


ASSE VIARIO MARCHE – UMBRIA E QUADRILATERO DI PENETRAZIONE INTERNA MAXI LOTTO 2




LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLA DIRETTRICE PERUGIA ANCONA:
SS. 318 DI “VALFABBRICA”. TRATTO PIANELLO – VALFABBRICA
SS. 76 “VAL D’ESINO”. TRATTI FOSSATO VICO – CANCELLI E ALBACINA – SERRA SAN QUIRICO
“PEDEMONTANA DELLE MARCHE”, TRATTO FABRIANO – MUCCIA – SFERCIA

PROGETTO ESECUTIVO

CONTRAENTE GENERALE:	<i>Il responsabile del Contraente Generale:</i>	<i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i>
	Ing. Federico Montanari	Ing. Salvatore Lieto

PROGETTAZIONE: Associazione Temporanea di Imprese
Mandataria:

			
--	--	---	--

<p>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'ATI</p> <p>Ing. Antonio Grimaldi</p> <p>GEOLOGO</p> <p>Dott. Geol. Fabrizio Pontoni</p> <p>COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</p> <p>Ing. Michele Curiale</p>			
---	---	--	---

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO		
Ing. Giulio Petrizzelli		

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE	SCALA:
3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)	-
4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)	
GEOLOGIA E GEOTECNICA	DATA:
Relazione geotecnica generale sulle opere in sotterraneo	Luglio 2017

Codice Unico di Progetto (CUP) F12C03000050021 (Assegnato CIPE 23-12-2015)

	Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
Codice Elaborato:	L 0 7 0 3	2 1 3	E	0 2	G E 0 0 0 0	R E L	0 3	A

REV.	DATA	DESCRIZIONE	Redatto		Controllato	Approvato
A	Luglio 2017	Emissione	PROGIN	G. Furlani	S. Lieto	A. Grimaldi

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 2 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

I N D I C E

1. INTRODUZIONE.....	3
1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
1.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEMORFOLOGICO	5
3. INDAGINI GEOTECNICHE.....	6
3.1 GENERALITA'	6
3.2 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2002	6
3.2.1 Prove pressiometriche in foro	7
3.2.2 Prove di permeabilità	7
3.2.3 Indagini sismiche	8
3.2.4 Prove di laboratorio	8
3.3 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2004	11
3.3.1 Indagini sismiche	12
3.3.2 Prove di laboratorio	12
3.4 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2006-2007	14
3.4.1 Letture inclinometriche.....	15
3.4.2 Prove di laboratorio	16
3.5 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2017	16
3.5.1 Letture inclinometriche.....	17
3.5.2 Prove di laboratorio	17
4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	19
4.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE	19
4.2 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE.....	20
4.2.1 Premessa	20
4.2.2 Depositi incoerenti	20
4.2.3 Depositi coesivi	24
4.3 DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ EC _{LA}	28
4.4 DEPOSITI DI ALTERAZIONE DEL SUBSTRATO – UNITÀ S _{ALT}	29
4.5 FORMAZIONE DI CAMERINO - UNITÀ PA / UNITÀ AP	30
4.5.1 Parametri di resistenza.....	32
4.5.2 Parametri di deformabilità.....	33
4.5.3 Permeabilità	34
4.6 FORMAZIONE DELLO SCHLIER - S _{CH}	34
4.7 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	36
4.8 FALDA	71

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 3 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

1. INTRODUZIONE

Nella presente relazione viene riportata la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica per le opere in sotterraneo previste nel 3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud) e 4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia) della Pedemontana delle Marche – Progetto Definitivo.

In particolare lungo il tracciato sono previste tre gallerie naturali:

- GN S. Anna;
- GN Mecciano;
- GN S. Barbara.

Nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- breve inquadramento geologico, morfologico e idrogeologico;
- descrizione delle indagini geotecniche eseguite in sito ed in laboratorio;
- rilievo del livello di falda;
- descrizione dei criteri in base ai quali sono stati interpretati i risultati delle indagini geotecniche effettuate;
- interpretazione dei risultati delle indagini e definizione dei parametri geotecnici – geomeccanici di progetto.
- Falda.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 4 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Si è fatto riferimento ai seguenti documenti normativi.

- [N.1]. Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-08 (NTC-2008);
[N.2]. Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 - Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008;

1.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Alcune delle informazioni di seguito elaborate sono state acquisite mediante alcuni sopralluoghi effettuati sul sito di progetto e dall'esame della seguente documentazione:

- [DR_1]. L0703213E02GE0000REL01A – Progetto definitivo - "Relazione geologica, geomorfologica e idrologica generale"
[DR_2]. L0703213E02GE0000PRF01A-04A – Progetto definitivo - "Profilo geologico".
[DR_3]. L0703213E02GE0000PLA04-07A – Progetto definitivo - "Planimetria ubicazione indagini".
[DR_4]. L0703213E02GE0000PRF05-08A – Progetto definitivo - "Profilo geotecnico".
[DR_5]. L0703213E02GE0000REL04A – Progetto definitivo - "Relazione illustrativa sulle indagini geognostiche".
[DR_6]. L0703213E02GE0000REL05A - Progetto definitivo - "Raccolta dei certificati delle prove di laboratorio".

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 5 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Nelle gallerie in progetto sono stati eseguiti ulteriori sondaggi geognostici nella campagna integrativa del 2017 rispetto alle precedenti campagne:

- GN S. Anna: 2 sondaggi;
- GN Mecciano: 3 sondaggi;
- GN S. Barbara: 2 sondaggi.

Trattandosi prevalentemente di unità torbiditiche, nelle carote di sondaggio è stata effettuata, oltre all'analisi strutturale, un'analisi di facies con riferimento alla sequenza di Bouma ed è stato calcolato il rapporto sabbia/argilla in riferimento alla classificazione delle sequenze arenaceo-pelitiche pubblicata dall'A.G.I. (1979).

Tale studio ha permesso di individuare livelli e markers diagnostici delle associazioni di facies e quindi di caratterizzare con maggior dettaglio le associazioni presenti nell'ambito della Formazione torbiditica di Camerino e di correlarle stratigraficamente tra loro, consentendo altresì di definire maggiormente anche il locale assetto strutturale che è stato confermato nelle sue linee generali.

Nelle gallerie sono state distinte le varie associazioni di litofacies con indicazione del rapporto sabbia/argilla; rapporto che ha permesso di definire la tipologia di complessità strutturale e l'eterogeneità delle associazioni, dovute essenzialmente al processo genetico con la presenza alternata e ritmica di strati con proprietà meccaniche differenti (componente litoide o semilitoide - componente argillosa o marnosa).

Le opere in sottterraneo sono in materiali definiti da poco permeabili ad impermeabili; la presenza d'acqua è quindi modesta e localizzata e non si hanno interferenze particolari con le falde acquifere, presenti in fondovalle sulle alluvioni terrazzate (e mai interessate da opere in sottterraneo).

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 6 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

3. INDAGINI GEOTECNICHE

3.1 GENERALITA'

Al fine di caratterizzare i terreni in corrispondenza delle gallerie in progetto si è fatto riferimento alle seguenti campagne di indagine:

- Campagna geognostica del 2002;
- Campagna geognostica del 2004;
- Campagna geognostica del 2006-2007;
- Campagna geognostica del 2017.

Nei seguenti paragrafi sono descritte nel dettaglio le indagini in sito e le prove di laboratorio eseguite nelle suddette campagne d'indagine in corrispondenza delle gallerie in oggetto.

3.2 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2002

La campagna di indagine è stata svolta nel periodo ottobre-dicembre 2002 e, con riferimento alle due gallerie, è consistita in:

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati "S");
- installazione di piezometri a tubo aperto per la lettura del livello di falda;
- installazione di una tubazione inclinometrica;
- stendimenti per prove geofisiche di sismica a rifrazione.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

- esecuzione di prove SPT (Standard Penetration Test) in foro;
- prelievo di campioni di terreno e roccia sottoposti a prove geotecniche di laboratorio;
- esecuzione di prove di permeabilità Lugeon;
- esecuzione di prove pressiometriche in foro;
- misure di valori di Pocket Penetrometer.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte con riferimento alle gallerie.

Tabella 1 – Riepilogo dei sondaggi e delle prove eseguite nella campagna geognostica del 2002

Sondaggio	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. prove SPT	Prelievo campioni	Strumentazioni installate	n. prove pressiometriche	n. prove Lugeon
S19	45.0	402.27	-	-	-	2	2
S20	80.5	457.70	-	C.L.: 5	T.A. [0÷80.5]	2	2
S24	20.0	409.28	1	C.L.: 5 C.I.: 1, C.R.: 5	T.A. [3÷20]	-	-
S25	40.0	430.00	1	C.L.: 5	-	3	3
S26	25.0	401.89	1	C.L.: 5 C.R.: 1	-	-	-

TA [m]: Piezometro a Tubo Aperto [profondità tratto filtrante]
 IN. = Inclinometro
 C.L. = Campione litoide
 C.R. = Campione rimaneggiato
 C.I. = Campione indisturbato

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 7 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

3.2.1 Prove pressiometriche in foro

Nella seguente tabella sono elencati i risultati delle prove pressiometriche disponibili.

Tabella 2 – Risultati prove pressiometriche campagna geognostica 2002

Prova	Prof.	Unità	Pa kPa	G MPa	Em MPa	E I ciclo MPa	E II ciclo MPa
-	-	-					
S33P1	16.3	Sch	708	142.66	379.46	560.83	1125.96
S33P2	27.4	Sch	592	64.57	171.75	749.2	-
S33P3	36.2	Sch	883	91.56	243.55	897.63	934.66
S43P1	15.5	Pa	596	15.31	40.73	102.07	
S43P2	25	Pa	1156	233.53	621.2	-	1683.12
S43P3	31.3	Pa	703	366.81	975.71	1333.19	1967.57
S38P1	55.8	Sch	809	143.21	380.94	492.79	871.79
S38P2	66.3	Sch	816	144.17	383.49	994.741	940.47

Pa = pressione iniziale tratto pseudo-elastico

G = modulo di taglio

Em = modulo pressiometrico

EI = modulo di elasticità calcolato in I ciclo di carico-ricarico

EII = modulo di elasticità calcolato in II ciclo di carico-ricarico

3.2.2 Prove di permeabilità

Nella campagna del 2002 sono disponibili i risultati delle prove di permeabilità Lugeon elencate nella seguente tabella.

Tabella 3 – Risultati prove di permeabilità Lugeon campagna geognostica 2002

Sondaggio	Prove Permeabilità	
	Prof. da p.c.	k
-	m	m/s
S33	10.3	<1.01E-6
	19.3	< 4.7E-9
	30.0	< 3.5E-8
S38	51.65	< 7.57E-9
	58.10	< 1.51E-8
	68.0	< 4.79E-8
S43	8.9	4.1E-7
	19.4	< 3.09E-7
	24.0	< 1.25E-7
	28.4	< 1.69E-10

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 8 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

3.2.3 Indagini sismiche

Durante la campagna di indagine del 2002 sono state eseguite prove sismiche a rifrazione in corrispondenza degli imbocchi delle gallerie. Si riporta la tabella riassuntiva delle indagini eseguite.

Tabella 4 – Indagini sismiche a rifrazione campagna 2002

Sigla indagine	Opera
T1 (profilo 7)	Imbocco N GN S. Anna
T2 (profilo 8)	Imbocco N GN S. Anna
T1 (profilo 6)	Imbocco S GN S. Anna
T2 (profilo 5)	Imbocco S GN S. Anna
L (profilo 4)	Imbocco S GN S. Anna
T1 (profilo 16)	Imbocco N GN Mecciano
T2 (profilo 17)	Imbocco N GN Mecciano
L (profilo 15)	Imbocco N GN Mecciano
T1 (profilo 20)	Imbocco S GN Mecciano
T2 (profilo 19)	Imbocco S GN Mecciano
L (profilo 18)	Imbocco S GN Mecciano
T1 (profilo 22)	Imbocco N S. Barbara
T2 (profilo 23)	Imbocco N S. Barbara
L (profilo 25)	Imbocco N S. Barbara
T1 (profilo 26)	Imbocco S S. Barbara
T2 (profilo 24)	Imbocco S S. Barbara
L (profilo 25)	Imbocco S S. Barbara

3.2.4 Prove di laboratorio

Sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna geognostica in esame sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

Nei terreni:

- analisi granulometriche;
- determinazioni dei limiti di Atterberg;
- determinazioni del peso di volume naturale (γ_N);
- determinazioni del contenuto naturale d'acqua (w_N);
- prove di taglio diretto;

In roccia:

- determinazioni del peso di volume naturale (γ_N);
- determinazione della resistenza a compressione monoassiale (σ_c).

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 9 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------

Tabella 5 – Tabelle laboratorio campagna 2002

RIEPILOGO RISULTATI PROVE DI LABORATORIO										
10 di 14										
OPERA: PEDEMONTANA										
Sondaggio	-	S39	S39	S39	S39	S39	S39	S41	S41	S41
Campione	-	spt1	1A	1	2	3	4	1	2	3
Unità	-	Ala	Ala	Ala	S4	S4	S4	S1	S1	S1
Prof. iniziale	m	3.30	3.30	5.00	14.70	16.00	19.10	5.00	12.00	21.00
Prof. finale	m	3.55	3.55	5.50	15.50	17.00	19.90	5.80	12.90	21.70
Granulometria										
G	%	0.62	1.20	0.28	0.32	1.93				
S	%	22.25	22.3	19.27	62.43	49.71				
L + A	%	77.13	76.5	80.45	37.25	48.36				
L	%	49.53	48.49	55.05						
A	%	27.6	28.01	25.4						
Limiti di Atterberg										
W _L	%	47.54	44.09	44.58			48.18			
W _P	%	22.23	28.09	26.36			22.3			
I _c	-	0.7	1.0	1.2			1.4			
I _P	%	25.31	16.0	18.22			25.88			
Caratteristiche fisiche										
γ _N	kN/m ³		16.56	20.43	22.32		23.55	22.73	23.49	23.33
V _b	m/s									
V _s	m/s									
w _N	%	28.963	28.664	22.021	9.217	7.48	12.282	9.19		
e	-									
S	%									
Prove edometriche (valori riferiti alla tensione geostatica in sito)										
E _{ed}	MPa									
c _v	cm ² /s									
c _α	-									
k	cm/s									
Resistenza a compressione monoassiale										
σ _c	kPa						133.77	1290	12413	13738
Resistenza non drenata										
(ELL) c _u	kPa									
(TX-UU) c _u	kPa									
Resistenza drenata										
(TD) c	kPa		3.66							
(TD) f	°		27.53							
(TD) c _r	kPa									
(TD) f _r	°									
(TX-CIU) c	kPa									
(TX-CIU) f	°									
(TX-CID) c	kPa				3.58					
(TX-CID) f	°				56.73					

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 11 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

RIEPILOGO RISULTATI PROVE DI LABORATORIO											12 di 14
OPERA: PEDEMONTANA											
Sondaggio	-	S42	S42	S42	S42	S42	S53	S53	S53	S53	
Campione	-	2	3	4	5	6	1	CR	2	3	
Unità	-	ECIa	S4	S4	S4	S4	ECIa	ECIa	S1	S1	
Prof. iniziale	m	5.00	9.20	15.50	19.50	23.50	5.40	9.00	20.10	26.50	
Prof. finale	m	5.50	9.90	16.50	20.50	24.20	6.00	9.60	20.80	27.10	
Granulometria											
G	%	0.29					3.84	0.71			
S	%	16.56					14.77	16.46			
L + A	%	83.15					81.39	82.83			
L	%	56.55					45.96	53.22			
A	%	26.6					35.43	29.61			
Limiti di Atterberg											
W _L	%	44.28		41.03			53.05	49.18			
W _P	%	22.09		22.41			23.95				
I _c	-	0.9					0.9				
I _P	%	22.19		18.61			29.1	29.18			
Caratteristiche fisiche											
γ _N	kN/m ³	19.44	20.66	22.65	23.27	22.9	18.87	20.62	24.36		
V _p	m/s										
V _s	m/s										
w _N	%	24.996	17.1				27.378	27.76	8.13		
e	-										
S	%										
Prove edometriche (valori riferiti alla tensione geostatica in sito)											
E _{ed}	MPa										
c _v	cm ² /s										
c _u	-										
k	cm/s										
Resistenza a compressione monoassiale											
σ _c	kPa		729	120.07	2781	1747			403		
Resistenza non drenata											
(ELL) c _u	kPa										
(TX-UU) c _u	kPa	51.73					48.28				
Resistenza drenata											
(TD) c	kPa				80			4.39			
(TD) f	°				28.86			23.35			
(TD) c _r	kPa							0.77			
(TD) f _r	°							17.16			
(TX-CIU) c	kPa										
(TX-CIU) f	°										
(TX-CID) c	kPa										
(TX-CID) f	°										

(*) segue da pagina precedente.

3.3 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2004

La campagna di indagine effettuata nel corso del 2004 è consistita in:

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati BH);
- installazione di piezometri a tubo aperto nei fori di sondaggio eseguiti;
- tomografie sismiche a rifrazione.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 12 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

- esecuzione di prove SPT (Standard Penetration Test) in foro;
- prove pressiometriche Menard.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte con riferimento alle gallerie.

Tabella 6 – Riepilogo dei sondaggi e delle prove eseguite nella campagna geognostica del 2004

Sondaggio	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. prove SPT	Prelievo campioni	Strumentazione installata	n. prove pressiometriche
BH18	25.0	363	2	Cl: 2 CR: 2	T.A.[0÷25]	1
BH08	25.0	360.6		Cl: 2 CR: 3	T.A.[3÷25]	1
BH09	25.0	338.5	-	Cl: 2 CR: 4	T.A.[3÷25]	1
BH10	25.0	478.7	1	Cl: 2 CR: 3	T.A.[3÷25]	1
BH11	25.0	478	1	Cl: 3 CR: 3	T.A.[3÷25]	1

TA [m]: Piezometro a Tubo Aperto [profondità tratto filtrante]
 CC [m]: cella di Casagrande [profondità cella]

3.3.1 Indagini sismiche

Durante la campagna di indagine del 2004 sono state eseguite prove sismiche a rifrazione. Si riporta la tabella riassuntiva delle indagini eseguite.

Tabella 7 – Indagini sismiche a rifrazione campagna 2004

Sigla indagine	OPERA
T11/T12	GN Mecciano
T14, T13, T20, T21	Imbocco N GN S. Barbara
T17, T16, T18	Imbocco S GN S. Barbara

L'indagine geofisica di sismica a rifrazione con modalità tomografica ha fornito la caratterizzazione in termini di velocità sismiche del settore di sottosuolo interessato dagli stendimenti.

I risultati hanno evidenziato sostanzialmente la presenza di tre unità:

- la prima è contraddistinta da velocità delle onde di compressione P variabili da 200 a 600 m/s circa. Si tratta principalmente di depositi superficiali di spessore variabile;
- la seconda è contraddistinta da velocità di onde di compressione comprese tra 800 e 1700 m/s, tale unità è attribuibile al substrato alterato e/o allentato (facies di argille con livelli o inclusi più argillitici marnosi o arenaci);
- la terza è contraddistinta da velocità di onde di compressione crescenti con la profondità fino a circa 2000 m/s e localmente fino a 2300-2600 m/s. Si tratta del substrato costituito principalmente da argille marnose e/o da marne arenacee fratturate.

3.3.2 Prove di laboratorio

Sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna geognostica in esame sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 14 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Sondaggio	-	BH10	BH10	BH10	BH11	BH12	BH12	BH18
Campione	-	1.00	2.00	3.00	3.00	1.00	2.00	1.00
Tipo	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Unità	-	EClA	EClA	Sch	Sch	EClA	Pa	EClS
Prof.	m	3.00	8.60	14.00	21.50	4.00	14.50	4.50

Granulometria

G	%	1.5	0.0	0.0	0.0	1.6		0.0
S	%	17.8	0.9	8.1	4.2	22.3		57.1
L + A	%	80.7	99.1	91.9	95.8	76.1		42.9
L	%	34.0	22.2	40.7	27.2	27.1		30.6
A	%	46.7	76.9	51.2	68.6	49.0		12.3
D50	mm							

Limiti di Atterberg

W_L	%	40.8	88.6	52.5	72.5	41.8	42.7	
W_P	%	27.1	41.9	25.7	32.4	23.2	27.1	
I_c	-	1.42	1.24	1.37	1.40	1.27	1.74	
I_p	%	13.7	46.7	26.8	40.1	18.6	15.6	

Caratteristiche fisiche

γ_N	kN/m ³	19.6	17.7	18.9	20.2	18.6	21.1	21.6
w_N	%	21.3	30.8	15.7	16.5	18.2	15.5	9.4

Resistenza a compressione monoassiale

σ_c	MPa							
------------	-----	--	--	--	--	--	--	--

Resistenza non drenata

(TX-UU) c_u	kPa							
(TX-ELL) c_u	kPa							

Resistenza drenata

(TD) c	kPa	8.7		23.3	64.7			
(TD) f	°	26.6		26.1	23.3			
(TD) c_r	kPa							
(TD) f_r	°							
(TX-CIU) c	kPa		49.0					
(TX-CIU) f	°		28.0					

3.4 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2006-2007

Con riferimento alle due gallerie, la campagna di indagine effettuata nel 2006-2007 è consistita in:

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati "SN");
- n. 1 sondaggio geognostici (denominato SN_bis) eseguito a distruzione di nucleo;
- installazione di piezometri nei fori dei sondaggi eseguiti;
- installazione di tubi inclinometrici nei fori di sondaggio.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

- descrizione dettagliata della stratigrafia con foto a colori;
- esecuzione di prove SPT (Standard Penetration Test) in foro;
- prelievo di campioni di terreno e roccia sottoposti a prove di laboratorio;

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 15 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

- prove di permeabilità Lefranc;
- prove dilatometriche su roccia (DRT);
- misure di valori di Pocket Penetrometer sulle carote dei sondaggi.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte con riferimento alle gallerie.

Tabella 8 – Riepilogo dei sondaggi e delle prove eseguite nella campagna geognostica del 2006-2007

Sondaggio	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. prove SPT	Prelievo campioni	Strumentazione installata	n. prove Lefranc	N. prove dilatometriche
SN2226	35.0	340	3	Cl: 3	IN	3	1
SN2226bis (SD)	30.0	340	-	-	C.C.:[17;30]	-	-

TA [m]: Piezometro a Tubo Aperto [profondità tratto filtrante]
 CC=piezometro a cella di Casagrande [profondità cella]
 DH [m]: Prova sismica Down Hole [profondità di prova]
 IN. = Inclinometro
 C.L. = Campione litoide
 C.R. = Campione rimaneggiato
 C.I. = Campione indisturbato

3.4.1 Letture inclinometriche

Per la strumentazione inclinometrica installata si dispone di una sola lettura, attualmente gli inclinometri sono non più utilizzabili perché rotti.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 16 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

3.4.2 Prove di laboratorio

Sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna geognostica in esame sono stati recuperati i certificati delle seguenti prove di laboratorio:

- analisi granulometriche;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del peso di volume naturale (γ_N);
- determinazione del contenuto d'acqua naturale (w_N);
- prove di taglio diretto;
- prova triassiale.

Tabella 9 – Tabelle laboratorio campagna 2006-2007

Sondaggio	-	SN2226	SN2226	SN2226
Campione	-	1S	2S	3M
Tipo	-	ind	ind	ind
Unità	-	ECl _a	ECl _a	Pa
Prof.	m	4.00	9.50	29.60
Granulometria				
G	%			
S	%			
L + A	%			
L	%			
A	%			
D50	mm			
Limiti di Atterberg				
W _L	%	40.4	42.5	
W _P	%	24.0	28.9	
I _c	-	1.24	1.58	
I _p	%	16.4	13.6	
Caratteristiche fisiche				
γ_N	kN/m ³	19.3	18.7	22.8
w _N	%	20.0	21.0	10.6
Resistenza a compressione monoassiale				
σ_c	MPa			
Resistenza non drenata				
(TX-UU) c _u	kPa			
(TX-ELL) c _u	kPa			
Resistenza drenata				
(TD) c	kPa			
(TD) f	°		27.2	
(TD) c _r	kPa			
(TD) f _r	°		12.6	

3.5 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2017

Con riferimento alle gallerie, la campagna di indagine integrativa effettuata nel 2017 è consistita in:

- sondaggi geognostici a carotaggio continuo ubicati negli imbocchi delle GN (denominati "X");
- sondaggi geognostici eseguiti in corrispondenza delle gallerie (denominati "A");

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 17 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

- installazione di piezometri a tubo aperto per la lettura del livello di falda.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

- descrizione stratigrafica, foto a colori, rilievo geomeccanico;
- esecuzione di prove SPT (Standard Penetration Test);
- prelievo di campioni di terreno e roccia sottoposti a prove di laboratorio;
- misure di valori di Pocket Penetrometer nei terreni;
- prove dilatometriche su roccia;
- rilievo falda.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte con riferimento alle gallerie.

