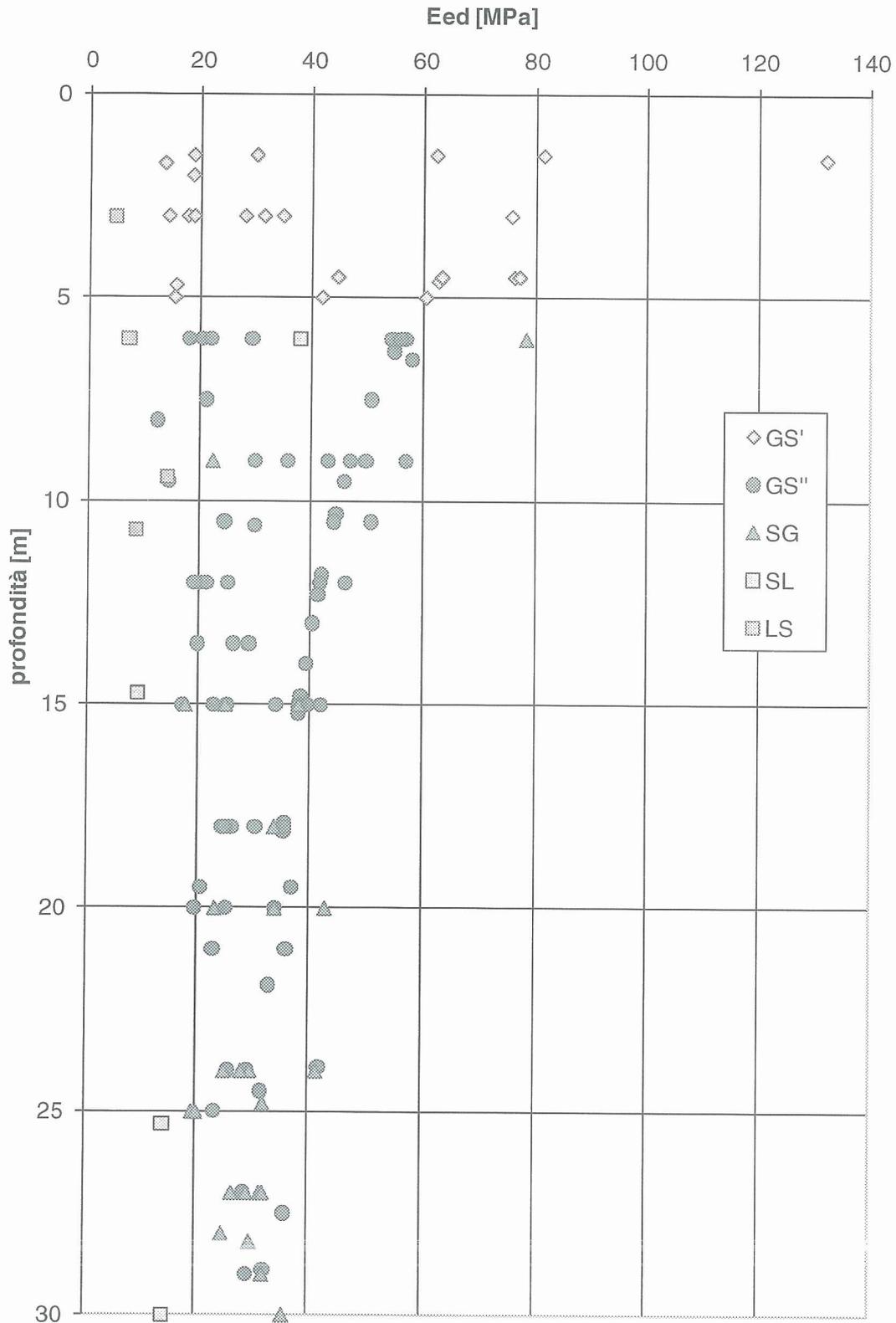


Figura 35 – Valori del modulo di edometrico Eed

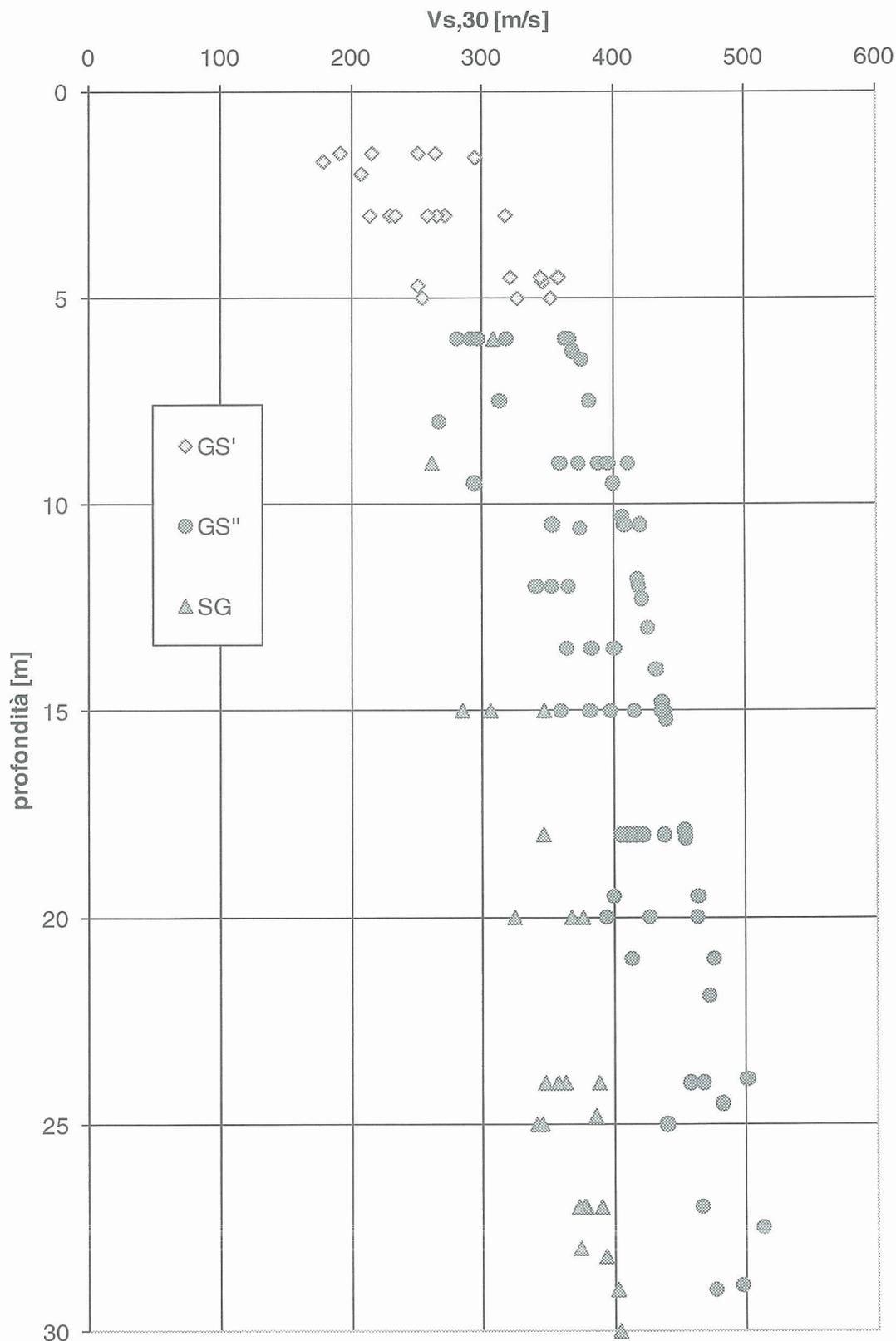


Figura 36 - Valori di Vs,30 in funzione della profondità