Tabella 10 – Riepilogo delle indagini in sito eseguite nella campagna geognostica del 2017

Sondaggio /Pozzetto	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. prove SPT	Prelievo campioni	Strumentazione installata
A1.3	55.0	375.989	-	C.I.: 1 CR: 2	-
A2.3	48.0	375.936	-	C.I.: 1 CR: 1	-
A4.3	107.0	414.35	-	C.I.: 1 CR: 1	-
A5.3	100.0	410.25	-	C.I.: 1 CR: 1	-
A7.3	58.0	361.544	-	C.I.: 1 CR: 1	-
A9.3	78.0	507.116	-	C.I.: 1 CR: 1	-
A10.3	68.0	502.429	-	C.I.: 1 CR: 3	-
X3.18	20.0	338.738	3	C.I.: 2 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[0÷20]
X4.5	16.0	458.033	4	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 5	T.A.[0÷16]
X4.6	15.0	471.966	2	C.L.: 2 C.R.: 3	T.A.[0÷15]
TA [m]: Piezometro a Tubo Aperto [profondità tratto filtrante] IN. = Inclinometro C.L. = Campione litoide rimaneggiato (spezzone di carota) C.R. = Campione rimaneggiato C.I. = Campione indisturbato SD = sondaggio a distruzione di nucleo					

3.5.1 Letture inclinometriche

Al momento della stesura del presente elaborato sono disponibili solo le letture di zero.

3.5.2 Prove di laboratorio

Sui campioni prelevati dai sondaggi della campagna geognostica in esame sono in programma le seguenti prove di laboratorio:

Nei terreni:

- analisi granulometriche;

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 18 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del peso di volume naturale (γ_N);
- determinazione del contenuto d'acqua naturale (w_N);
- prove di taglio diretto (anche in tensioni residue);
- prove ad espansione laterale libera (ELL).

Nelle porzioni litoidi:

- determinazione del peso di volume naturale (γ_N);
- determinazione della resistenza a compressione monoassiale (σ_c).

Al momento della stesura del presente elaborato, non si hanno a disposizione risultati delle prove di laboratorio per i campioni prelevati nei sondaggi delle GN.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 19 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica generale con riferimento alle opere in sotterraneo (GN S. Anna, GN Mecciano e GN S. Barbara), valutata sulla base dell'interpretazione delle indagini geotecniche svolte in sito ed in laboratorio. Per quanto riguarda le prove di laboratorio della campagna geognostica integrativa del 2017, al momento della stesura del presente elaborato, non si hanno a disposizione i risultati. Quindi al fine della definizione dei parametri geotecnici di progetto, si farà riferimento alle numerose indagini di laboratorio eseguite per il precedente lotto 2, in quanto comunque i terreni presenti sono analoghi (sia per le formazioni del substrato, che per i terreni di copertura).

Dopo aver individuato le principali unità geotecniche intercettate, verranno interpretati i risultati delle indagini geotecniche sulla base dei criteri di seguito esposti e quindi verranno definiti i parametri geotecnici di progetto.

Nel profilo stratigrafico longitudinale sono riportati in forma grafica i risultati delle indagini e sono mostrate le correlazioni stratigrafiche con indicazione delle unità geotecniche intercettate; è anche indicato l'andamento del livello di falda massimo rilevato da letture piezometriche.

4.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE

Il substrato è costituito dalla Formazione di Camerino (e sovrastante Formazione gessoso-solfifera) e dalla formazione dello Schlier.

All'interno della formazione di Camerino si sviluppa la maggior parte del tracciato di progetto. In funzione dell'alternanza e la posizione degli strati arenacei e degli strati pelitico-marnosi, si può giungere ad una stima del rapporto arenaria/pelite secondo la classificazione AGI – 1979.

- **Unità Pa - Substrato Pelitico – Arenaceo con $0,2 \leq A/P \leq 1$ (Formazione di Camerino):** rappresentata da litofacies pelitico-arenacee con un rapporto $A/P \leq 1$.
- **Unità Ap - Substrato Arenaceo – Pelitico $A/P \geq 1$ (Formazione di Camerino):** formata essenzialmente da litofacies costituite da arenarie e marne siltose grigie con un rapporto $A/P \geq 1$.

Da una dettagliata analisi visiva delle carote, è stato possibile stimare il valore A/P delle varie associazioni (si rimanda alla Relazione geologica e ai report stratigrafici dei sondaggi per gli approfondimenti del caso). Le varie associazioni presentano un rapporto complessivo medio tra $A/P = 0.9 - 0.65$. Quindi prevale generalmente la componente pelitico-marnosa ($A/P < 1$) il cui comportamento meccanico è principalmente governato dalla stratificazione e laminazione delle litofacies torbiditiche.

Per la caratterizzazione geotecnica, le due componenti litologiche, Ap e Pa, sono fittamente intercalate e difficilmente distinguibili. Risulta quindi corretto considerarli come accorpati in una unità unica geotecnica.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 20 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

- **Unità Sch – Formazione dello Schlier:** si tratta di alternanze di marne argillose, marne siltose e arenacee con intercalazioni di calcare detritico e calcareniti.

Lo Schlier si presenta come una marna più o meno argillosa con caratteristiche meccaniche e caratteristiche fisiche che possono essere assimilate alla frazione più marnosa della formazione di Camerino (Pa).

4.2 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE

4.2.1 Premessa

Ai fini della caratterizzazione dei terreni è stato fatto riferimento ai risultati di tutte le indagini ad oggi disponibili, ed in particolare:

- prove penetrometriche dinamiche SPT eseguite nei fori di sondaggio;
- prove dilatometriche in foro di sondaggio in roccia;
- prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati e rimaneggiati.

Occorre premettere che le formazioni pelitico arenacee del substrato (di rilevanza progettuale per lo scavo delle gallerie) si inquadrano nell'ambito delle formazioni complesse, che si pongono al confine fra le terre e le rocce. Si tratta di una formazione complessa fortemente anisotropa, in cui la stratificazione/laminazione chiaramente influenzano il comportamento meccanico della stessa. In base al quadro conoscitivo complessivamente disponibile la caratterizzazione geotecnica si è basata, in ordine di importanza:

- prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati, mediante un classico approccio di meccanica delle terre;
- prove pressiometriche in sito, con particolare riferimento ai parametri di deformabilità, che coinvolgendo un volume di materiale superiore forniscono valori maggiormente rappresentativi riferiti alla scala di progetto;
- in sub-ordine e per confronto, mediante indici di classificazioni dell'ammasso, basati sull'esame visivo ed i rilievi geomeccanici eseguiti sulle carote.

4.2.2 Depositi incoerenti

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

Per quanto riguarda la stima della densità relativa dalle prove SPT, sono stati considerati i valori minimi di densità relativa ottenuti dalle varie correlazioni che di seguito vengono esposte.

Stato di addensamento

Correlazione di Skempton

In accordo a quanto indicato in Skempton (1986), la densità relativa D_r può essere correlata al valore NSPT con la seguente legge:

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 21 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

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

essendo:

A, B = costanti empiriche indicate in tabella seguente

σ'_{vo} = pressione verticale efficace alla quota della prova SPT (kg/cm²);

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

D_r = densità relativa (-).

Tabella 11 – Costanti empiriche A e B (Skempton, 1986)

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	$(21,7+27,5) \cdot \frac{1+2 \cdot (ko)_{sc}}{1+2 \cdot (ko)_{nc}}$

Nel caso in esame sono state cautelativamente considerate le costanti empiriche relative a sabbie fini normal consolidate.

Correlazione di Gibbs e Holtz

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

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{(16 + 23 \cdot \sigma'_{vo})}}$$

Correlazione di Bazaraa

In accordo a quanto indicato da Bazaraa (1967) la densità relativa D_r può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente espressione:

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (1 + 4.1 \cdot \sigma'_{vo})}} \quad \text{per } \sigma'_{vo} \leq 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (3.24 + 1.024 \cdot \sigma'_{vo})}} \quad \text{per } \sigma'_{vo} > 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

essendo:

D_r = densità relativa (-).

σ'_{vo} = pressione verticale efficace in sito alla quota della prova SPT (kg/cm²);

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

Correlazione di Terzaghi & Peck

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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 22 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

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

Parametri di resistenza

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio dalle prove SPT sono state utilizzate due diverse correlazioni (Bolton; Schmertmann) di seguito illustrate. Generalmente, la correlazione di Bolton ha sempre fornito valori dell'angolo di resistenza al taglio inferiori, rispetto alla correlazione di Schmertmann per tutte le unità geotecniche in esame. Cautelativamente per la definizione dei parametri di resistenza di progetto si è fatto riferimento ai valori minimi ottenuti dalle correlazioni.

Correlazione di Schmertmann

L'angolo di resistenza al taglio (φ') stimato dalle prove SPT in base alla correlazione proposta da Schmertmann (1977) correla l'angolo di resistenza al taglio alla densità relativa attraverso la seguente relazione:

$$\varphi = 38.5 + 0.108 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia e ghiaia poco limosa e ghiaietto uniforme}$$

$$\varphi = 34.5 + 0.10 \cdot D_R \quad \text{sabbia grossa-media uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 31.5 + 0.115 \cdot D_R \quad \text{sabbia medio-fine uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 28.0 + 0.14 \cdot D_R \quad \text{sabbia fine uniforme}$$

essendo: D_R = densità relativa

Nel caso in esame si è considerata, cautelativamente per le unità incoerenti GS la correlazione valida per sabbia medio-fine uniformemente ben gradata e per le unità S la correlazione per sabbia fine uniforme.

Correlazione di Bolton

L'angolo di resistenza al taglio di picco φ' è stato determinato in accordo al metodo proposto da Bolton (1986):

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

$$DI = D_r \cdot [Q - \ln(p_f')] - 1$$

essendo:

φ' = angolo di attrito di picco riferito a pressioni di 272 kPa (°);

Q = fattore che dipende dalla composizione minereologica e dalla forma delle particelle di sabbia, valore consigliato = 10;

p_f' = 1.4 · σ_{ff}' kPa (vedasi Jamiokowski et al., 1988; in accordo a quanto proposto da Baligh, 1975, si assume $p_f' = 1.4 \cdot 272 = 380$ kPa);

m = costante empirica dipendente dalle condizioni di deformazione prevalenti (vedasi tabella seguente (°). Nel nostro caso si assume m=3;

D_r = densità relativa (-).

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 23 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Tabella 12 – 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 attrito ϕ_{cv}' sono stati ricavati in base a quanto indicato nella tabella seguente (Youd, 1972; Stroud, 1988) e sulla base delle prove di taglio diretto in laboratorio eseguite sui campioni prelevati. Nel caso specifico per l'angolo di attrito ϕ_{cv}' si è assunto, cautelativamente:

$\phi_{cv}' = 33^\circ$ per le sabbie con ghiaia (unità Ag);

$\phi_{cv}' = 30^\circ$ per le sabbie (unità As).

Tabella 13 – Valori dell'angolo di attrito ϕ_{cv}' per sabbie silicee secondo quanto riportato in Stroud (1988) e Youd (1972)

	Sabbie ben gradate	Sabbie uniformi
Sabbie a spigoli vivi	$\phi_{cv}' = 38^\circ$	$\phi_{cv}' = 34^\circ$
Sabbie a spigoli arrotondati	$\phi_{cv}' = 33^\circ$	$\phi_{cv}' = 30^\circ$

Caratteristiche di deformabilità

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

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

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

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9.81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

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

essendo:

γ_t = peso di volume naturale del terreno in assunto pari a 19 kN/m³;

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

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

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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 24 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	--------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Correlazione di Ohta e Goto (1978)

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})_{50\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \text{ (m/sec)}$$

essendo:

C = 53.3;

z = profondità dal p.c. in metri;

f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedasi la Tabella 14);

f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedasi la Tabella 15).

Tabella 14 – Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito)

f _A	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

Tabella 15 – Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_G (funzione della granulometrica del deposito)

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

Nel caso in esame è stato assunto:

f_A = 1.3;

f_G = 1.15 per Ag, f_G = 1.14 per As.

Correlazione di Yoshida et al. (1988)

$$v_s = C \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot (\sigma'_v)^{0.14} \text{ (m/sec)}$$

essendo:

C=49 per sabbie fini ;

C=56 per sabbie grosse con almeno il 25% di ghiaia;

C=60 per 50% di ghiaia;

σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova.

I moduli di deformabilità "operativi" (E') da adottare per il calcolo delle deformazioni/cedimenti delle opere di sostegno e delle fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E₀).

Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici "operativi" saranno assunti pari a 1/10 di quello iniziale (E_{op}' = E₀/10).

4.2.3 Depositi coesivi

Per i depositi coesivi la caratterizzazione geotecnica è stata fatta oltre che dall'interpretazione delle prove in sito, anche dai risultati delle prove di laboratorio.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 25 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Classificazione

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

- Analisi granulometriche;
- pesi di volume naturale e secco;
- contenuti d'acqua naturale;
- limiti di Atterberg.

Caratteristiche di resistenza

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza dei depositi coesivi ci si è basati principalmente sui risultati delle prove di laboratorio che sono essenzialmente prove:

- Taglio diretto e prove triassiali per la resistenza in tensioni efficaci;
- Triassiale non consolidata non drenata (TXUU) e prova di compressione assiale semplice (ELL) per la resistenza in condizioni non drenate.

La resistenza al taglio in condizioni non drenate è stata valutata anche dalle prove speditive di Pocket Penetrometer (PP) e delle prove penetrometriche dinamiche SPT in base alla seguente correlazione di Stroud (1974):

$$c_u \cong (5.0 \div 5.5) \cdot N_{SPT} \quad (\text{kPa})$$

I valori sono stati poi riportati nello stesso grafico, con indicato anche l'andamento della resistenza al taglio per un terreno normal consolidato ricavato dalla seguente relazione:
 $c_{UNC} = 0.23 \cdot \sigma'_{v.}$

Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi coesivi possono essere stimati:

- sulla base dei risultati delle indagini sismiche in sito (prove Down-Hole);
- da correlazioni di letteratura sulla base delle prove in sito.

Per quanto concerne le prove sismiche in sito, le caratteristiche di deformabilità vengono individuate con le stesse relazioni precedentemente indicate per i terreni incoerenti. Questi valori sono stati confrontati poi con i risultati derivanti dalle correlazioni per l'interpretazione delle prove in sito SPT e CPT.

Il valore del modulo di deformazione elastico ($E'v$) per terreni coesivi sovraconsolidati può anche essere stimato con la seguente correlazione (Stroud, 1974):

$$E'v = 130 \cdot c_u = 130 \cdot f1 \cdot N \quad [\text{kPa}]$$

dove:

- $E'v$ = modulo di deformazione operativo (kPa)
- c_u = resistenza al taglio non drenata (kPa);
- $f1$ = fattore in funzione dell'indice di plasticità IP , (vedasi figura seguente), assunto pari a 5;
- N = valori di N_{SPT} .

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 26 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

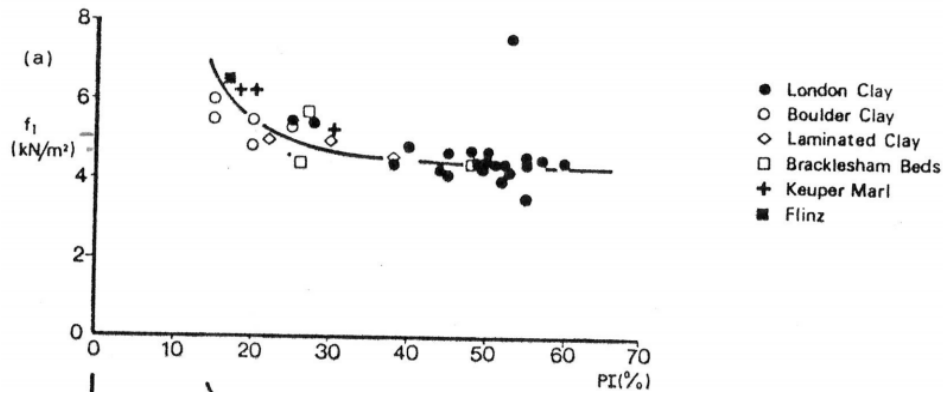


Figura 1 – Fattore f_1 in funzione di IP

Sulla base di quanto riportato in Simpson et al. (1979) il modulo di taglio iniziale (G_0) può essere stimato anche sulla base della seguente equazione:

$$G_0 = (500 \div 700) \cdot c_u \text{ (kPa)}$$

essendo:

c_u = resistenza al taglio non drenata.

I moduli di deformabilità "operativi" (E') da adottare per il calcolo delle deformazioni/cedimenti delle opere di sostegno e delle fondazioni, saranno assunti pari a 1/5 di quello iniziale (E_0).

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

Nella valutazione dei cedimenti immediati dei rilevati il modulo di deformazione in condizioni non drenate (E_u) può essere stimato sulla base della correlazione empirica proposta da Duncan & Buchignani (1976) $E_u = k \cdot c_u$; il coefficiente k è valutato con il grafico di figura seguente.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 27 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

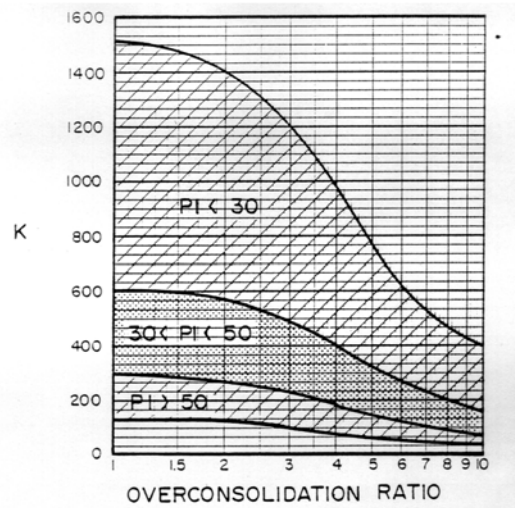


Figura 2 – Duncan & Buchigani

Caratteristiche di consolidazione

I valori del coefficiente di consolidazione primaria verticale sono stati determinati dalle prove edometriche di laboratorio e con correlazioni empiriche in funzione del limite liquido (LL), vedasi ad esempio:

$$c_v = 0.009 (LL - 0.1) \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \text{ NAVFAC-DM 7.1. (1971)}$$

Il coefficiente di consolidazione secondaria, è stato stimato con la correlazione proposta nel NAVFAC-DM 7.1 (1982, vedasi figura seguente), in funzione del contenuto naturale di acqua (w_n).

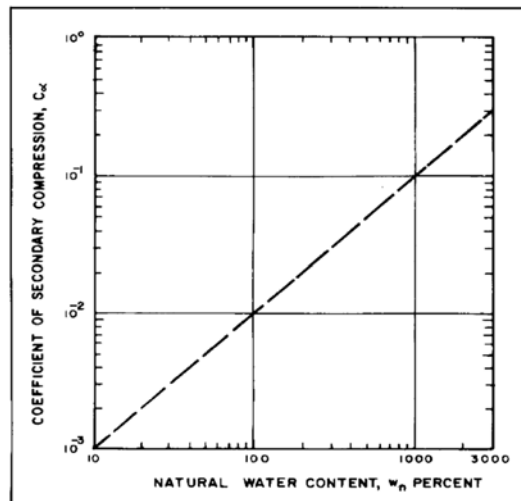


Figura 3 – Abaco di calcolo del coefficiente di consolidazione secondaria da w_n (NAVFAC, 1982)

Nei paragrafi che seguono verranno riportati a confronto per le varie unità geotecniche tutti i risultati delle prove in sito e dell'interpretazione delle prove eseguite.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 28 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

4.3 DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI LIMOSO ARGILLOSI - UNITÀ EC_{LA}

Si tratta di depositi coesivi limoso argillosi, intercettati lungo il tracciato a partire dal p.c. con spessore variabile fino ad un massimo di 10 m circa. Alcune coperture detritiche eluvio-colluviali, hanno evidenziato movimenti gravitativi in atto e quiescenti; questo materiale di accumulo di frana è stato identificato nel profilo stratigrafico con la sigla (**a**) in accordo a quanto riportato anche negli elaborati geologici. Le zone dove sono state individuate potenziali frane sono monitorate attraverso strumentazione inclinometrica installata nella campagna geognostica del 2017. Al momento della stesura del presente elaborato si ha a disposizione solo la lettura inclinometrica di zero.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori compresi fra 10 e 68 colpi/30 cm (Figura 4).

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati, su cui sono state eseguite prove di laboratorio.

Il peso di volume naturale è compreso mediamente fra 18.5 e 20.5 kN/m³ (Figura 5).

Dalle analisi granulometriche si ha (Figura 6).

- percentuale di ghiaia trascurabile, generalmente compresa fra 0 e 5% (media 2%);
- percentuale di sabbia marcatamente variabile, compresa fra 4 e 50% (media 20%);
- percentuale di fine (limo+argilla) generalmente maggiore del 50% con percentuale di limo compresa fra 23 e 54% e percentuale di argilla compresa fra 30 e 67%.

Il contenuto naturale d'acqua è compreso fra 15 e 28% (Figura 8).

Il limite liquido è compreso fra 36 e 60%, il limite plastico tra 15 e 29%, l'indice plastico fra 19 e 39% (Figura 8). Nella Figura 9 è mostrata la carta di plasticità di Casagrande: il materiale si colloca nella zona delle argille inorganiche a media plasticità.

Parametri di resistenza:

Dalle analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza (Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13):

$c' = 10 \div 63$ kPa	coesione drenata
$\varphi' = 17 \div 36$ °	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 100-170$ kPa	resistenza al taglio in condizioni non drenate

Nella Figura 13 sono state anche inseriti i valori di resistenza al taglio non drenata desunti dalle Pocket Penetrometer e dall'interpretazione delle prove SPT, da cui si osservano valori generalmente compresi fra 50 e 170 kPa, quindi confrontabili con quelli ottenuti in laboratorio.

Nella Figura 15 sono inseriti i risultati di tutte le prove di laboratorio (valori di picco e residui) ed i valori di progetto di picco:

$\varphi' = 24 \div 27$ °	angolo di resistenza al taglio
---------------------------	--------------------------------

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 29 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

$c' = 5 \div 15$ kPa coesione drenata

e in condizioni residue:

$\phi_r' = 19 \div 21^\circ$ angolo di resistenza al taglio residuo
 $c_r' = 0$ kPa coesione drenata residua.

Per le aree individuate con fenomeni di instabilità attivi la coltre è stata caratterizzata anche mediante back-analysis determinando per tentativi le caratteristiche di resistenza residua dei materiali che conducono all'equilibrio del pendio limite (FS=1) nelle condizioni idrauliche maggiormente critiche. Considerata la dolce pendenza media che caratterizza la superficie topografica dei pendii in esame, pari a circa $8 \div 9^\circ$, nell'ipotesi di pendio indefinito si ottiene:

$\phi_r' \approx 14^\circ$ angolo di resistenza al taglio residuo
 $c_r' = 0$ kPa coesione drenata residua.

Per i dettagli delle analisi svolte si rimanda al capitolo 5 della relazione geologica. I parametri residui minimi sopra indicati sono da intendersi rappresentativi delle zone classificate come frane attive, le cui coltri sono identificate nei profili geotecnici come unità "a". In attesa delle necessarie conferme mediante le misure inclinometriche tutt'ora in corso, si considera il rilievo geomorfologico rappresentato nell'apposito elaborato grafico,

Parametri di deformabilità:

Dalla singola prova Down-Hole eseguita nell'unità in esame (DH SN2120 per profondità inferiore ai 10 m da p.c.) e dalle correlazioni delle prove SPT si ricavano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi tra 100 e 400 MPa (Figura 16).

4.4 DEPOSITI DI ALTERAZIONE DEL SUBSTRATO – UNITÀ S_{ALT}

Si tratta di una fascia di spessore variabile costituita da argilla limosa, marnosa, generalmente consistente che sovrasta il substrato a carattere da semilitoide a litoide, rappresenta la parte superiore alterata del substrato.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori compresi fra 13 e 100 colpi/30 cm (Figura 17), ad indicare una consistenza variabile.

Nell'unità geotecnica in esame sono stati prelevati sia campioni rimaneggiati sia campioni indisturbati, su cui sono state eseguite prove di laboratorio.

Il peso di volume naturale è compreso mediamente fra 20 e 22.0 kN/m³ (Figura 18).

Dalle analisi granulometriche si ha (Figura 19).

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 0 e 30%;
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 1 e 50%;
- percentuale di fine (limo+argilla) maggiore del 40% con percentuale di limo compresa fra 44 e 100% e percentuale di argilla compresa fra 24 e 56%.

Il contenuto naturale d'acqua è compreso fra 13 e 19% (Figura 20).

Il limite liquido è compreso fra 35 e 54%, il limite plastico tra 18 e 24%, l'indice plastico fra

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 30 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

19 e 39% (Figura 20). Nella carta di plasticità di Casagrande il materiale si colloca nella zona delle argille inorganiche di media plasticità (Figura 21).

Parametri di resistenza:

Dalle analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza (Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26):

$$c' = 2 \div 93 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$

$$\phi' = 22 \div 38^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio}$$

$$c_u = 430 \text{ kPa} \quad \text{resistenza al taglio in condizioni non drenate}$$

Nella Figura 25 sono inseriti anche i valori di resistenza al taglio non drenata desunti dalle prove di Pocket Penetrometer e dall'interpretazione delle prove SPT, che hanno fornito valori molto dispersi tra 75 e maggiori di 700 kPa nei livelli più consistenti.

Nella Figura 26 sono riportati tutti i valori delle prove di laboratorio (parametri di picco e residui) confrontati con i valori assunti in progetto:

$$\phi' = 27 \div 30^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio}$$

$$c' = 20 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$

Sono state inoltre eseguite prove di taglio in condizioni residue che, come era lecito attendersi, hanno misurato angoli di resistenza al taglio simili a quelli ottenuti sui depositi eluvio colluviali:

$$\phi_r' = 19^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio residuo}$$

$$c_r' = 0 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata residua}$$

Dalla figura si osserva che i valori di progetto si correlano bene con i valori minimi del laboratorio.

Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame le caratteristiche di deformazione sono state stimate dalla prova Down-Hole (SN2120 tra 9 e 13 m da p.c.) e dalle correlazioni in base alle prove SPT. Da cui si stimano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 150 e 600 MPa (Figura 27).

4.5 FORMAZIONE DI CAMERINO – UNITÀ Pa / UNITÀ Ap

La formazione è stata intercettata nelle gallerie naturali S. Anna e Mecciano.

All'interno della formazione di Camerino si sviluppa la maggior parte del tracciato di progetto. Da una attenta analisi dei sondaggi è stato determinato lo spessore e la posizione degli strati arenacei e degli strati pelitico-marnosi, al fine di giungere ad una stima del rapporto arenaria/pelite secondo la classificazione AGI – 1979.

- **Unità Pa - Substrato Pelitico – Arenaceo con $0,2 \leq A/P \leq 1$:** rappresentata da litofacies pelitico-arenacee con un rapporto $A/P < 1$.
- **Unità Ap - Substrato Arenaceo – Pelitico $A/P \geq 1$:** formata essenzialmente da litofacies costituite da arenarie e marne siltose grigie con un rapporto $A/P > 1$.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 31 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Al momento della stesura del presente elaborato, non sono ancora disponibili i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati nella campagna 2017, quindi per la caratterizzazione geotecnica del substrato si farà riferimento a quanto eseguito per il lotto 2 (richiamato nel seguito), dove sono state eseguite numerose indagini in sito ed in laboratorio per la caratterizzazione di queste formazioni di base.

Le varie associazioni presentano un rapporto complessivo medio tra $A/P = 0.9$ e 0.65 . Prevalge generalmente la componente pelitico-marnosa ($A/P < 1$) il cui comportamento meccanico è principalmente governato dalla stratificazione e laminazione delle litofacies torbiditiche.

Tale distinzione geologica di facies, sicuramente corretta in relazione alla variabilità granulometrica ed alla genesi dei materiali (fasi deposizionali connotate da differente energia), non è percorribile dal punto di vista prettamente geotecnico per i seguenti motivi:

- le due componenti litologiche, A_p e A_a , sono fittamente intercalate e difficilmente distinguibili alla scala di progetto;
- dalle prove di laboratorio non si riscontra una sostanziale differenza della distribuzione granulometrica fra le due associazioni (A_a e A_p , Figura 29 e Figura 30); il contenuto di sabbia è generalmente inferiore al 50% che significa la presenza di una importante matrice fine (limo e argilla) che ne governa il comportamento meccanico;
- le prove meccaniche di resistenza condotte in laboratorio non evidenziano una sostanziale differenza di comportamento per le due facies (come riscontrabile nei grafici di seguito commentati ove i risultati sono rappresentati distintamente per A_a e A_p).

Pertanto, ai fini della caratterizzazione geotecnica di progetto, si è scelto di accorpare la formazione di Camerino in un'unica unità geotecnica.

Per gli stessi motivi sopra riportati, la corretta definizione del modello geotecnico è ricondotto ai principi di meccanica delle terre. Quindi in base al quadro conoscitivo complessivamente disponibile la caratterizzazione geotecnica si basa, in ordine di importanza:

- prove di laboratorio eseguite sui campioni indisturbati, mediante un classico approccio di meccanica delle terre;
- prove pressiometriche in sito, con particolare riferimento ai parametri di deformabilità, che coinvolgendo un volume di materiale superiore forniscono valori maggiormente rappresentativi riferiti alla scala di progetto;
- in sub-ordine per confronto, mediante indici di classificazioni dell'ammasso, basati sull'esame visivo ed i rilievi geomeccanici eseguiti sulle carote.

Il peso di volume naturale è compreso generalmente fra 22.0 e 26.0 kN/m^3 (Figura 28). Si adotta un range di progetto di $23.0 \div 23.5$ kN/m^3 .

Dalle analisi granulometriche sull'unità A_a si ha (Figura 29).

- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 0 e 55% (media circa 20%);
- percentuale di fine (limo+argilla) generalmente maggiore del 50% con percentuale di limo compresa fra 11 e 59% e percentuale di argilla compresa fra 17 e 88%.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 32 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Dalle analisi granulometriche sull'unità Ap si ha (Figura 30).

- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 9 e 19%;
- percentuale di fine (limo+argilla) maggiore dell' 80% con percentuale di limo compresa fra 45 e 49% e percentuale di argilla compresa fra 32 e 46%.

Si osserva che la differenziazione delle facies, non trova completo riscontro nella distribuzione granulometrica determinata in laboratorio; la percentuale di fine è quella prevalente (limo e argilla) con percentuali variabili tra 45÷100%; costituisce la matrice del materiale e ne governa il comportamento meccanico dell'ammasso.

4.5.1 Parametri di resistenza

Dalle analisi di laboratorio complessivamente disponibili si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza mostrati in Figura 31,33 e 34

$$c' = 3\div 378 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$

$$\phi' = 18\div 43^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio.}$$

Per una corretta interpretazione i risultati vengono rappresentati in un unico grafico nel piano τ - σ' (piano Mohr-Coulomb). A tal fine i risultati delle prove triassiali generalmente restituiti nel piano degli invarianti t-s sono stati trasformati nel piano τ - σ' mediante semplici relazioni trigonometriche. Infatti il grafico t-s rappresenta il luogo dei punti della sommità del semicerchio di Mohr nel piano τ - σ' .

I risultati sono sintetizzati nel grafico di Figura 34.

Nella stessa Figura 34 è rappresentato graficamente il range dei parametri di resistenza scelti come valori caratteristici di progetto:

- Per tensioni $\sigma_v' < 700 \text{ kPa}$
 $\phi' = 31\div 35^\circ$ angolo di resistenza al taglio
 $c' = 120\div 150 \text{ kPa}$ coesione drenata
- Per tensioni $\sigma_v' > 700 \text{ kPa}$:
 $\phi' = 25\div 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio
 $c' = 220\div 250 \text{ kPa}$ coesione drenata

Il criterio di resistenza è unico. Il cambiamento dei parametri si ha perché si è scelto di linearizzare un involuppo sperimentale pseudo-curvilineo mediante due tratti rettilinei con vertice a $\sigma_v' = 700 \text{ kPa}$ (circa 30 m di profondità, vedasi Figura 34).

L'intervallo di progetto si colloca volutamente nel range medio basso della dispersione sperimentale osservata, per i motivi descritti nel seguito.

Tenuto conto delle formazioni attraversate, la caratterizzazione meccanica può risultare sbilanciata dai risultati ottenuti su campioni più intatti, sempre di buona qualità e facilmente prelevabili. Meno dati sono invece disponibili per i campioni delle porzioni più destrutturati ovvero terrigeni per le inevitabili difficoltà di campionamento, prima, e confezionamento dei provini poi. Inoltre per materiali strutturalmente complessi occorre considerare come la presenza e l'orientamento delle discontinuità/laminazioni può influenzare la resistenza misurata durante la prova. Pertanto le resistenze massime misurate in laboratorio sono rappresentative delle porzioni di materiale maggiormente intatto e/o con laminazioni orientate favorevolmente, mentre le resistenze minime sono rappresentative dei campioni confezionati con l'orientamento più sfavorevole delle

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 33 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

discontinuità presenti. Tenuto conto della rappresentatività statistica dei campioni testati, la media delle resistenze misurate nei tests di laboratorio sovrastima la reale resistenza in sito del materiale. Pertanto è indispensabile tenere conto di tale valutazione, adottando parametri di progetto corrispondenti alla fascia medio bassa.

Nel seguito, l'insieme delle informazioni disponibili vengono anche elaborate in base ad un approccio tipico di meccanica delle rocce.

Sui campioni litoidi sono state eseguite prove di compressione monoassiale che per l'unità Pa hanno fornito i seguenti valori medi e relativi frattili inferiore al 10% (Figura 35):

$$\sigma_{c,media}' = 0.5 \text{ MPa per } z < 10\text{m}$$

$$\sigma_{c,10\%}' = 0.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,media}' = 2.3 \text{ MPa per } 10 < z < 40\text{m}$$

$$\sigma_{c,10\%}' = 0.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,media}' = 7.2 \text{ MPa per } z > 40\text{m}$$

$$\sigma_{c,10\%}' = 3.1 \text{ MPa.}$$

Per l'unità Ap si osservano valori più elevati, solo localmente rappresentativi delle stratificazioni arenacee. In ogni caso il frattile inferiore al 10% è in linea con i valori dell'unità Pa:

$$\sigma_{c,media}' = 20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,10\%}' = 2 \text{ MPa per } z > 40\text{m.}$$

4.5.2 Parametri di deformabilità

In Figura 37 sono riportati tutti i valori del modulo di deformazione elastico operativo $E'_{operativo}$ ottenuti dalle varie prove disponibili (prove dilatometriche e prove triassiali di laboratorio).

I moduli determinati dalle prove dilatometriche si collocano tra 50 e 600 MPa (eccetto 5 prove che hanno misurato valori > 700 MPa).

Il grafico include anche i moduli operativi determinati alla luce delle prove triassiali di laboratorio eseguite nella campagna del 2016 (E'_{50}), opportunamente amplificati (x 2.5 volte) per considerare il minore livello deformativo atteso in esercizio durante lo scavo delle gallerie (0.1-1.0%), rispetto a quello mediamente testato in laboratorio al 50% della rottura (circa 2%). Infatti, considerando le tipiche curve di decadimento $G/Go=f(\epsilon_a)$ si valuta un rapporto tra il modulo elastico misurato (E'_{50}) e quello operativo (E'_{op}) compreso tra 2÷3 volte (vedasi Figura 36).

In progetto si assume la seguente correlazione in funzione della profondità (graficata anch'essa in Figura 37):

$$E'_{operativo} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa per } z < 40\text{m}$$

$$E'_{operativo} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa per } z > 40\text{m.}$$

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 34 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

4.5.3 Permeabilità

In corrispondenza dell'unità Pa sono disponibili prove di permeabilità Lefranc e Lugeon che hanno fornito valori compresi tra 5.79 E-09 e 1.07E-08 m/s, mentre per l'unità Ap è disponibile solo una prova Lefranc che ha fornito un valore di permeabilità di 1.10 E-08 m/s.

4.6 FORMAZIONE DELLO SCHLIER – S_{CH}

E' stata intercettata nella galleria S. Barbara.

Al momento della stesura del presente elaborato, non sono ancora disponibili i risultati delle prove di laboratorio sui campioni prelevati nella campagna del 2017, quindi per la caratterizzazione geotecnica del substrato si farà riferimento a quanto eseguito per il lotto 2 (richiamato nel seguito), dove sono state eseguite numerose indagini in sito ed in laboratorio per la caratterizzazione di queste formazioni di base.

Si tratta di alternanze di marne argillose, siltose e con intercalazioni di calcare detritico e calcareniti. A livello di ammasso prevale la componente marnosa più o meno argillosa con caratteristiche meccaniche e caratteristiche fisiche che possono essere assimilate alla frazione più marnosa del Camerino (Pa).

Il peso di volume naturale è compreso mediamente fra 22.0 e 24.0 kN/m³ (Figura 38).

In laboratorio si ha a disposizione 3 prove triassiale (eseguite sullo stesso campione) che nel report di laboratorio è stata interpretata con i seguenti parametri di resistenza: $c' = 0$ kPa, $\phi' = 42^\circ$, che diventano $c' = 100$ kPa, $\phi' = 20^\circ$ considerando solo i due provini testati alle tensioni di confinamento inferiori (Figura 39).

Sui campioni litoidi sono state eseguite prove di compressione monoassiale che evidenziano un marcato incremento delle resistenze a profondità maggiori di 30÷40 m; hanno fornito i seguenti valori (Figura 35):

$$\begin{aligned}\sigma_{c,media}' &= 0.8 \text{ MPa} && \text{per } z < 30 \div 40 \text{ m} \\ \sigma_{c,media}' &= 14 \text{ MPa} && \text{per } z > 30 \div 40 \text{ m} \\ \sigma_{c,10\%}' &= 10 \text{ MPa}.\end{aligned}$$

Dalle stratigrafie dei sondaggi del 2016 è stato eseguito il rilievo geomeccanico ai fini della caratterizzazione dell'ammasso roccioso e quindi si è pervenuti ad un range di valori per il parametro GSI (=44÷84, valore medio 67).

I dati a disposizione (prove di laboratorio) per la formazione dello Schlier sono minori rispetto alla formazione di Camerino ed anche piuttosto dispersi; inoltre le formazioni come si evince dalle stratigrafie dei sondaggi sono difficilmente distinguibili, quindi si è scelto di caratterizzarle in maniera simile a grande profondità.

Sia in affioramento che in alcuni dei sondaggi effettuati per la campagna geognostica, lo Schlier è risultato essere particolarmente tettonizzato/fratturato con un diffuso e tipico "clivaggio" che ne oblitera spesso la stratificazione, con superfici traslucide e segni di rigonfiamento; indizi questi di potenziale decadimento delle caratteristiche meccaniche che si possono riscontrare alle basse coperture e agli imbocchi delle GN.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 35 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Pertanto, seppure assimilabile alla formazione di Camerino, si è cautelativamente scelto di caratterizzare il materiale con una resistenza inferiore se intercettato dallo scavo alle basse coperture (profondità < 20-30 m) e ai tratti di imbocco delle gallerie.

Per tensioni $\sigma_v' < 550$ kPa si assumono i seguenti parametri di resistenza (Figura 39):

$$\begin{aligned} \phi' &= 26 \div 28^\circ && \text{angolo di resistenza al taglio} \\ c' &= 50 \div 60 \text{ kPa} && \text{coesione drenata} \end{aligned}$$

Per tensioni $\sigma_v' > 550$ kPa si assumono i seguenti parametri di resistenza (Figura 39):

$$\begin{aligned} \gamma' &= 25 \div 30^\circ && \text{angolo di resistenza al taglio} \\ c' &= 220 \div 250 \text{ kPa} && \text{coesione drenata} \end{aligned}$$

In Figura 37 sono riportati i valori del modulo di deformazione elastico operativo $E'_{\text{operativo}}$ ottenuti dalle varie prove, rappresentati insieme ai dati della formazione di Camerino (cfr. paragrafo 4.5.2. Si adotta una legge di progetto unica per le due unità come rappresentata in Figura 37:

$$\begin{aligned} E'_{\text{operativo}} &= 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa per } z < 40\text{m} \\ E'_{\text{operativo}} &= 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa per } z > 40\text{m} \end{aligned}$$

In corrispondenza dell'unità in esame sono disponibili prove di permeabilità Lefranc e Lugeon che hanno fornito valori compresi tra $3.00 \cdot 10^{-10}$ e $1.44 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 36 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

4.7 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Nel seguito si riassumono i parametri geotecnici di progetto per le unità geotecniche intercettate dagli scavi delle gallerie naturali in progetto.

Unità Ecla - Depositi eluvio colluviali limoso argillosi

$\gamma = 18.5 \div 20.5$ kN/m ³	peso di volume naturale
$\phi' = 24 \div 27^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 5 \div 15$ kPa	coesione drenata
$\phi_r' = 14^\circ \div 21^\circ$	angolo di resistenza al taglio residuo (i parametri minimi vanno associate alle coltri con instabilità attiva, unità a)
$c_r' = 0$ kPa	coesione drenata residua
$c_u = 50 \div 160$ kPa	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E_o = 100 \div 400$ MPa	modulo di deformazione elastico iniziale

Unità Salt – Substrato alterato argilloso limoso

$\gamma = 20.0 \div 20.5$ kN/m ³	peso di volume naturale
$\phi' = 27 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 20$ kPa	coesione drenata
$\phi_r' = 19^\circ$	angolo di resistenza al taglio residuo
$c_r' = 0$ kPa	coesione drenata residua
$c_u = 75 \div 430$ kPa	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E_o = 150 \div 600$ MPa	modulo di deformazione elastico iniziale

Unità Pa – Substrato pelifico arenaceo / Unità Ap – substrato arenaceo pelifico

$\gamma = 23.0 \div 23.5$ kN/m ³	peso di volume naturale
per tensioni $\sigma_v' < 700$ kPa:	
$\phi' = 31 \div 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 120 \div 150$ kPa	coesione drenata
per tensioni $\sigma_v' > 700$ kPa:	
$\phi' = 25 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 220 \div 250$ kPa	coesione drenata
$E_{op} = 20 + 5.75 \cdot z$ MPa per $z < 40$ m operativo	modulo di deformazione elastico
$E_{op} = 250 + 0.8 \cdot z$ MPa per $z > 40$ m	

Unità Sch – Formazione dello Schlier

$\gamma = 23.0 \div 24.0$ kN/m ³	peso di volume naturale
per tensioni $\sigma_v' < 550$ kPa:	
$\phi' = 26 \div 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 50 \div 60$ kPa	coesione drenata
per tensioni $\sigma_v' > 550$ kPa:	
$\phi' = 25 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 220 \div 250$ kPa	coesione drenata

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 37 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

$$E'_{\text{operativo}} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa}$$

$$E'_{\text{operativo}} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa}$$

per $z < 40$ m modulo di deformazione
elastico operativo

per $z > 40$ m.

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 38 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

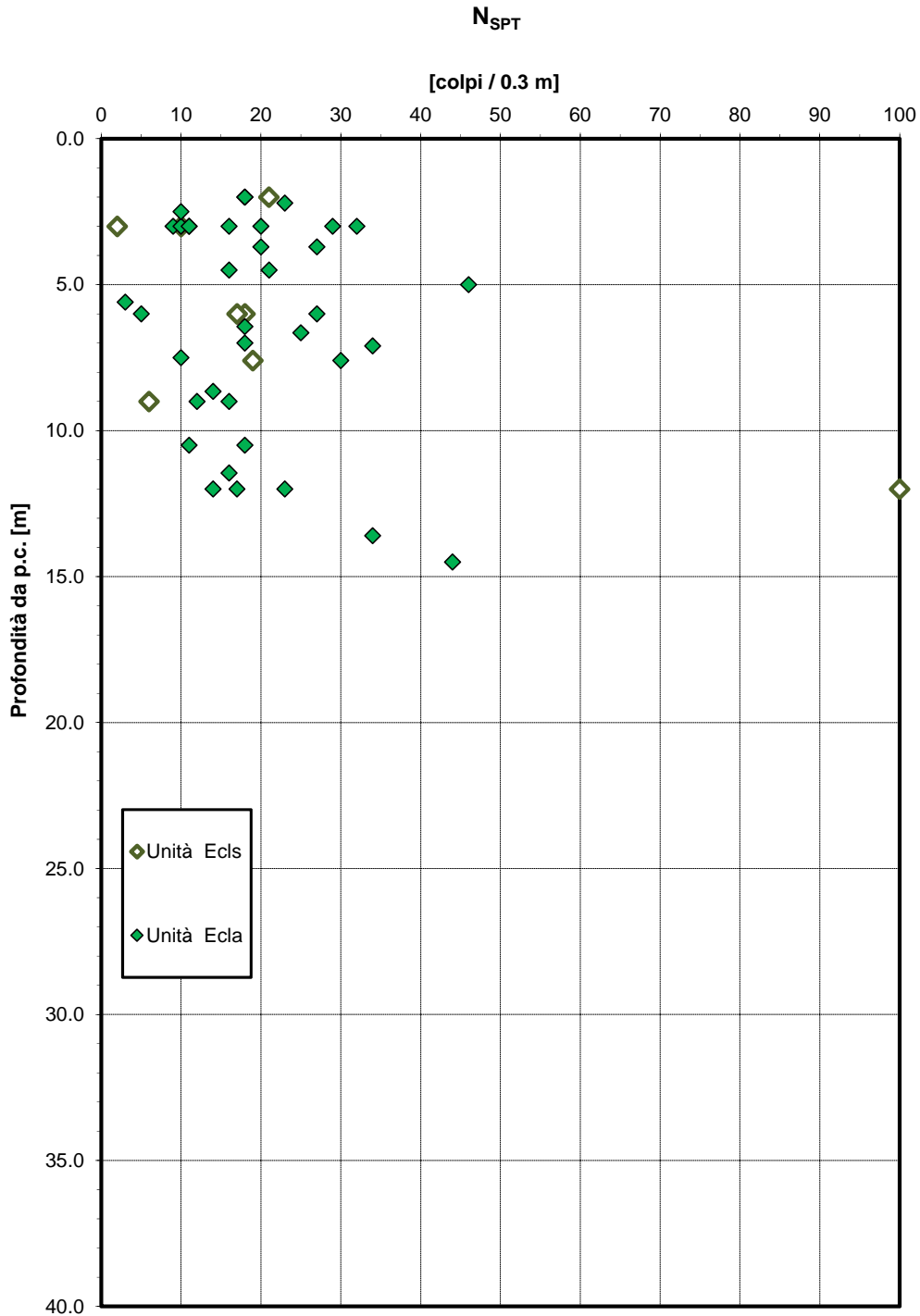


Figura 4 – Valori di N_{SPT} – Unità Ecla, Ecls

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 39 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Peso di volume

γ [kN/m³]

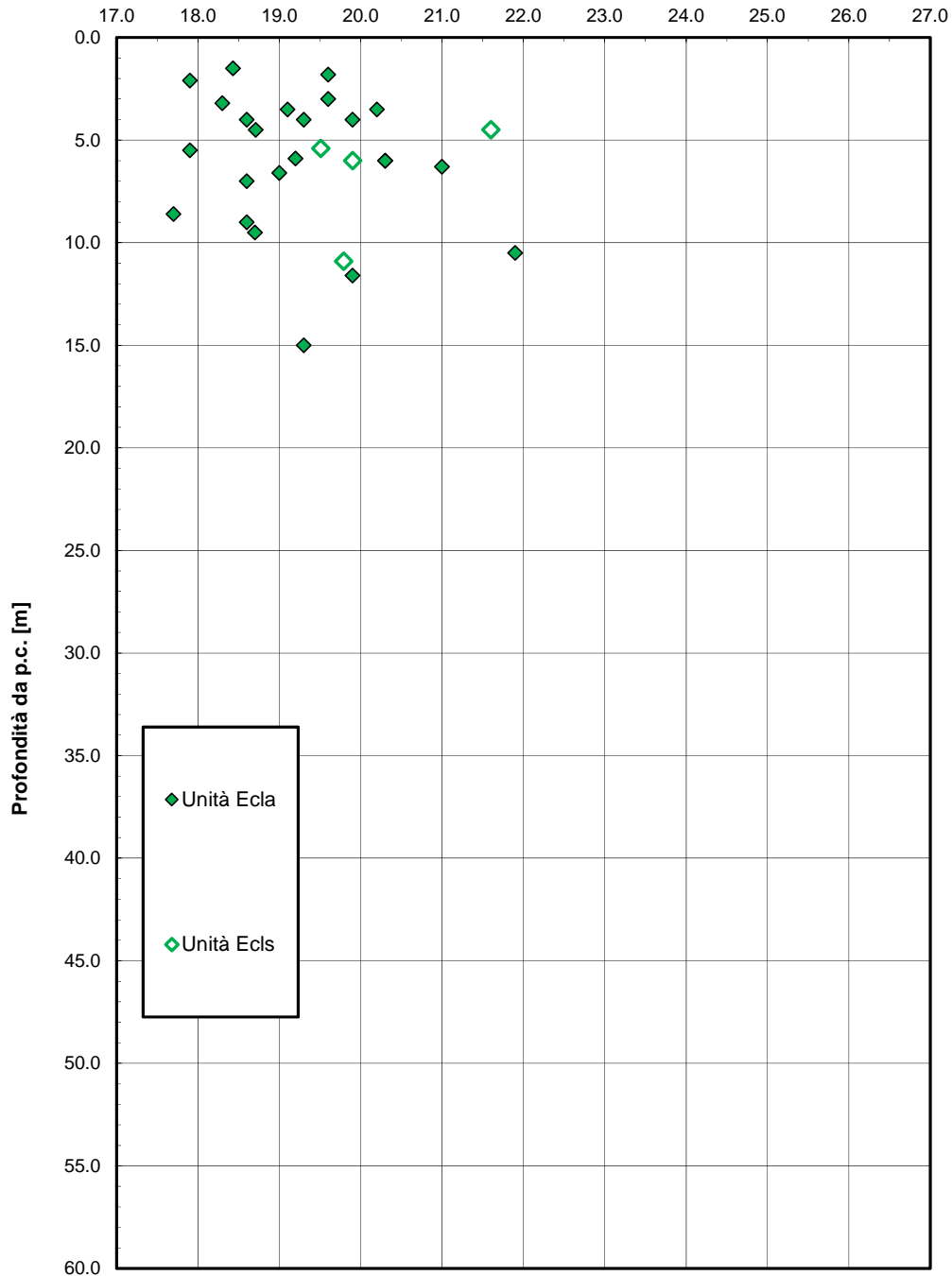


Figura 5 – Peso di volume naturale – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 40 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Ecla