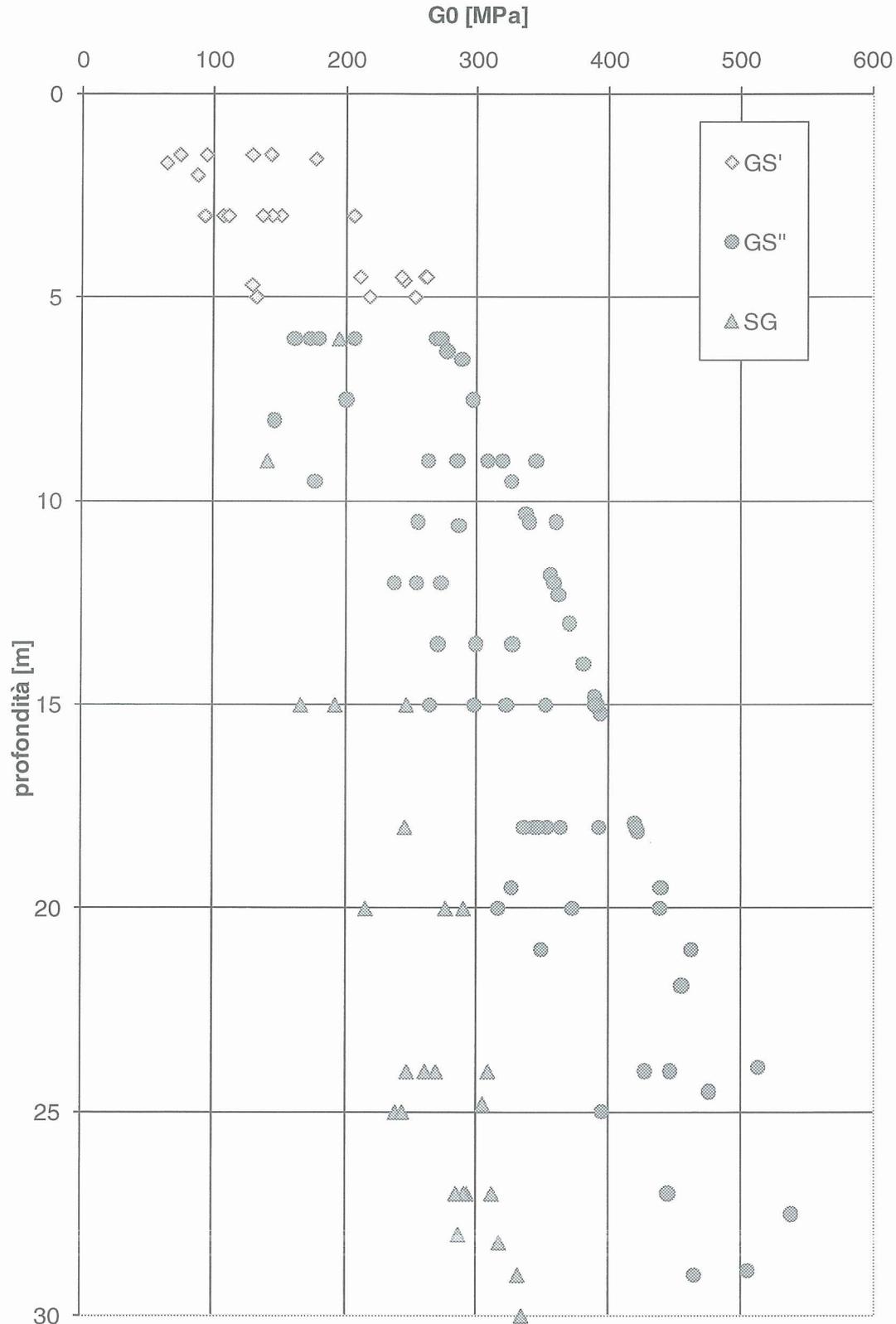


Figura 37 - Valori di G0 in funzione della profondità