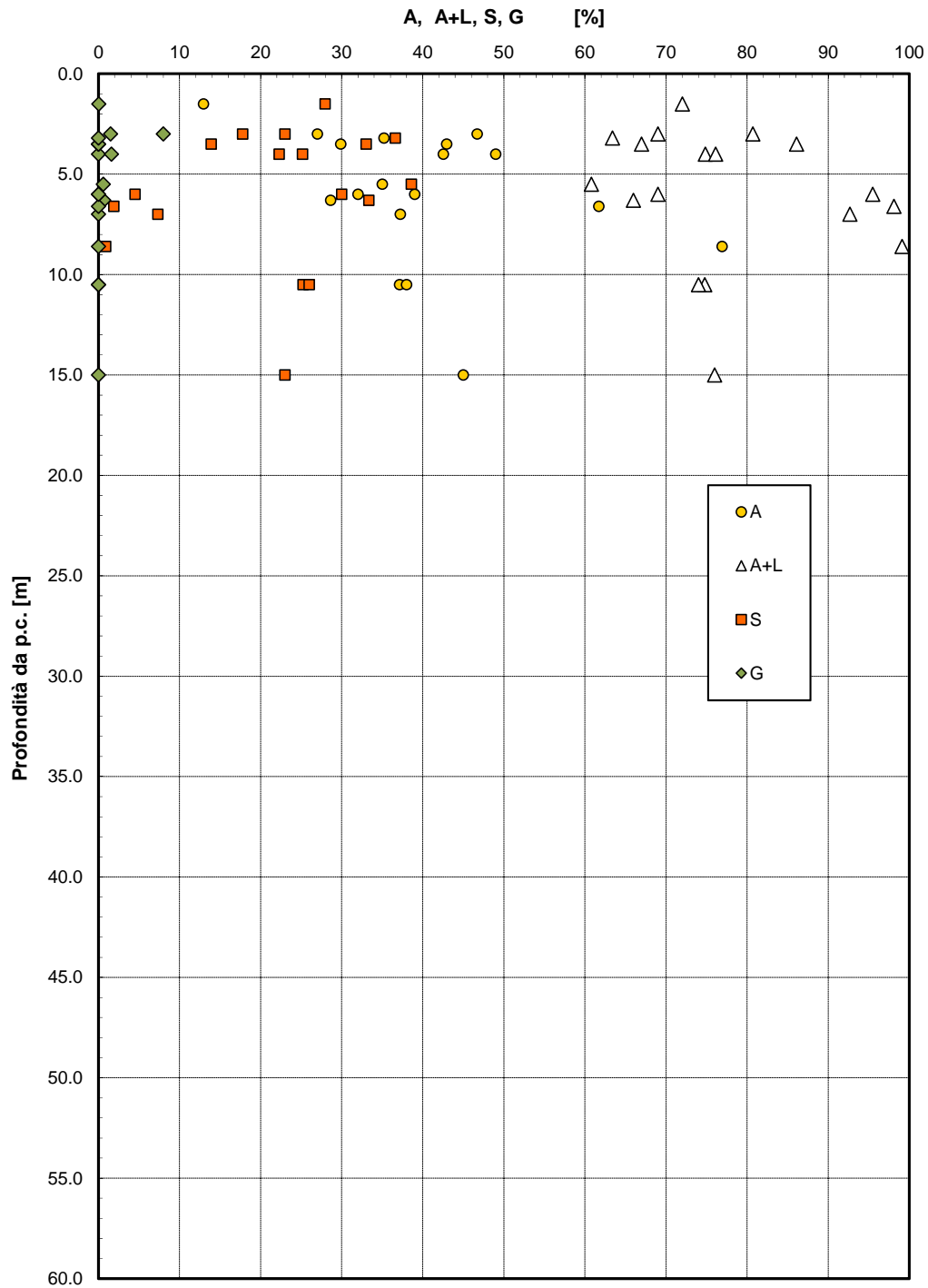


Figura 6 – Analisi granulometrica – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 41 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Ecls

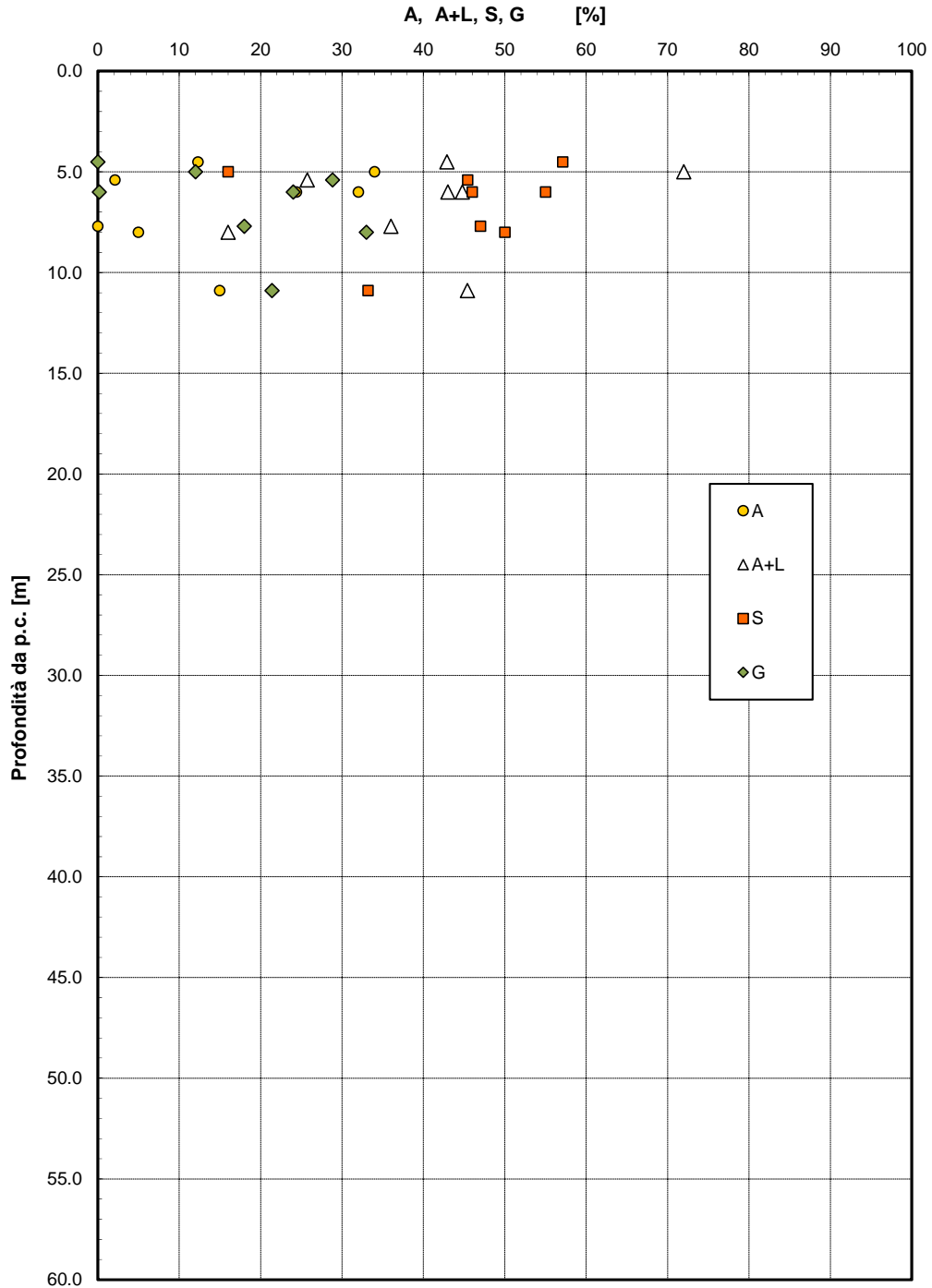


Figura 7 – Analisi granulometrica – Unità Ecls

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 42 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Limiti di Atterberg e contenuto naturale d'acqua

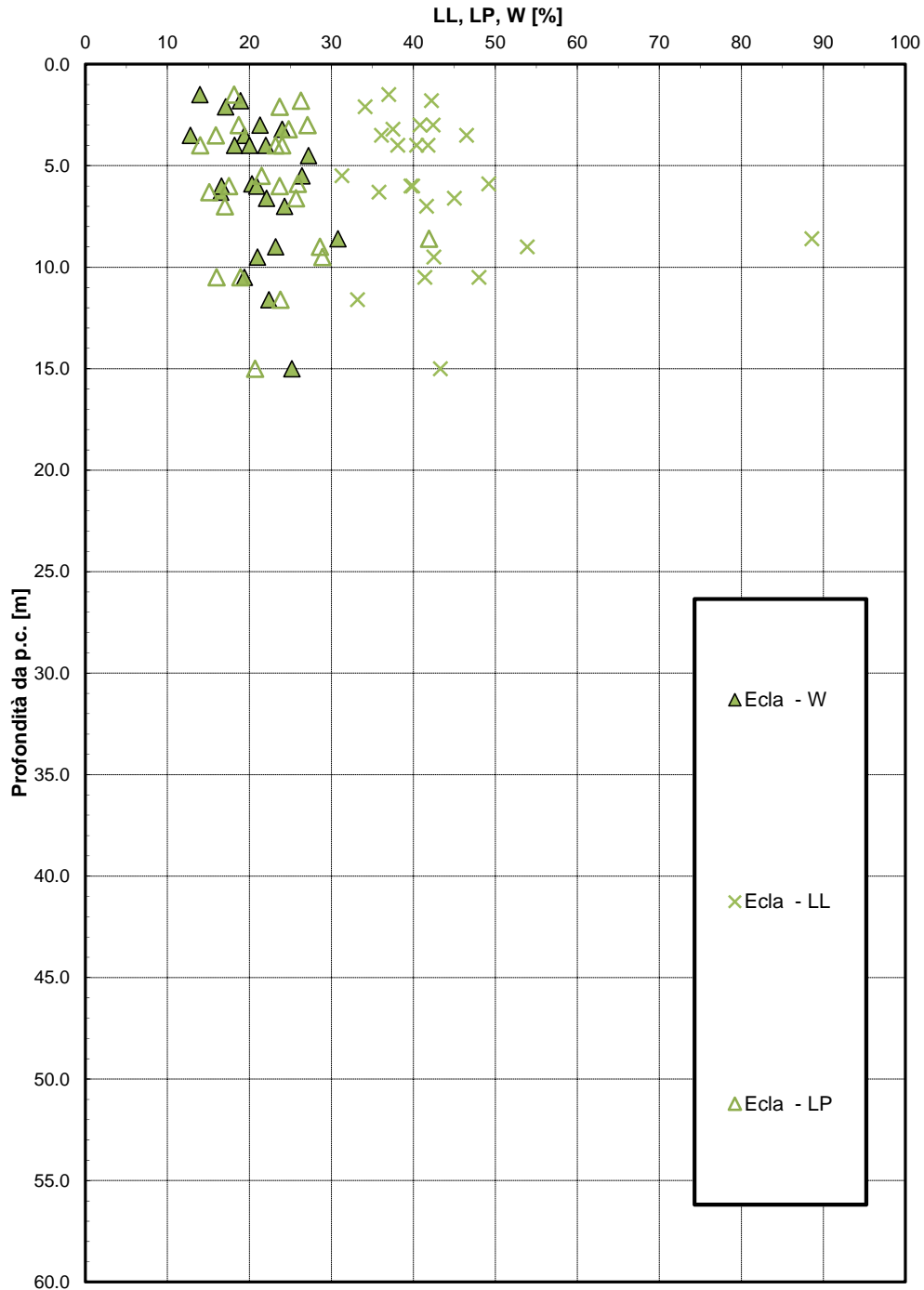


Figura 8 – Limiti di Atterberg – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 43 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Carta di Plasticità di Casagrande

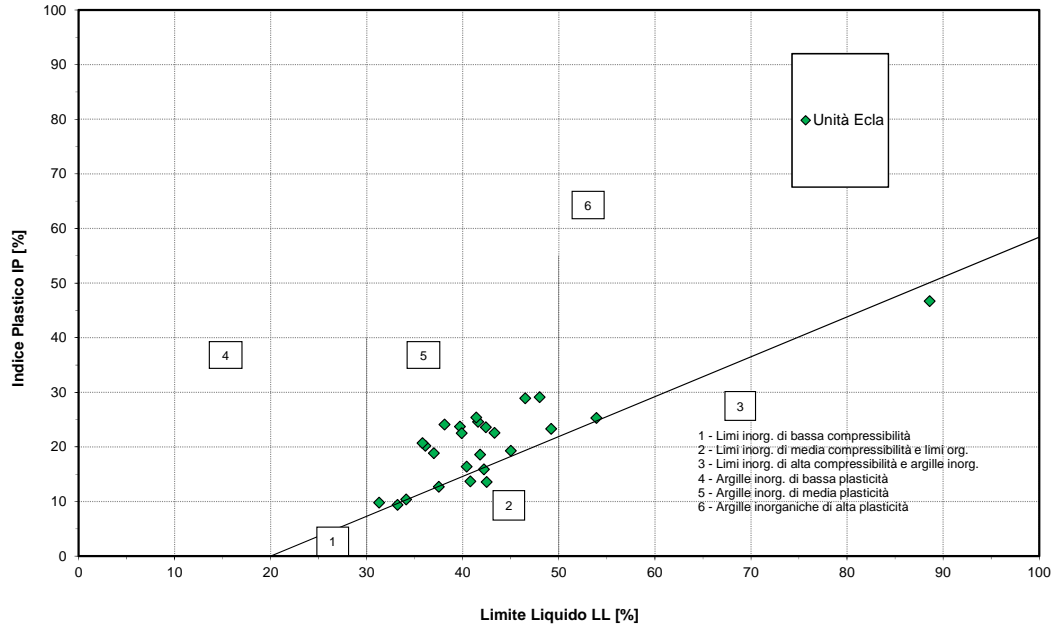


Figura 9 – Carta di plasticità di Casagrande – Unità Ecla

Andamento della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio

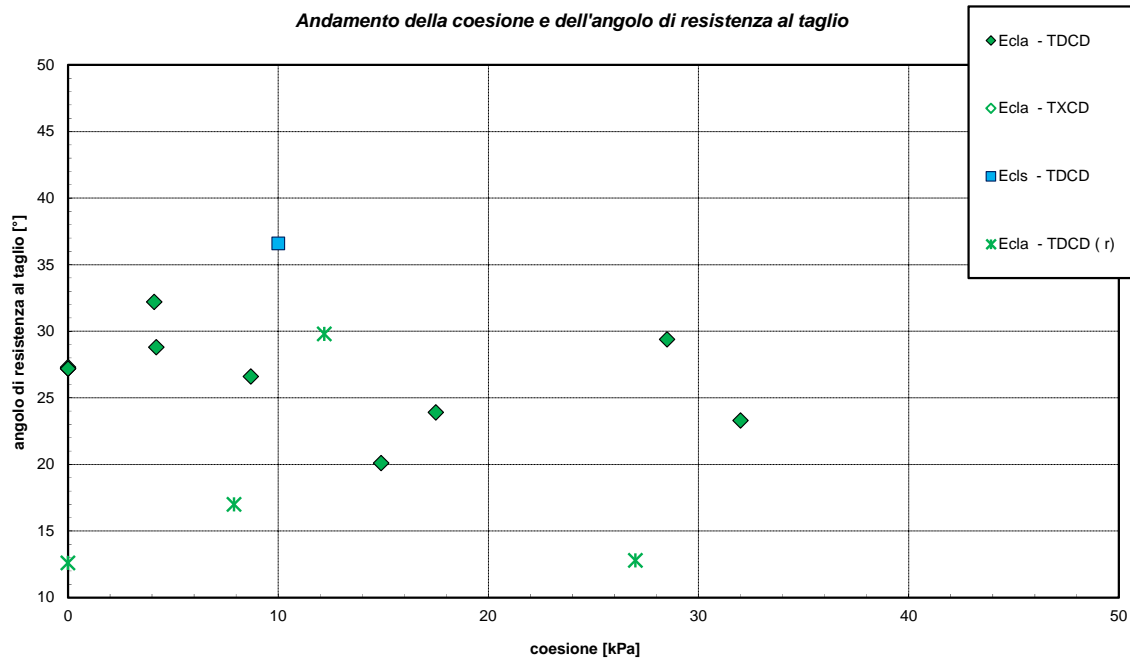


Figura 10 – Angolo di resistenza al taglio e coesione drenata – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 44 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della coesione con la profondità

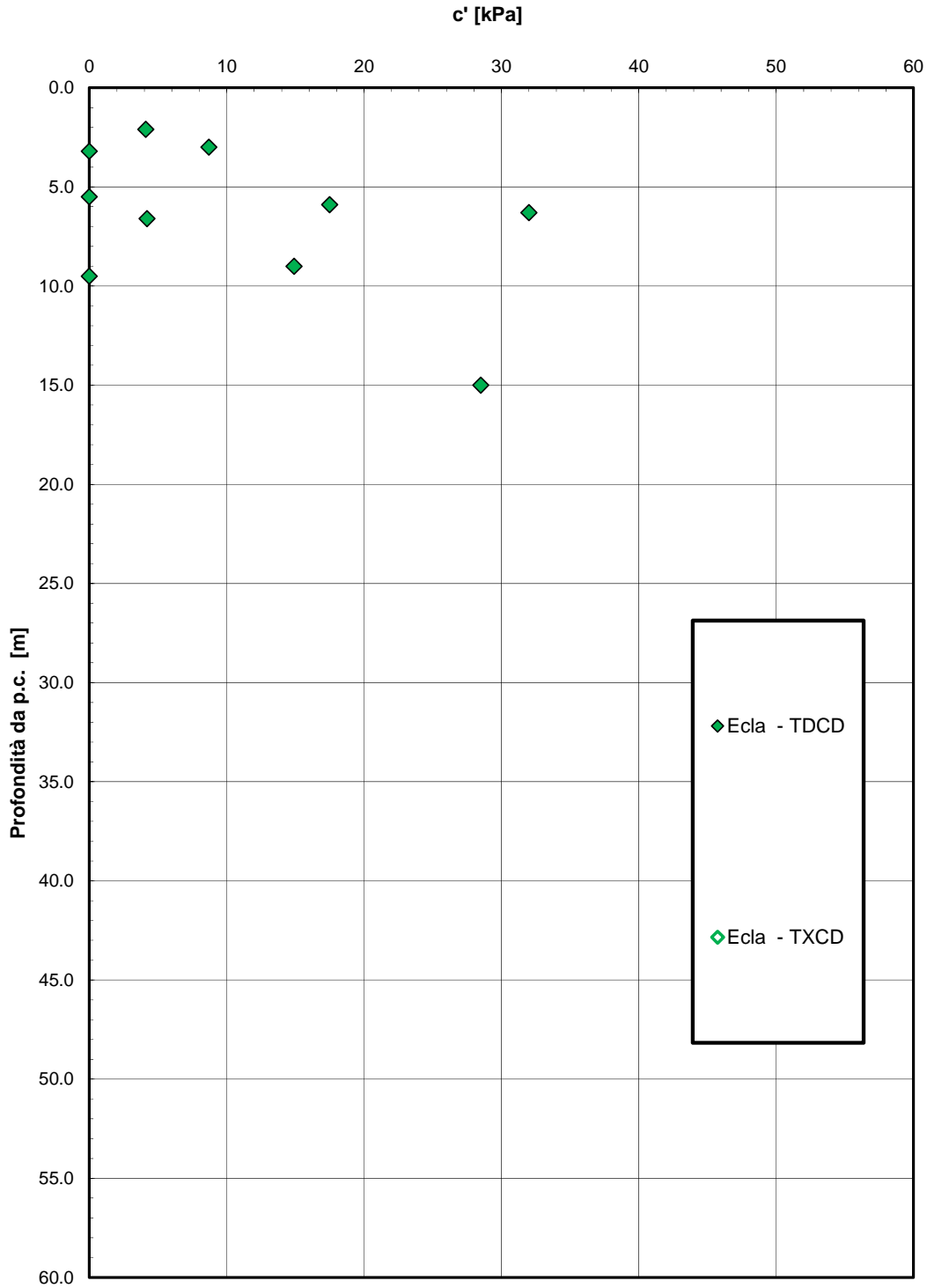


Figura 11 – Andamento della coesione con la profondità – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 45 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della resistenza al taglio con la profondità

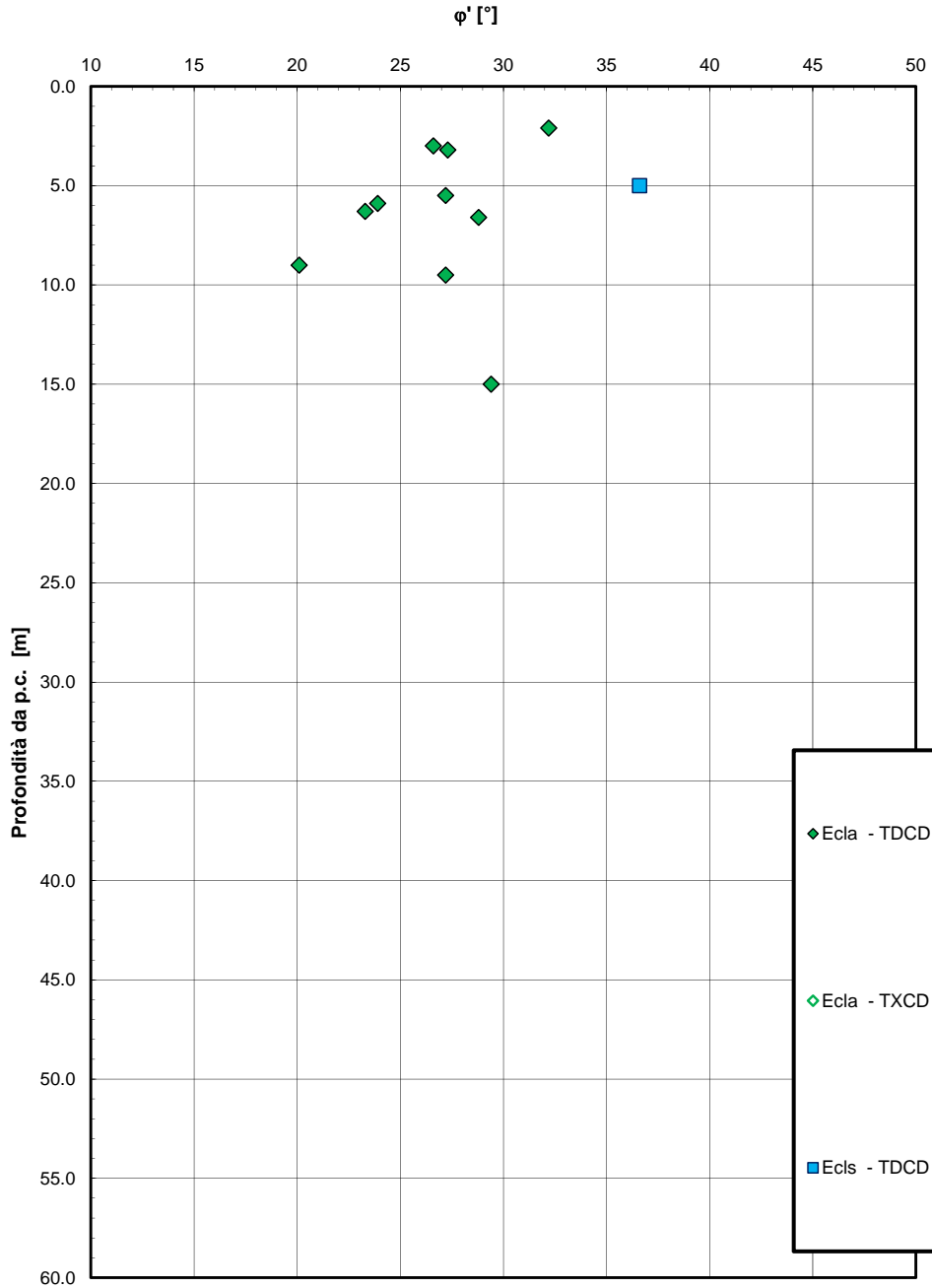


Figura 12 – Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 46 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

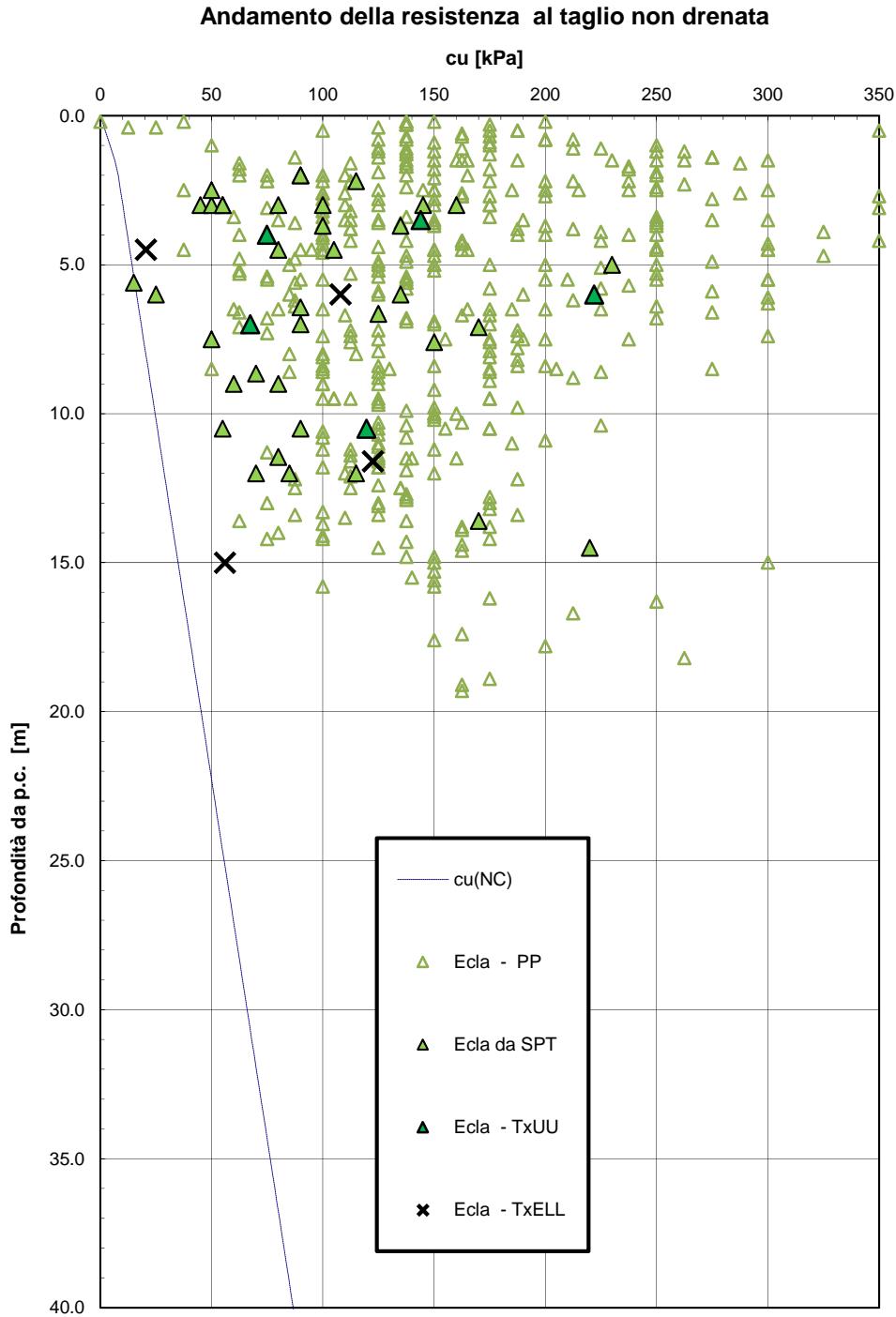


Figura 13 – Resistenza al taglio non drenata – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 47 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

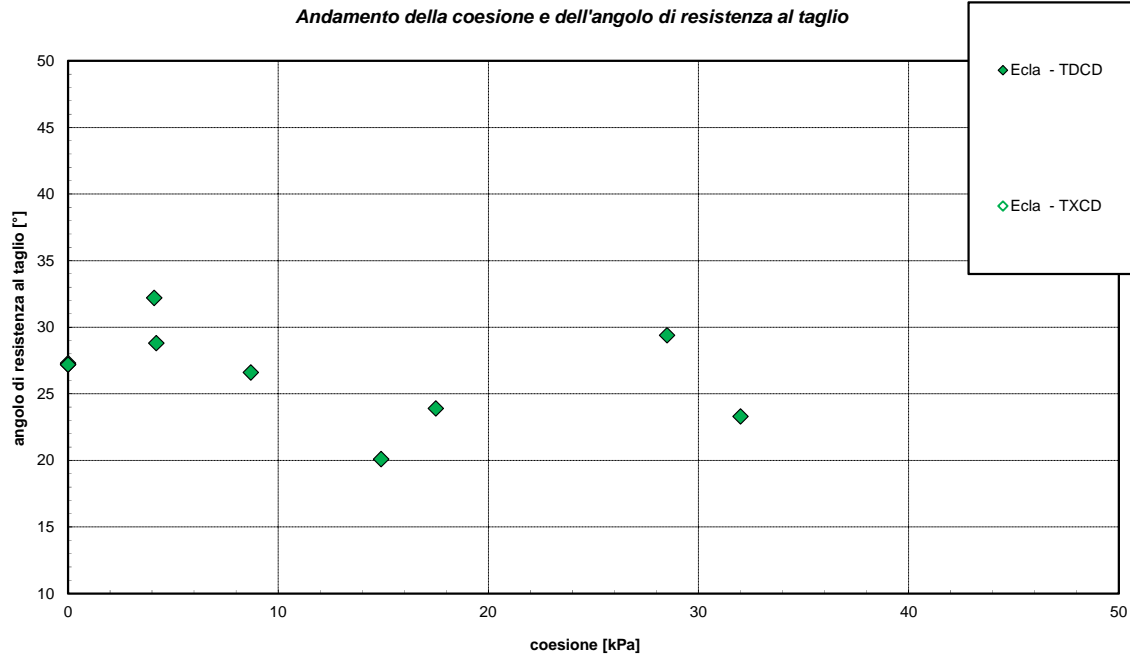


Figura 14 - Parametri di resistenza coltri eluvio colluviali coesive – unità Ecla

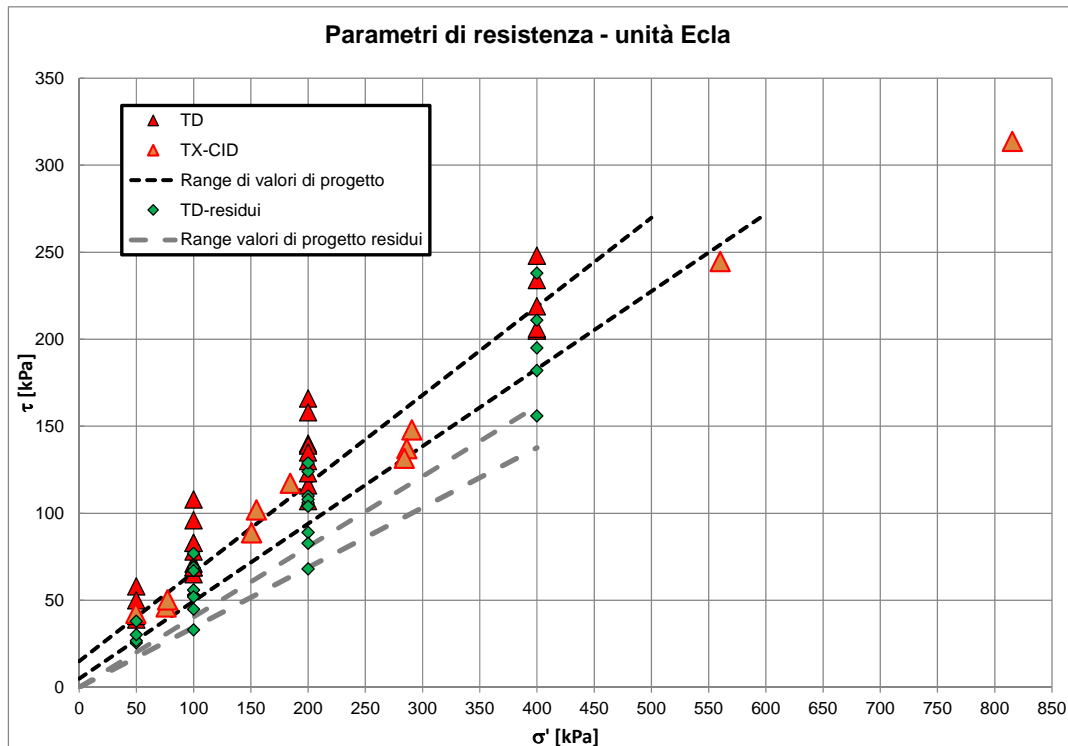


Figura 15 – Parametri di resistenza coltri eluvio colluviali coesive – Unità Ecla (dal lotto 2)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 48 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT

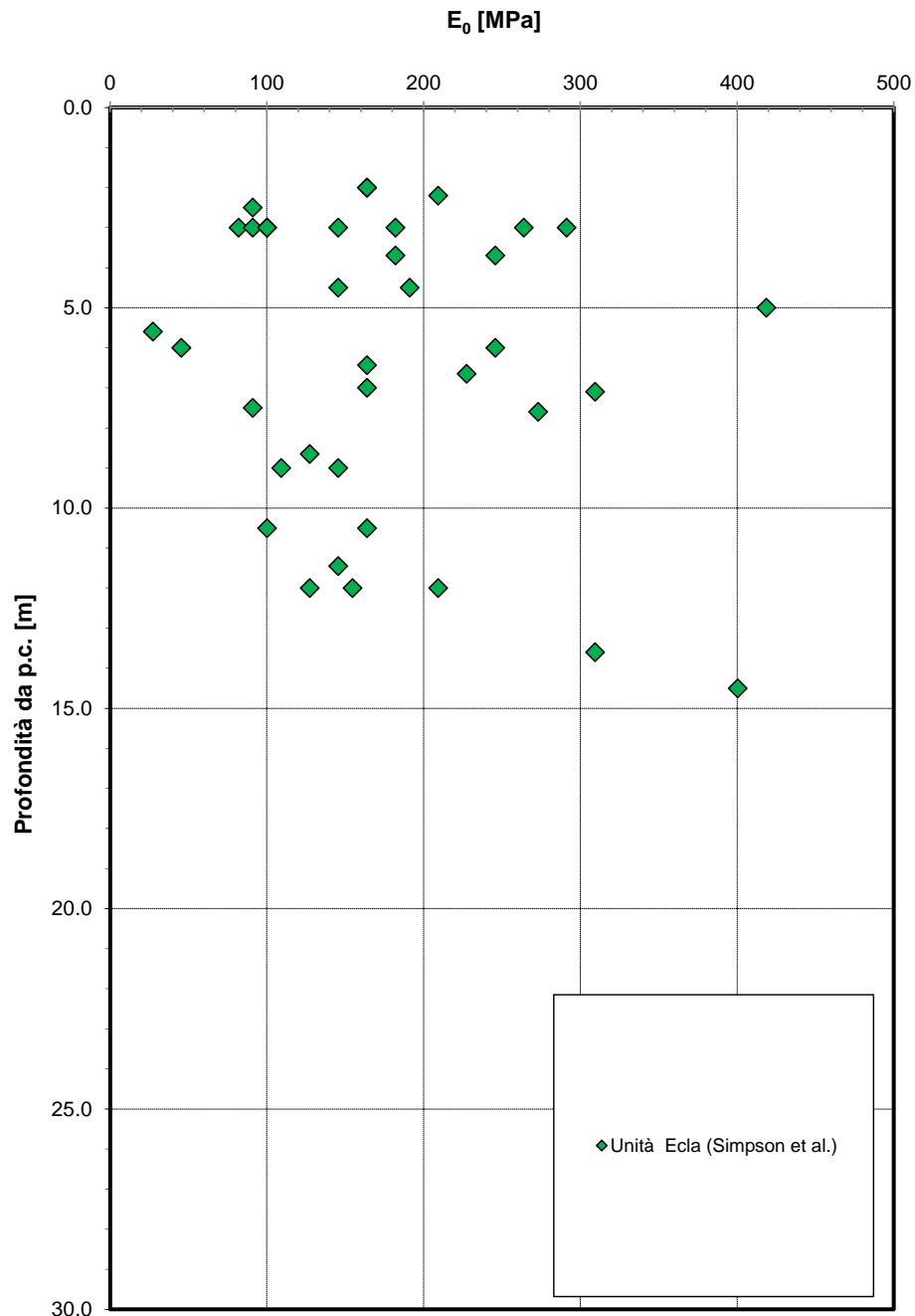


Figura 16 – Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT e sismiche – Unità Ecla

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 49 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

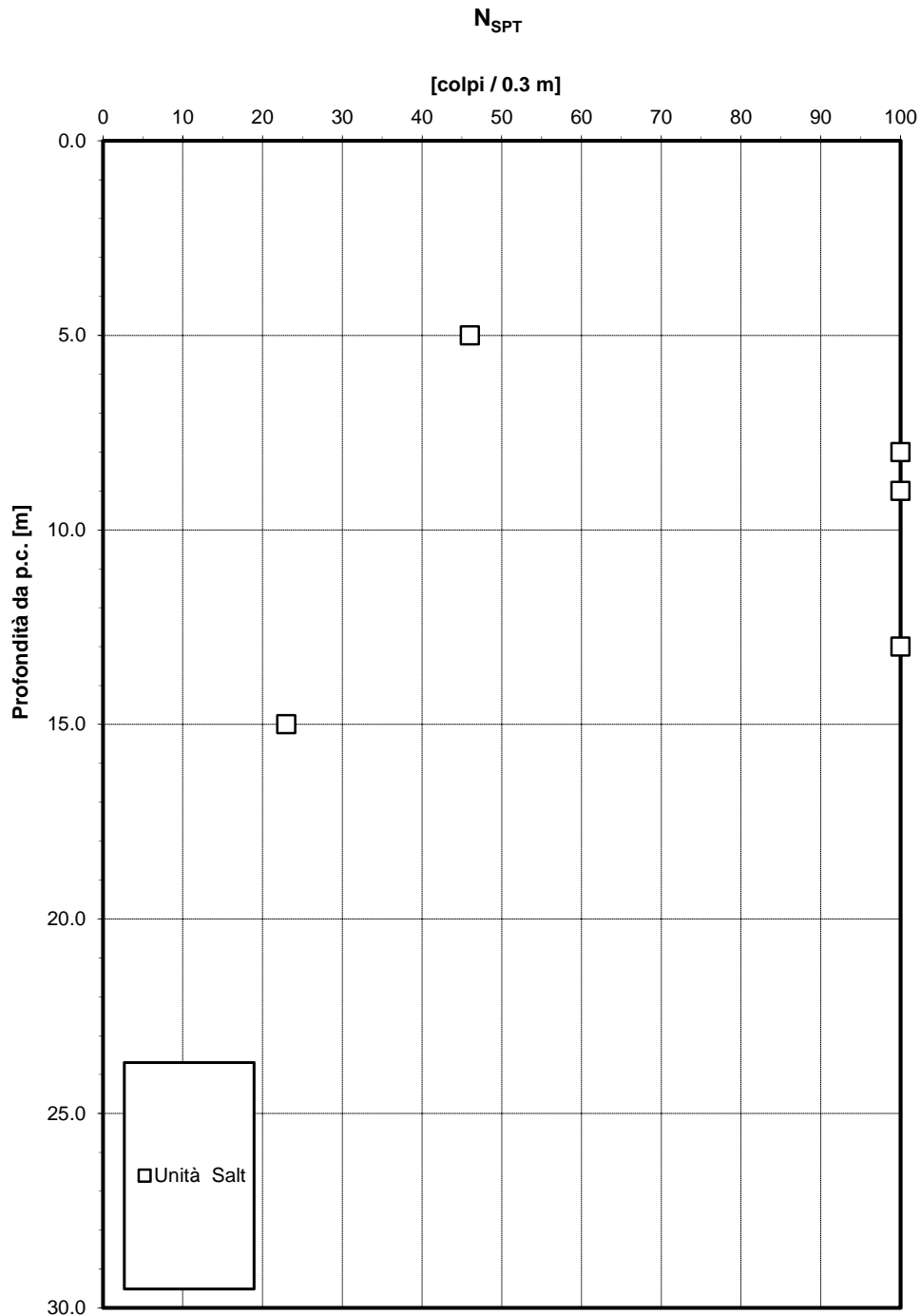


Figura 17 - Valori di N_{SPT} - Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 50 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

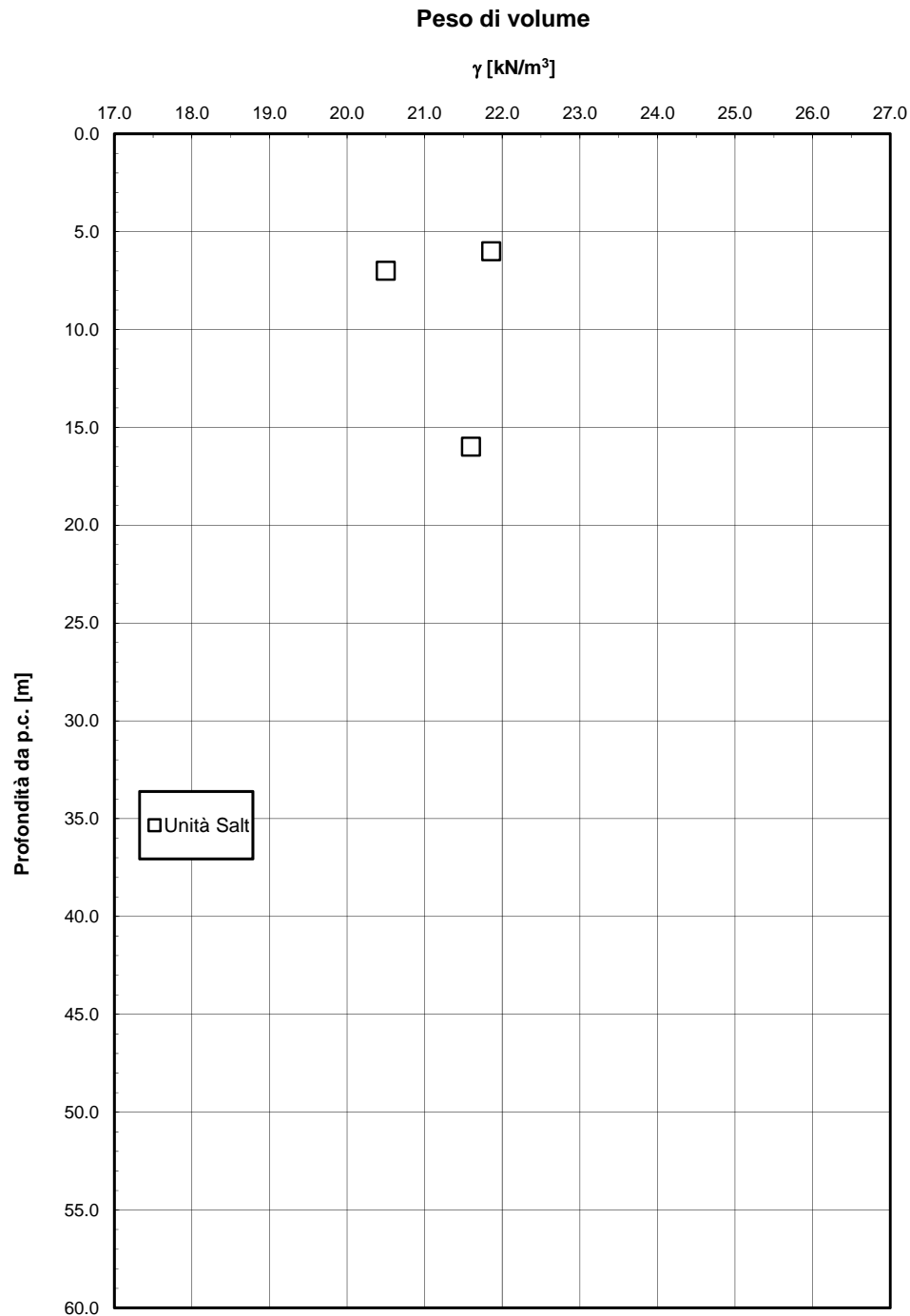


Figura 18 – Peso di volume naturale – Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 51 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Salt

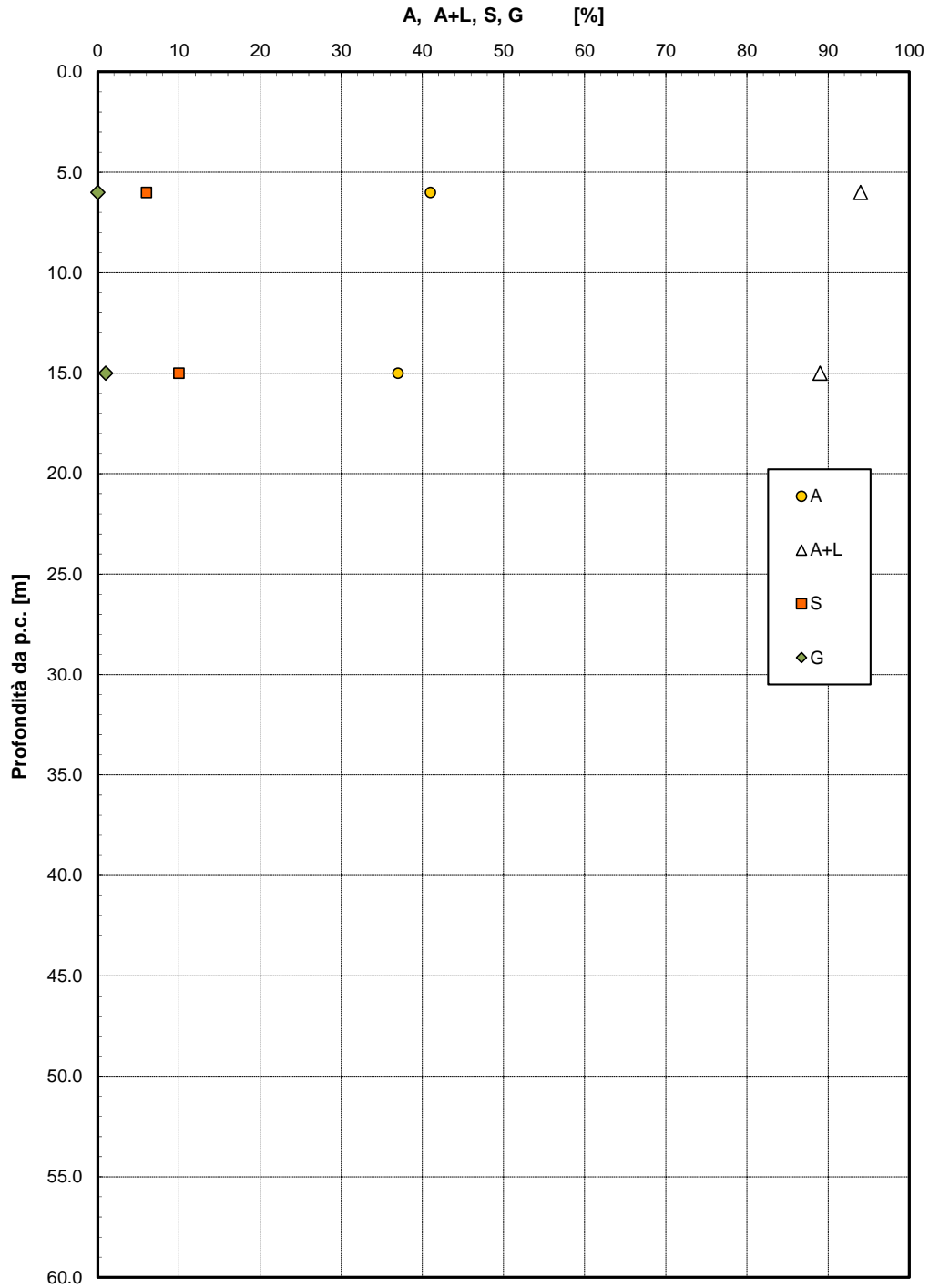


Figura 19 – Analisi granulometrica – Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 52 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Salt

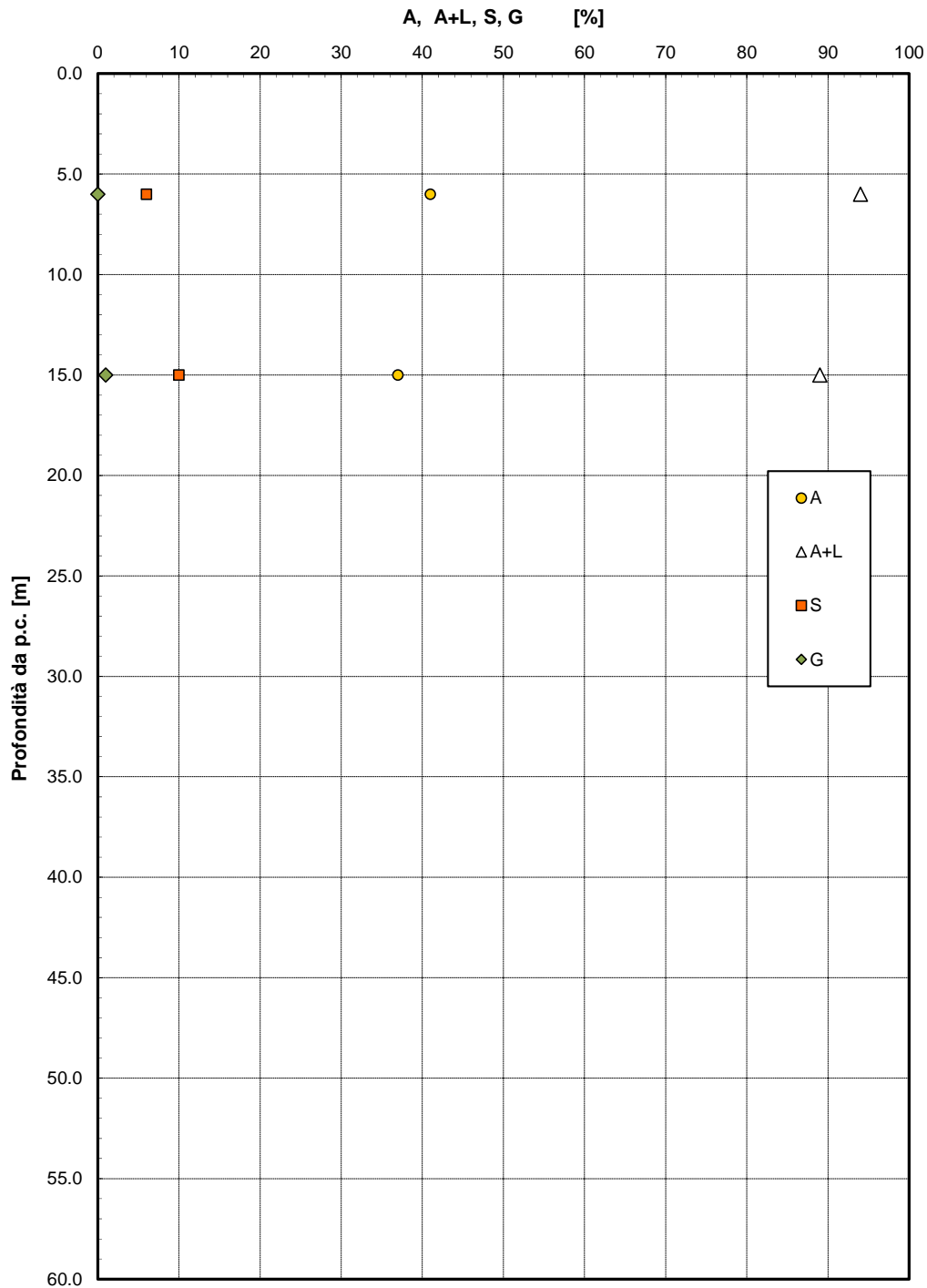


Figura 20 – Limiti di Atterberg – Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 53 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Carta di Plasticità di Casagrande

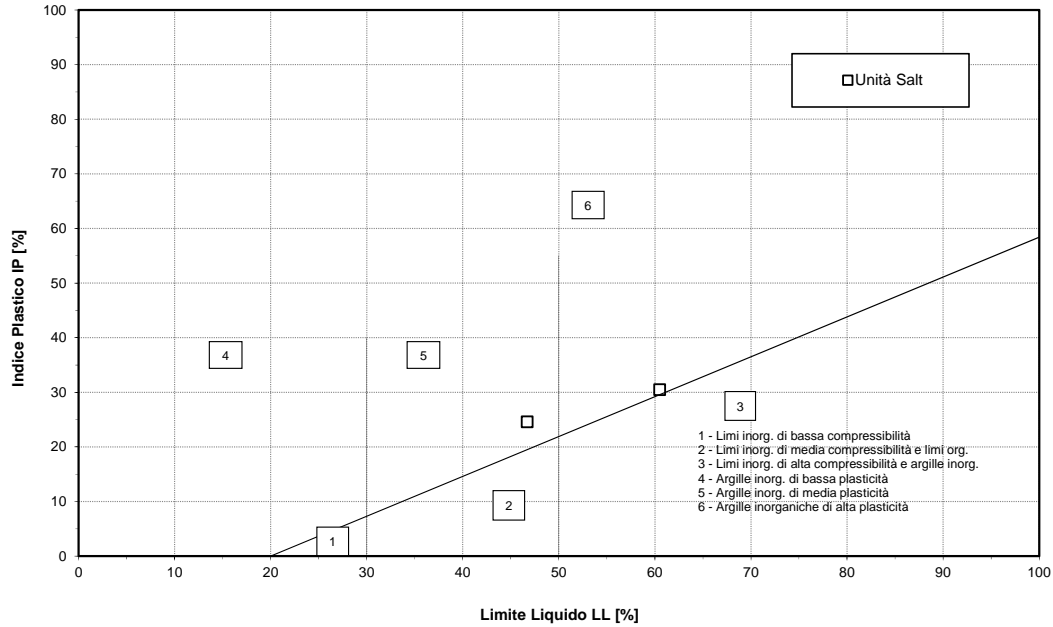


Figura 21 – Carta di plasticità di Casagrande – Unità Salt

Andamento della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio

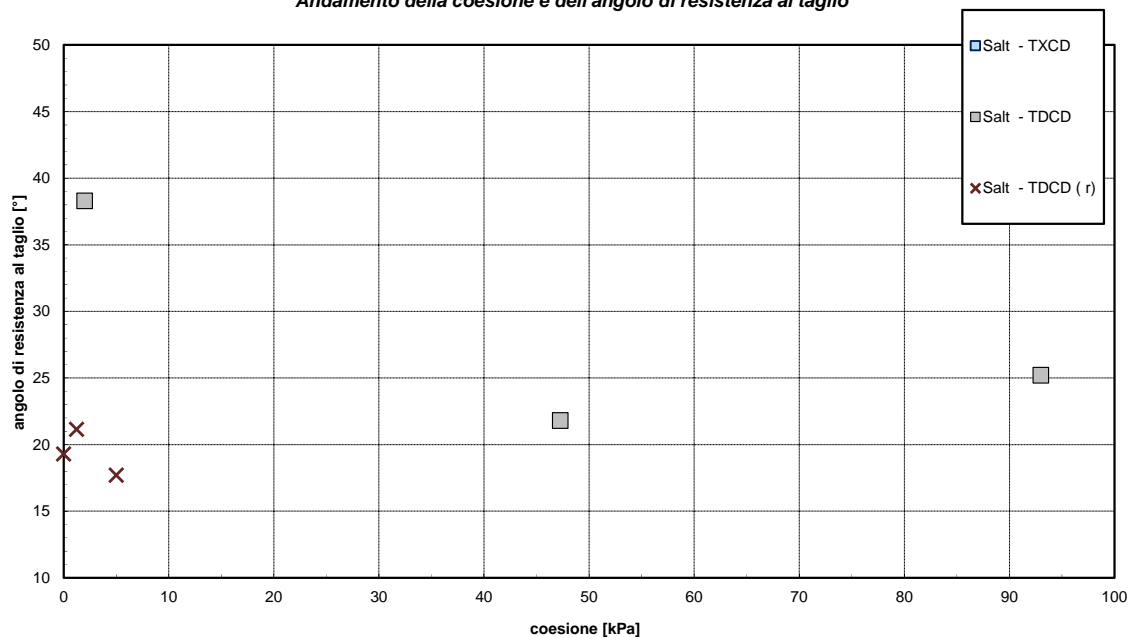


Figura 22 – Angolo di resistenza al taglio e coesione drenata – Unità Salt (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 54 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della coesione con la profondità

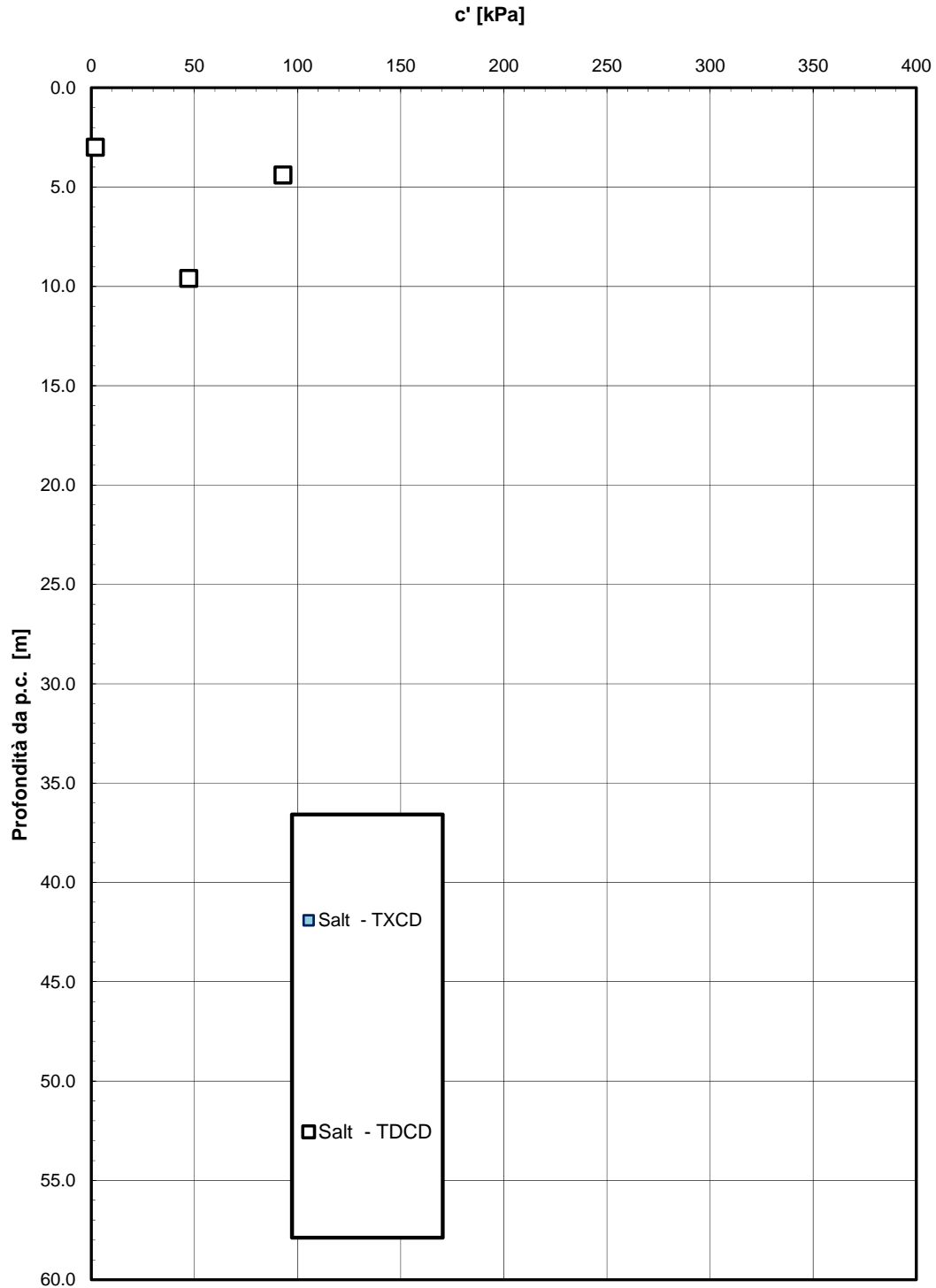


Figura 23 – Andamento della coesione con la profondità – Unità Salt(dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 55 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della resistenza al taglio con la profondità

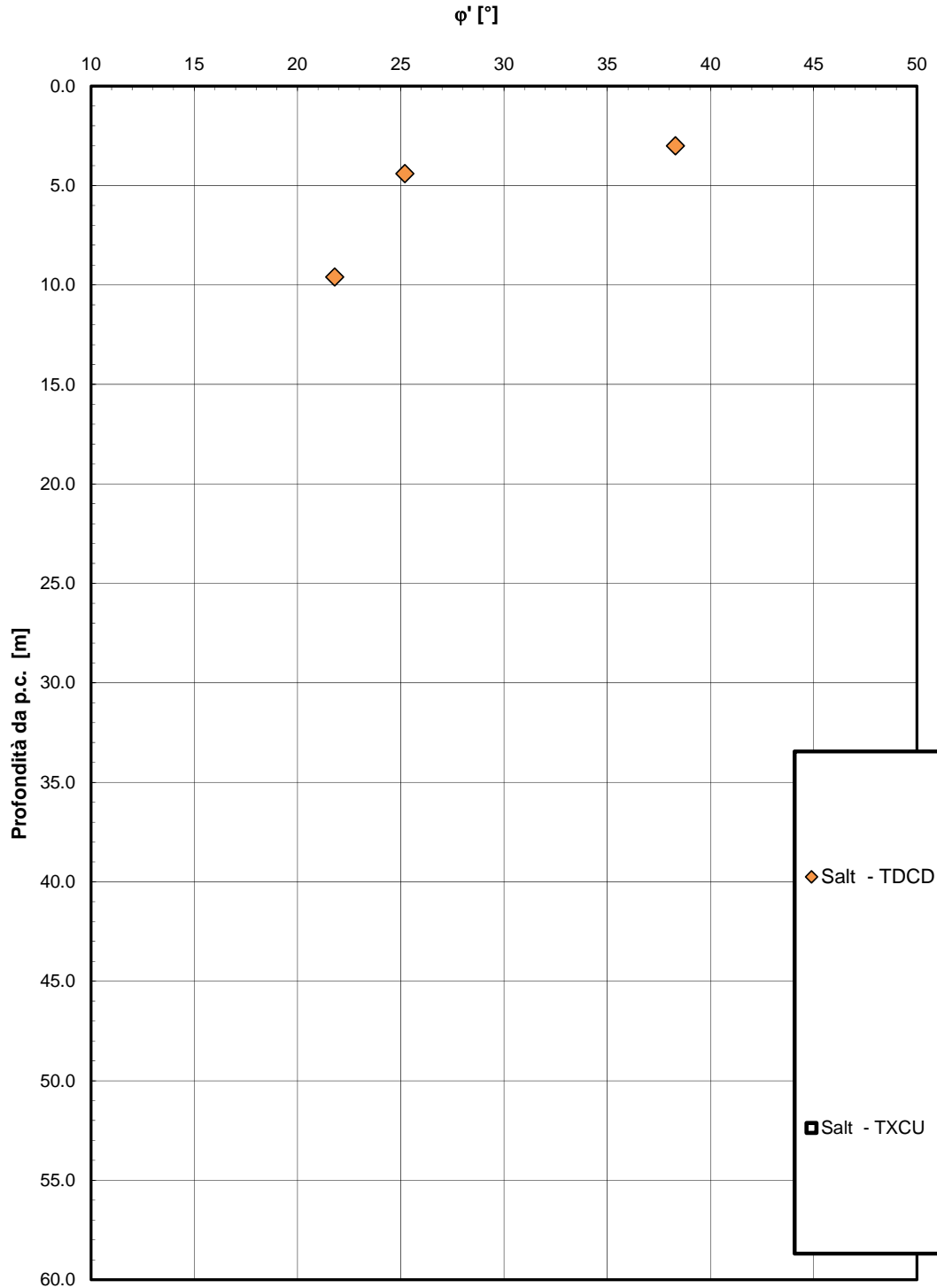


Figura 24 – Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Salt(dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 56 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

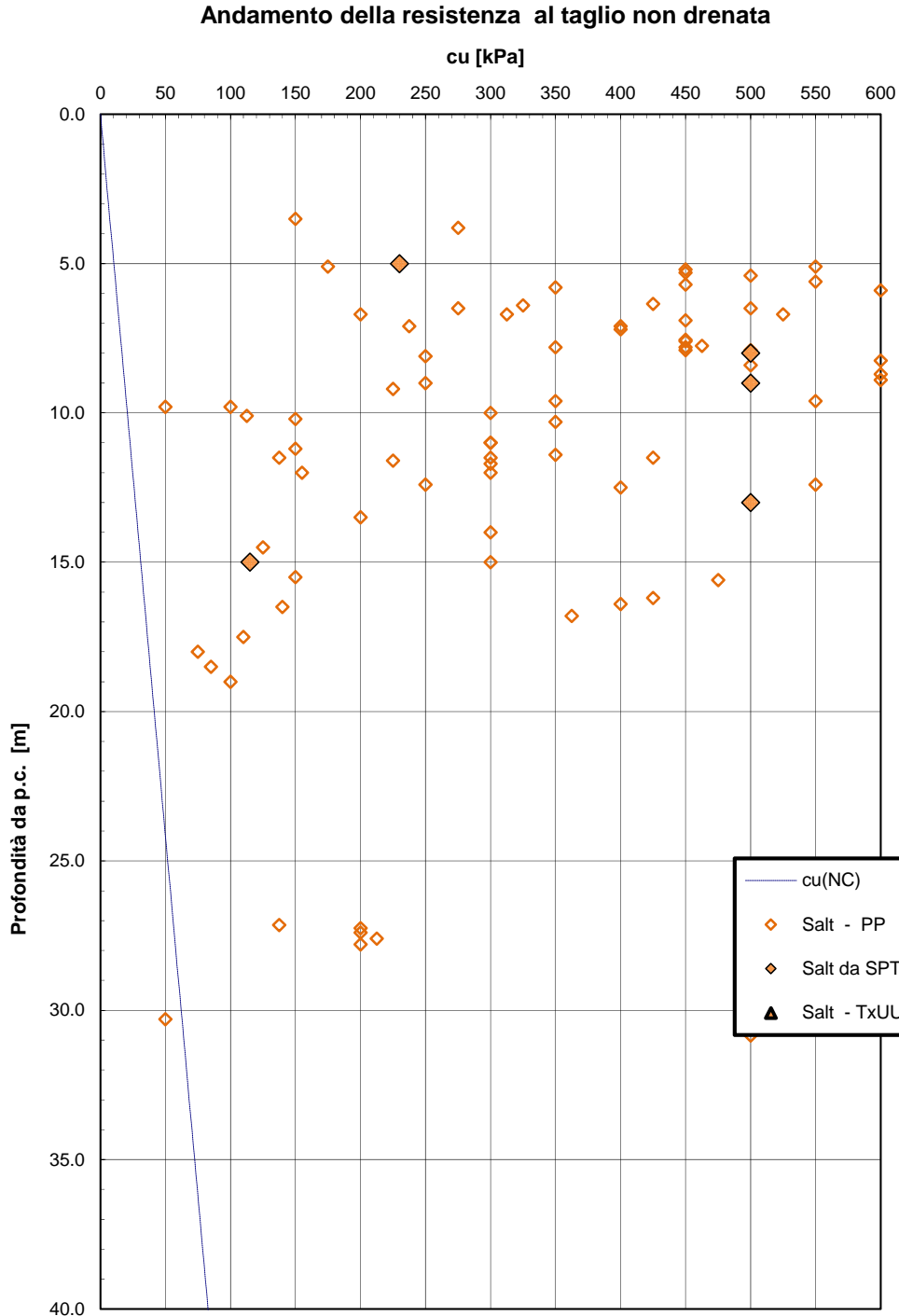


Figura 25 – Resistenza al taglio non drenata – Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 57 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

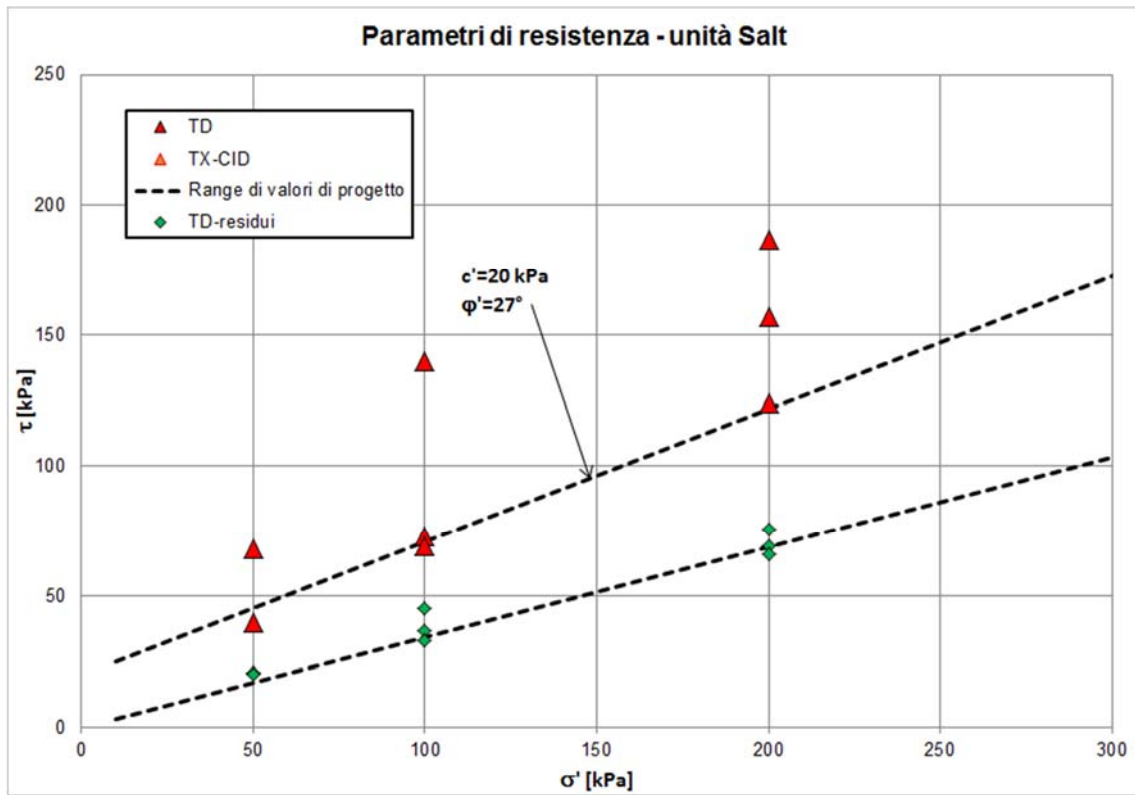


Figura 26 – Parametri di resistenza substrato alterato – Unità Salt (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 58 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT

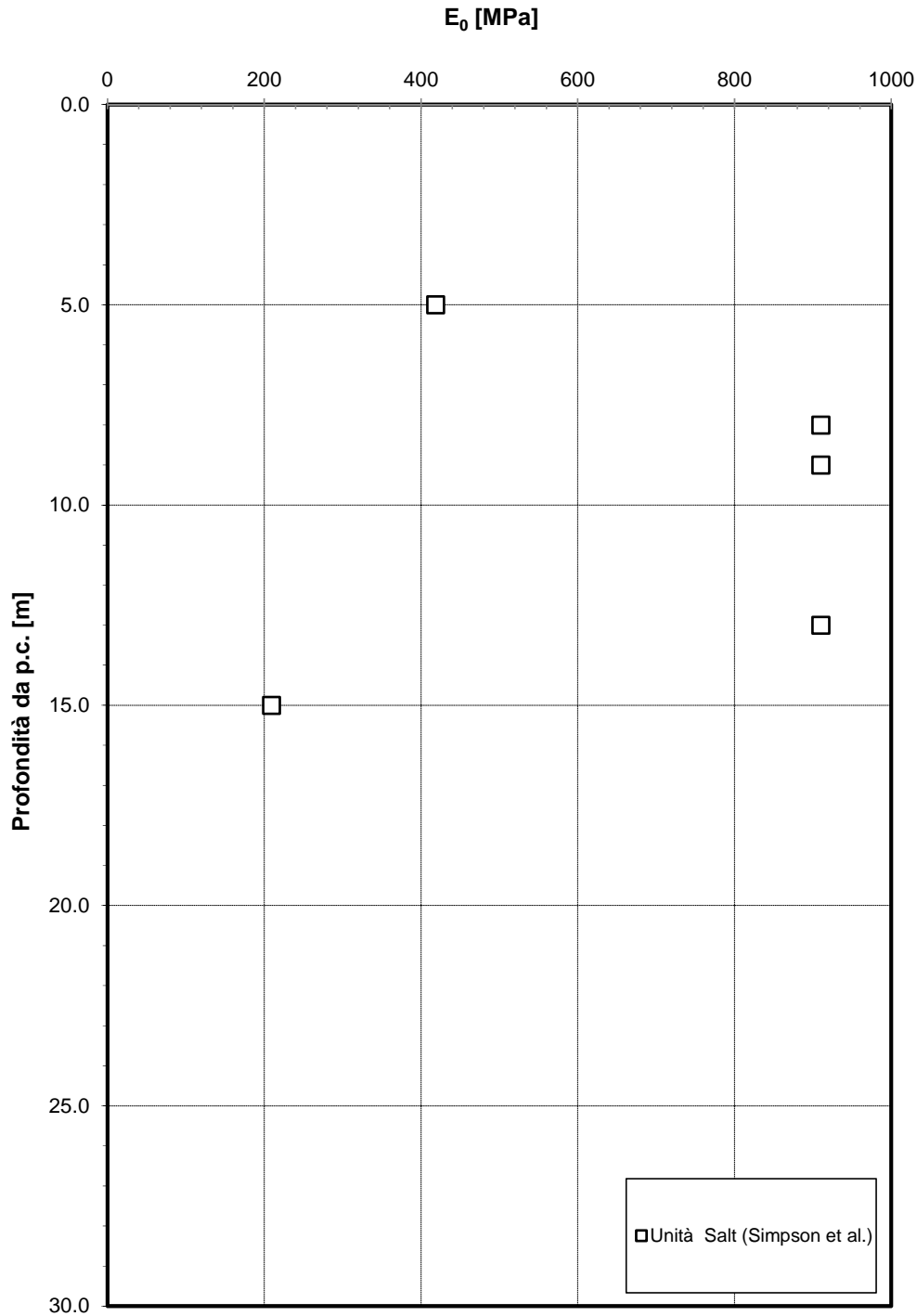


Figura 27 – Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – Unità Salt

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 59 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

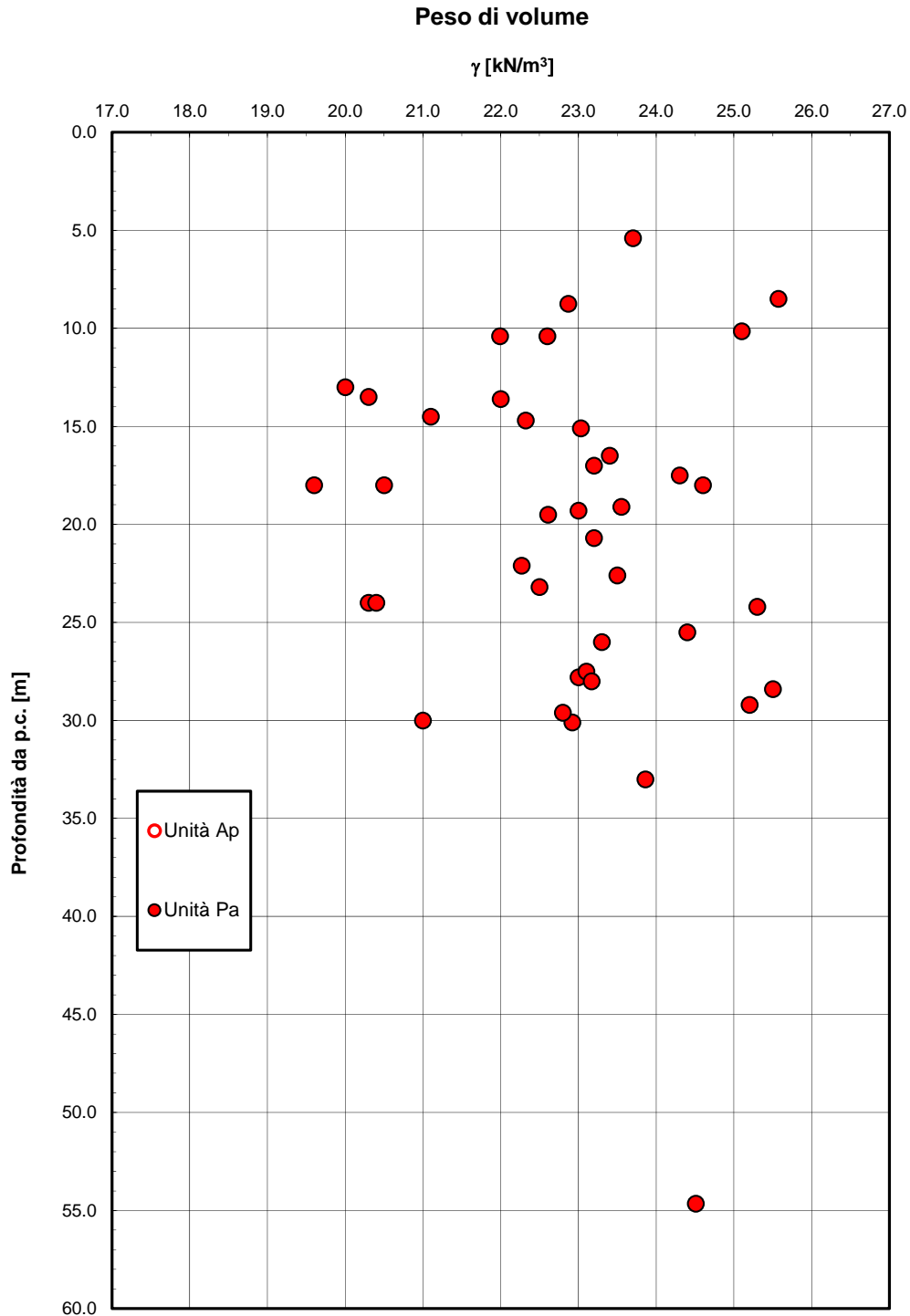


Figura 28 – Peso di volume naturale – Unità Ap e Pa

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 60 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Pa

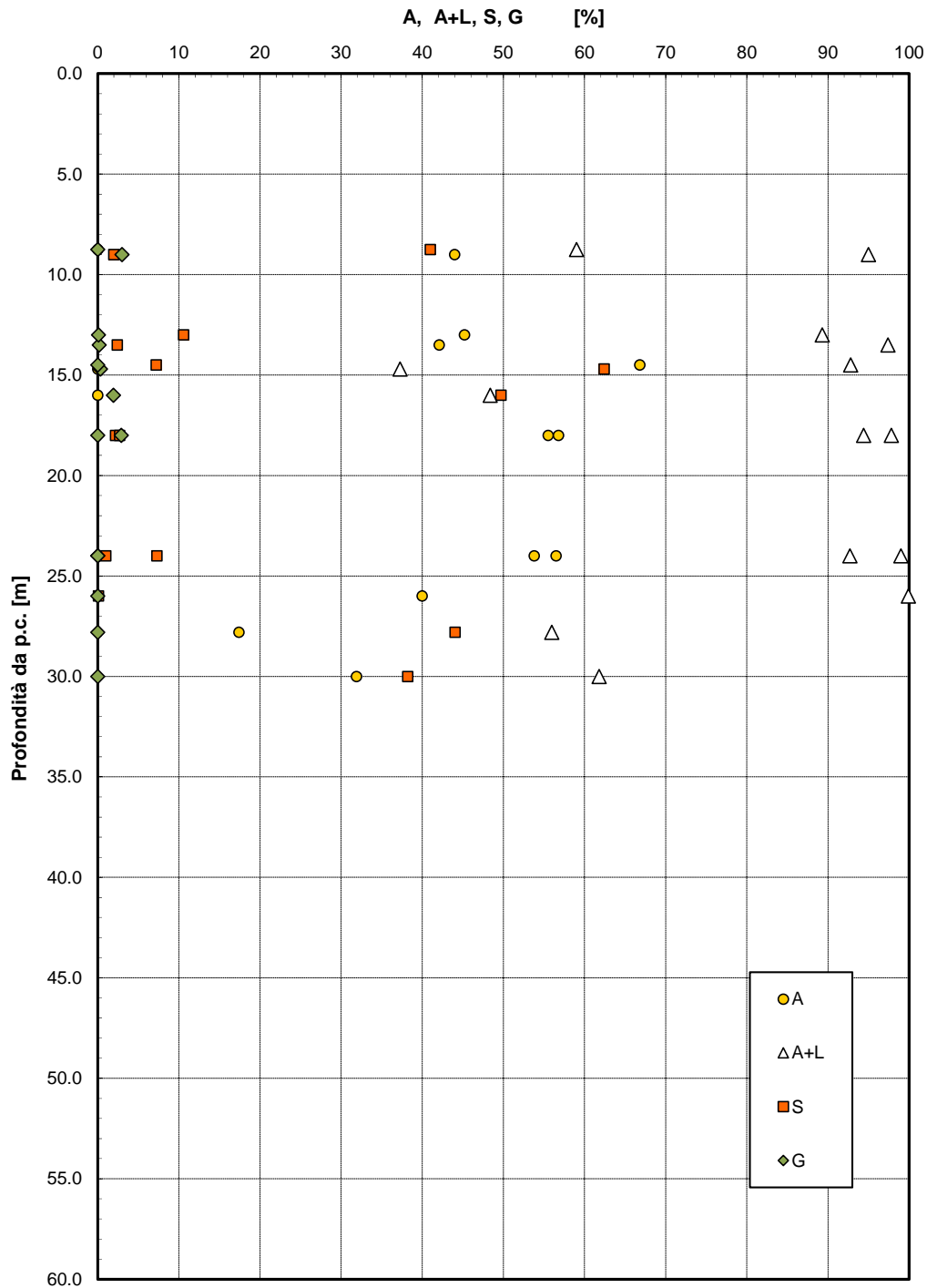


Figura 29 – Analisi granulometrica – Unità Pa

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 61 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Granulometria unità Ap

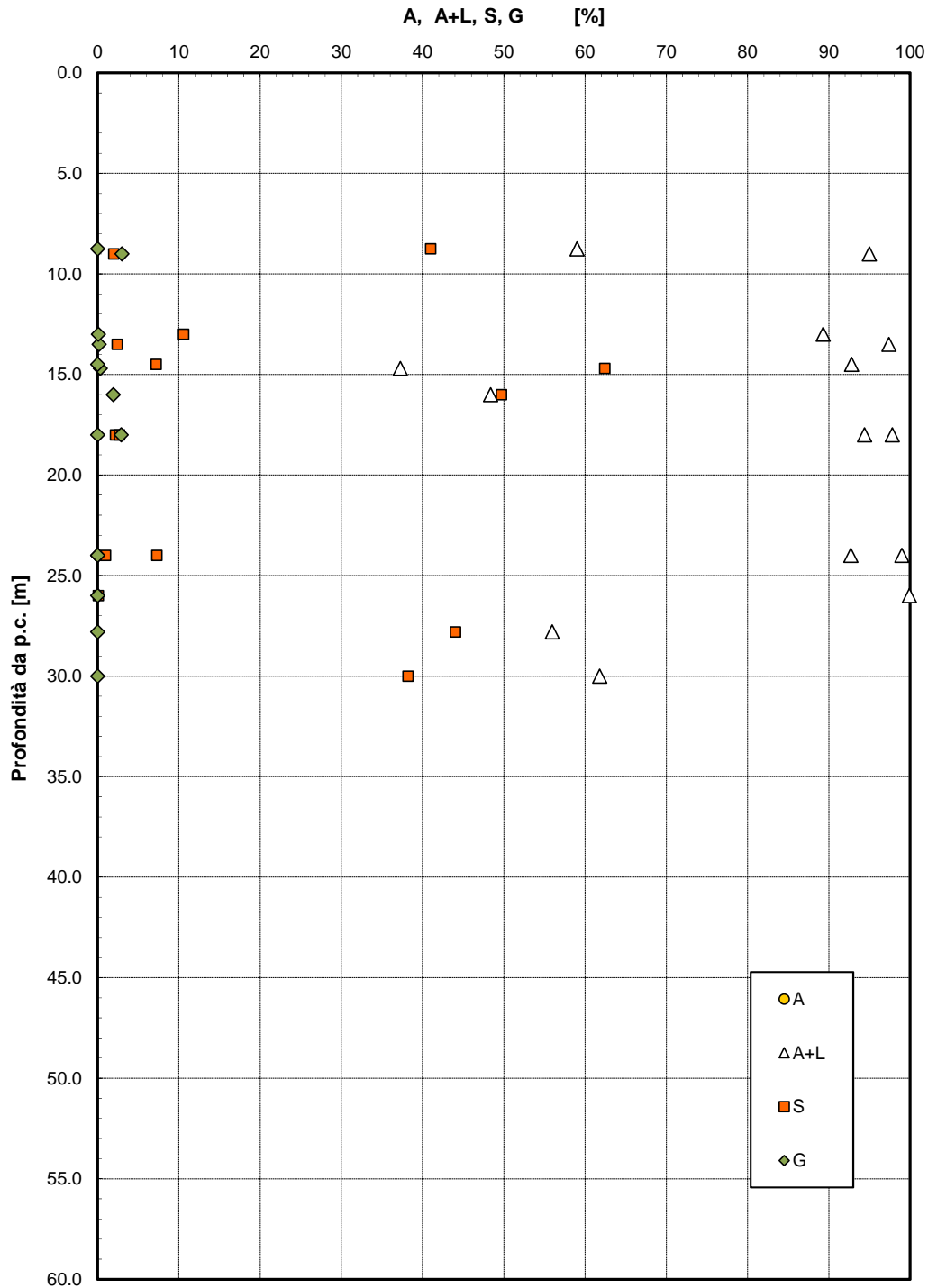


Figura 30 – Analisi granulometrica – Unità Ap

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 62 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

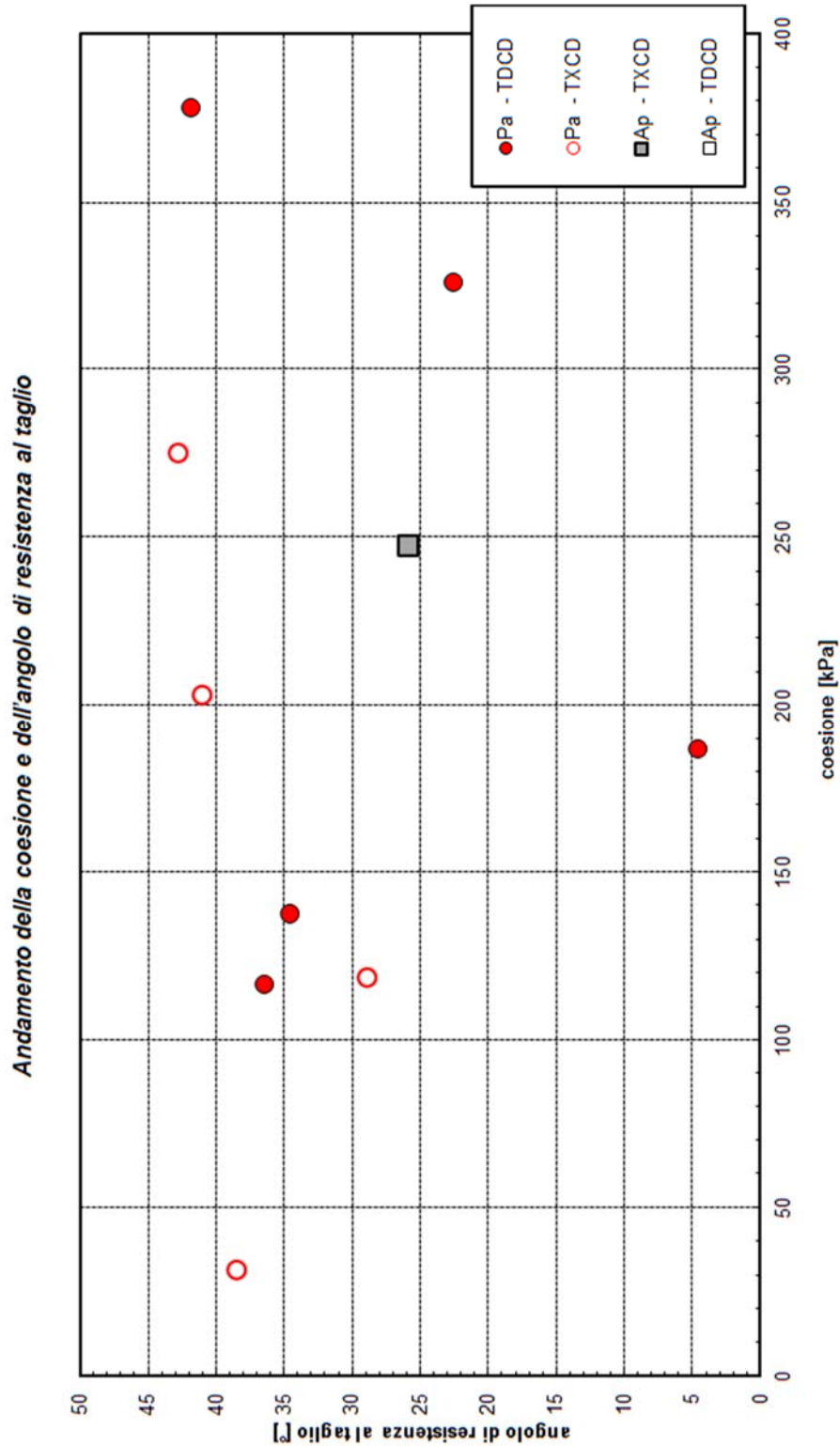


Figura 31 – Grafico correlazione c' e ϕ' – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 63 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della coesione con la profondità

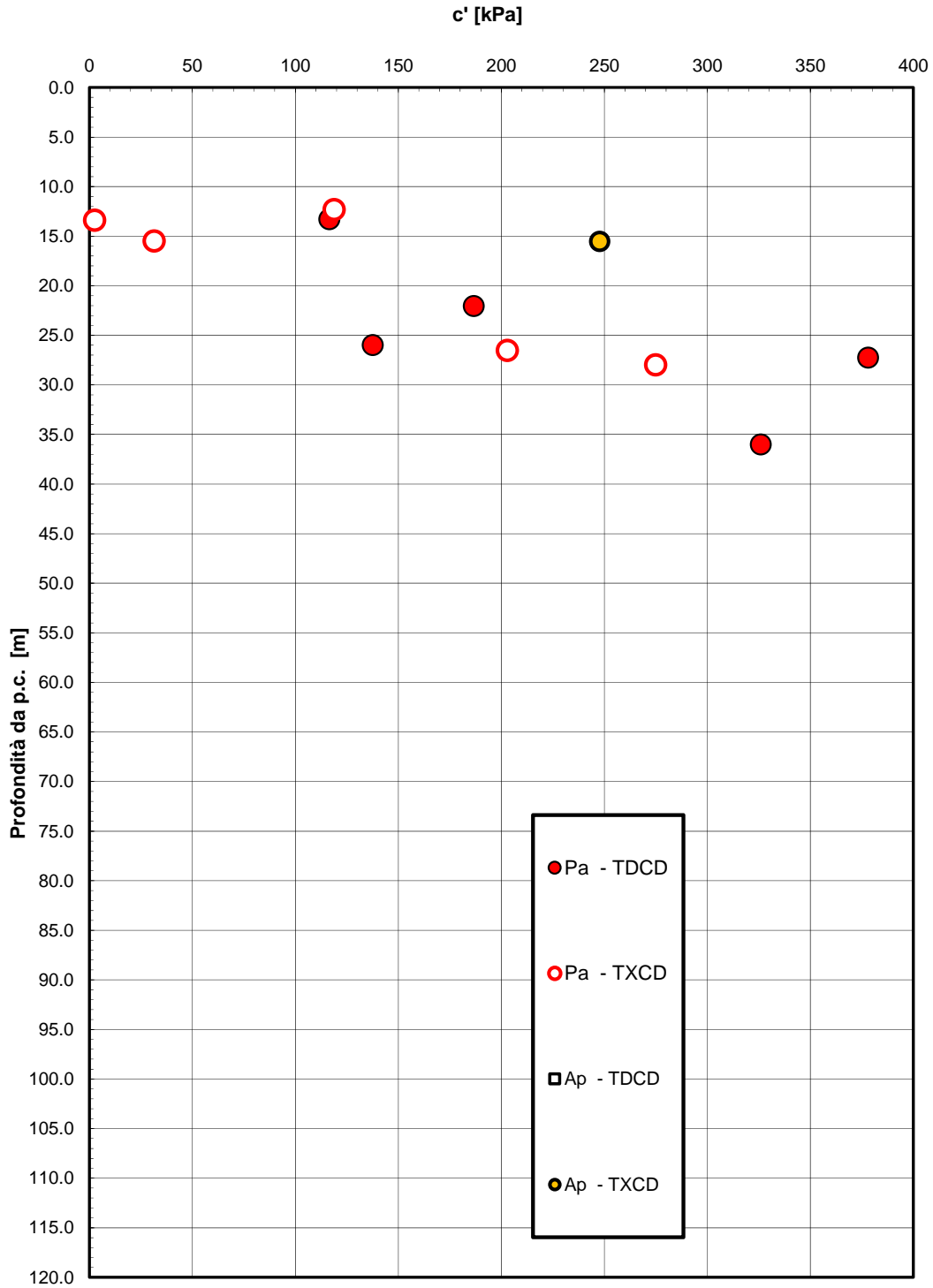


Figura 32 – Andamento della coesione con la profondità – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 64 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Andamento della resistenza al taglio con la profondità

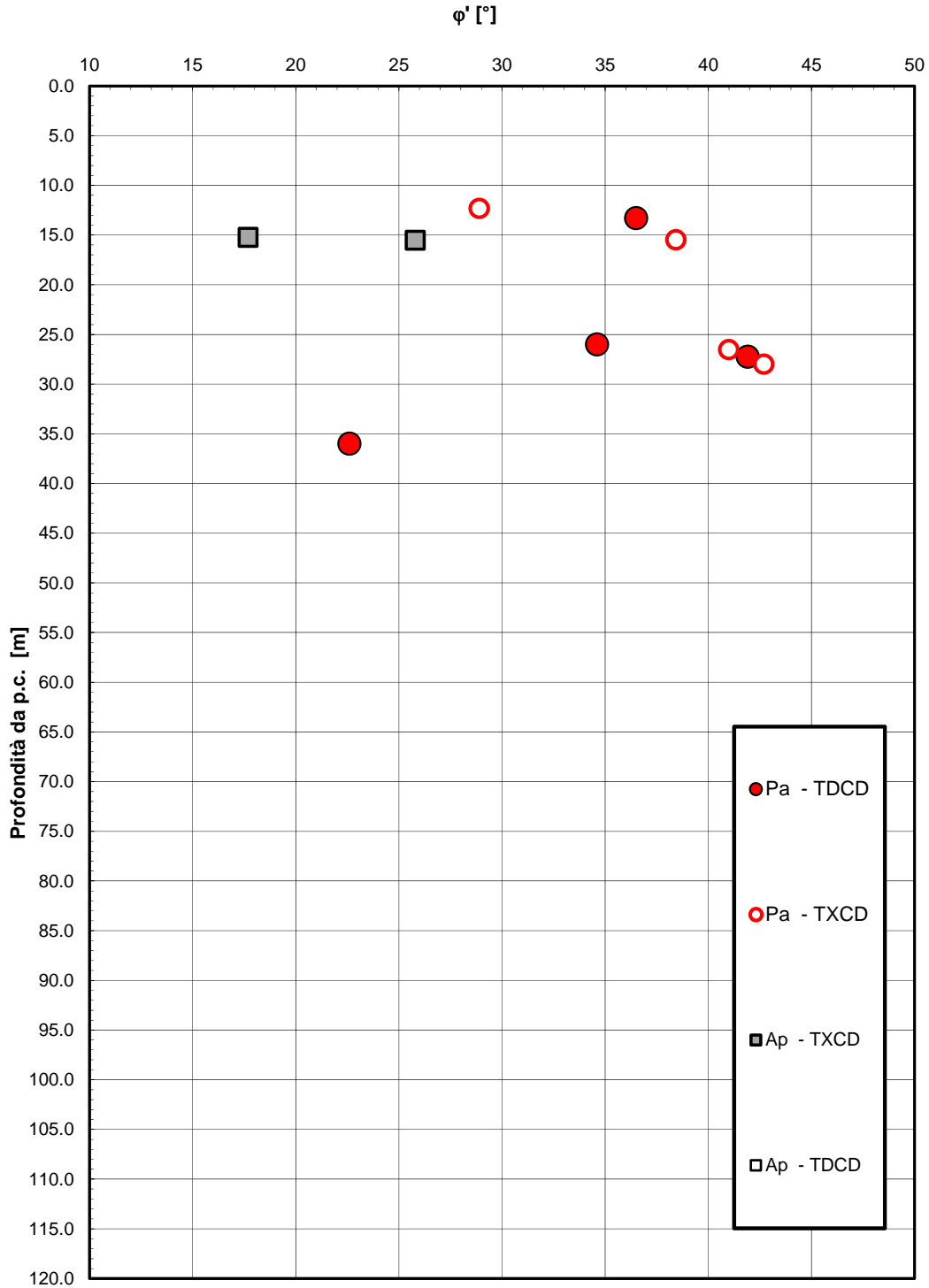


Figura 33 – Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 65 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

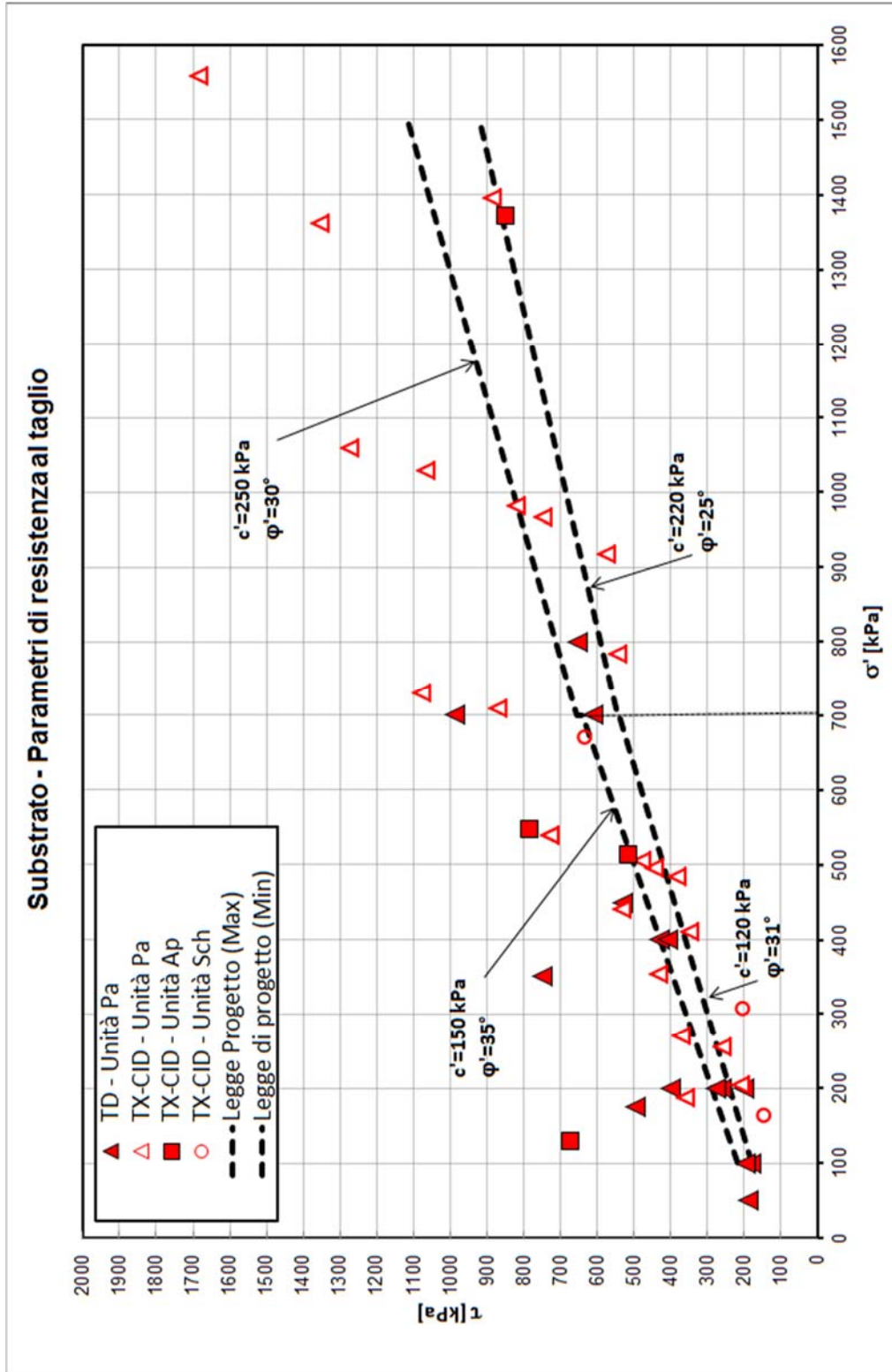


Figura 34 - Parametri di resistenza substrato pelitico arenaceo – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 66 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Resistenza a compressione monoassiale

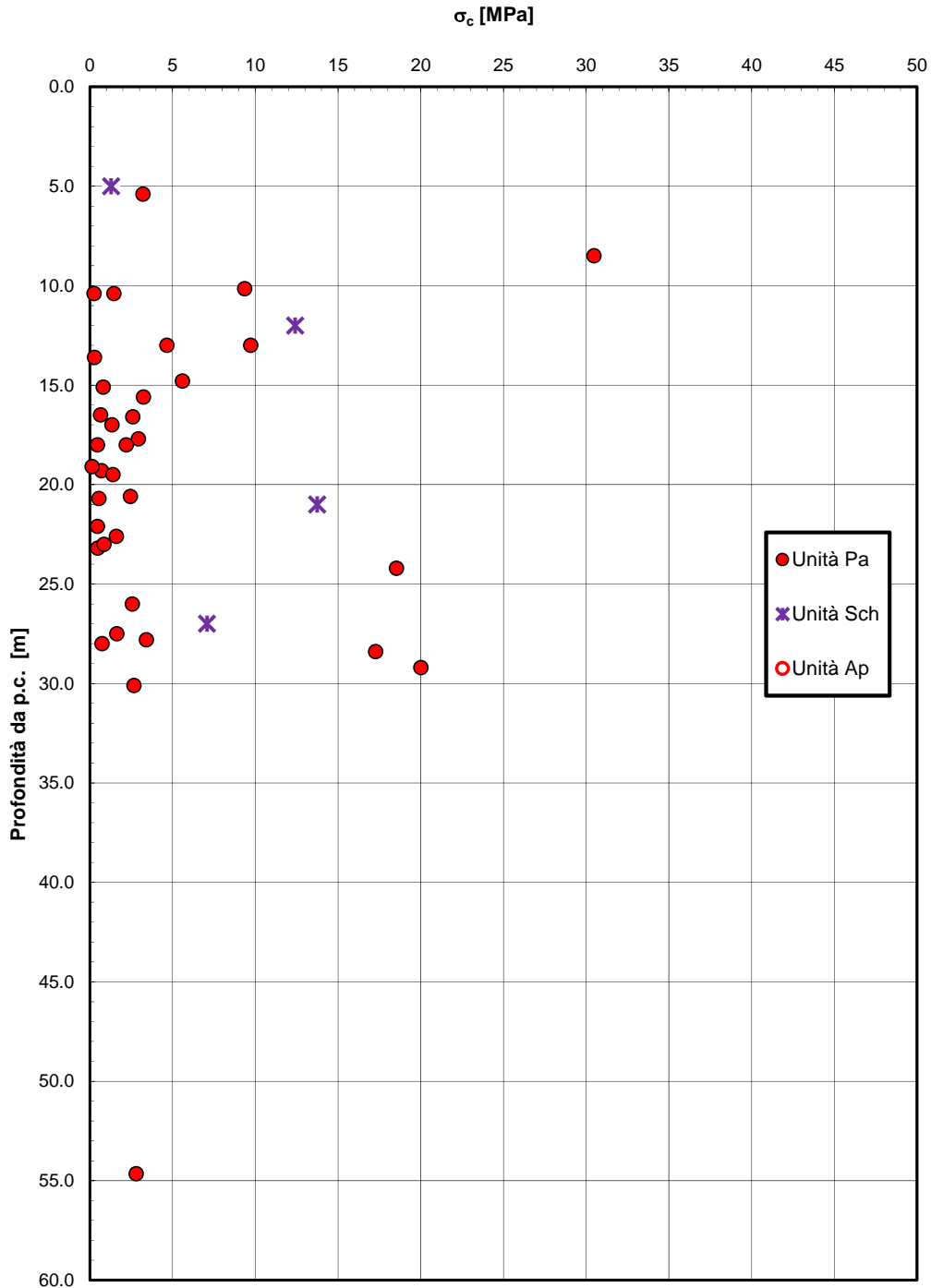


Figura 35 – Resistenza a compressione monoassiale – Unità Pa, Ap, Sch

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 67 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

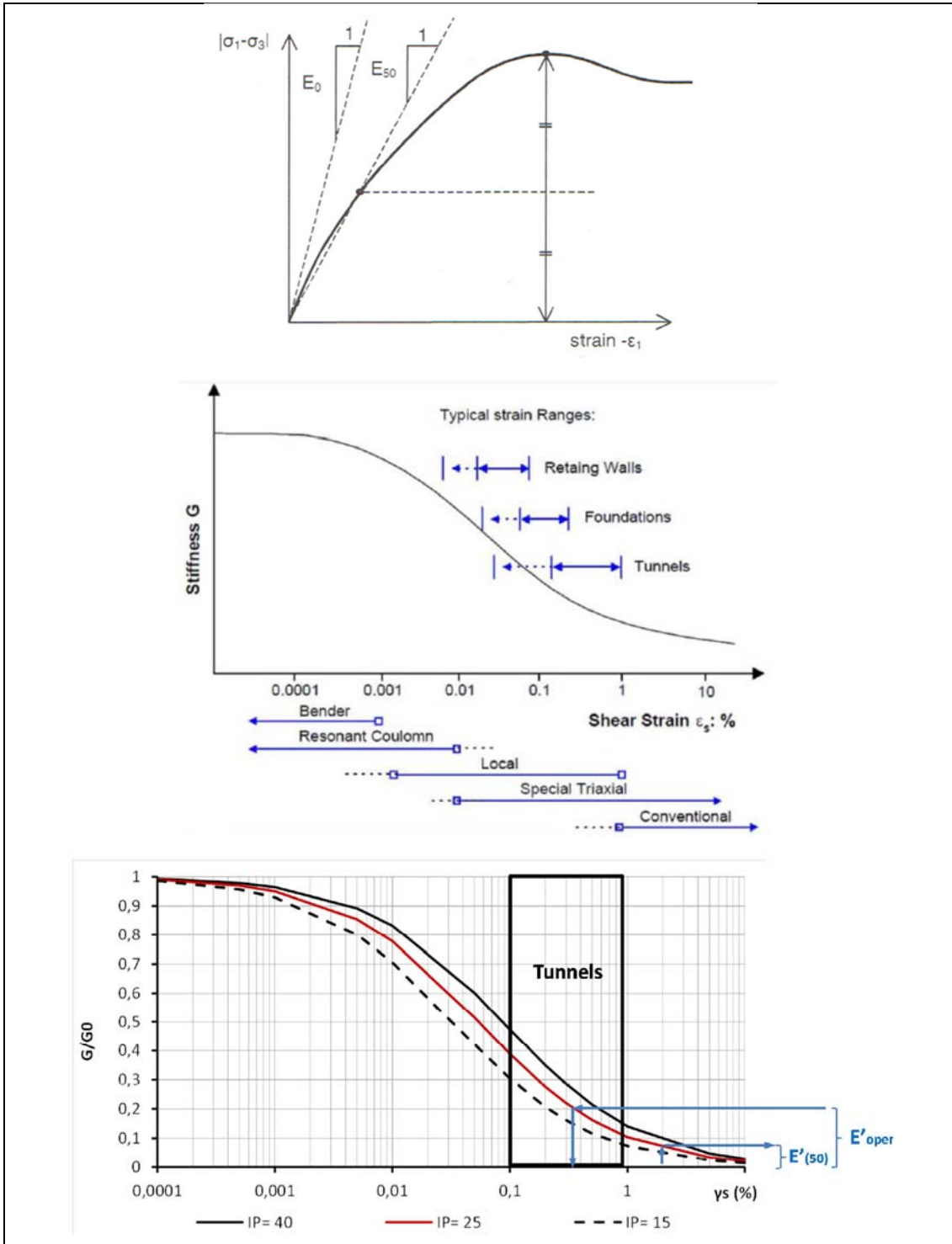


Figura 36 – Definizione di E_{50} e Curve di decadimento del modulo

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 68 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Modulo di deformazione elastico operativo - substrato

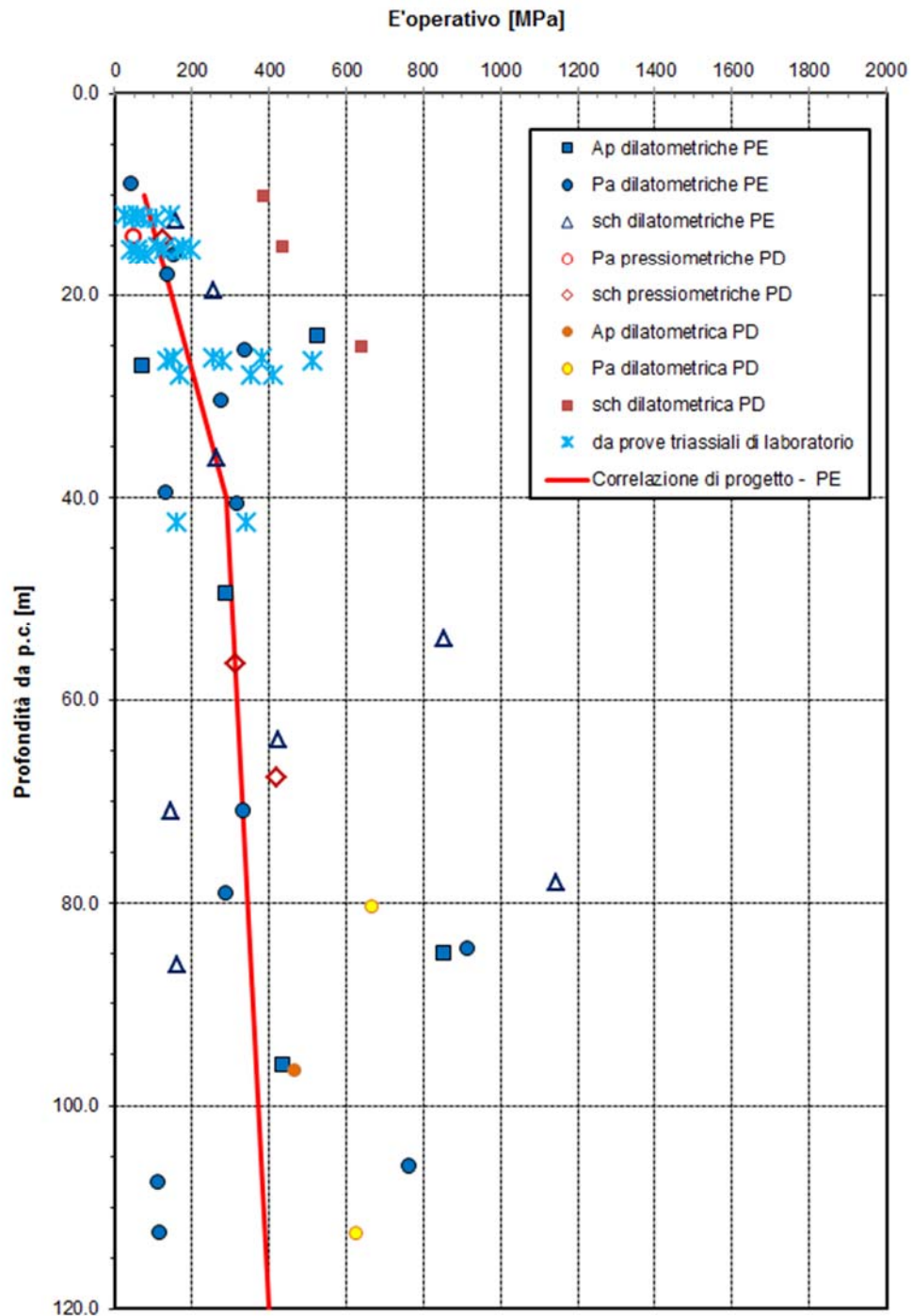


Figura 37 – Modulo di deformazione elastico operativo – Unità Pa, Ap, Sch (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 69 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

Peso di volume

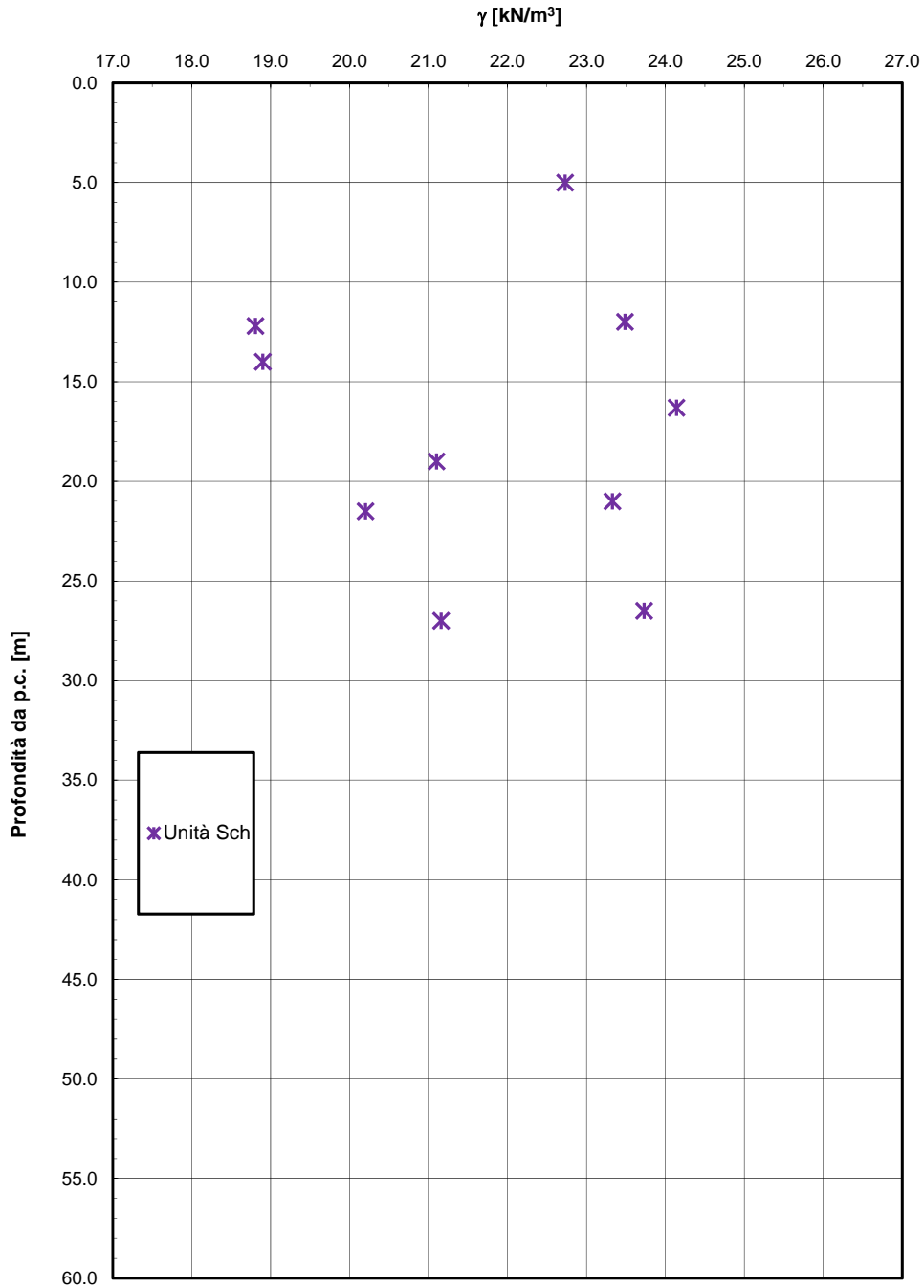


Figura 38 – Peso di volume naturale – Unità Sch

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 70 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

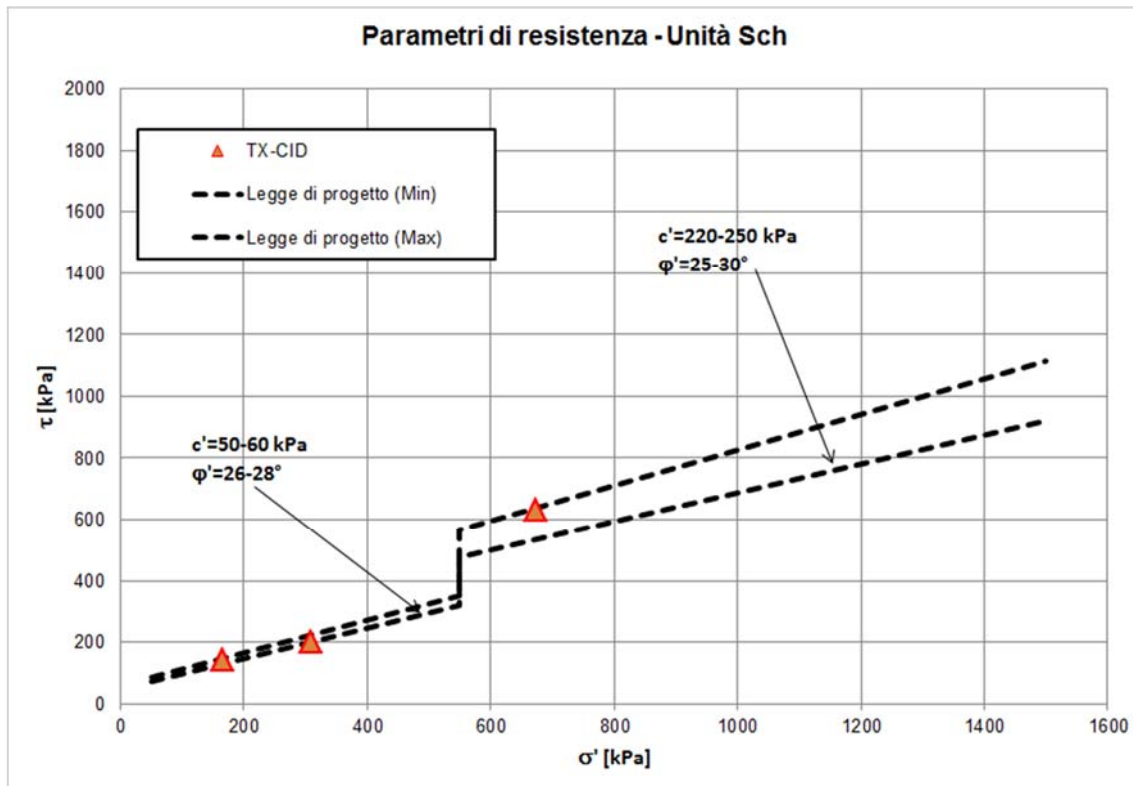


Figura 39 – Parametri di resistenza formazione Schlier– Unità Sch (dal lotto 2)

2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 03	Rev. A	Pag. di Pag. 71 di 71
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

4.8 FALDA

Nel profilo stratigrafico longitudinale è stato rappresentato il livello di falda massimo lungo il tracciato, desunto dalle letture piezometriche a disposizione, nel seguito riportate. Per le strumentazioni installate nel 2017

Sondaggio n°	Tipo Piezometro	Profondità installazione (m)	Data	Livello falda (m da p.c.)
33	tubo aperto	40	02.12.02	24.01
33	tubo aperto	40	13.12.02	22.52
33	tubo aperto	40	11.01.03	22.43
33	tubo aperto	40	25.01.03	22.84
BH17	tubo aperto	25	29.12.04	5.40
BH18	tubo aperto	25	29.12.04	10.13
BH8	tubo aperto	25	07.12.04	6.73
BH8	tubo aperto	25	29.12.04	6.70
38	tubo aperto	30	13.12.02	9.91
38	tubo aperto	30	11.12.03	12.32
38	tubo aperto	30	25.01.03	12.72
BH9	tubo aperto	25	07.12.04	7.63
BH9	tubo aperto	25	29.12.04	7.60
BH10	tubo aperto	25	07.12.04	6.20
BH10	tubo aperto	25	29.12.04	6.18
BH11	tubo aperto	25	29.12.04	1.30