

**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**

<b>CONTRAENTE GENERALE:</b>  <b>DIRPA 2</b> s.c.a.r.l. <i>Ing. Federico Montanari</i>	<i>Il responsabile del Contraente Generale:</i>  <i>Il responsabile Integrazioni delle Prestazioni Specialistiche:</i>  <i>Ing. Salvatore Lieto</i>
--	---

**PROGETTAZIONE:** Associazione Temporanea di Imprese  
Mandataria:

 <b>PROGIN S.p.A.</b>	 <b>LOMBARDI SA</b> INGEGNERI CONSULENTI	 <b>LOMBARDI-REICO</b> INGEGNERIA S.R.L.	 <b>SGAI s.r.l. di E. Forlani &amp; C.</b> Studio di Ingegneria e Geologia Applicata <a href="http://www.sgai.com">www.sgai.com</a>
--	--	---	--

<b>RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE PER L'ATI</b> <i>Ing. Antonio Grimaldi</i> <b>GEOLOGO</b> <i>Dott. Geol. Fabrizio Pontoni</i> <b>COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</b> <i>Ing. Michele Curiale</i>	 <b>Ordine Ingegneri Roma N. 20860</b>	 <b>Ordine dei Geologi delle Marche N. 176</b>	 <b>Ordine degli Ingegneri della Provincia di Caserta N. 1679</b>
---	--	---	---

<b>IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</b> <i>Ing. Giulio Petrizzelli</i>		
---	--	--

<b>2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE</b> 3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud) 4° stralcio funzionale (Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia) <b>GEOLOGIA E GEOTECNICA</b> Relazione geotecnica generale sulle opere all'aperto	<b>SCALA:</b> -	<b>DATA:</b> Luglio 2017
---	--------------------	-----------------------------

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

<b>Codice Elaborato:</b>	Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc.	N. prog.	Rev.
	L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A

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

## INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	
	<b>4</b>	
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	5
1.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	5
<b>2.</b>	<b>DESCRIZIONE DEL TRACCIATO E DELLE OPERE PRINCIPALI .....</b>	
	<b>6</b>	
<b>3.</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO .....</b>	
	<b>7</b>	
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL' AREA.....	7
3.2	PROBLEMATICHE GEOMORFOLOGICHE.....	10
3.2.1	Interferenza aree potenzialmente instabili con le opere.....	10
<b>4.</b>	<b>INDAGINI GEOTECNICHE.....</b>	
	<b>11</b>	
4.1	GENERALITÀ.....	11
4.2	CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2002 .....	11
4.2.1	Prove pressiometriche in foro .....	12
4.2.2	Prove di permeabilità .....	14
4.2.3	Indagini sismiche .....	14
4.2.4	Prove di laboratorio .....	15
4.3	CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2004 .....	21
4.3.1	Prove pressiometriche in foro tipo Menard .....	22
4.3.2	Indagini sismiche .....	23
4.3.3	Prove di laboratorio .....	23
4.4	CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2006-2007 .....	25
4.4.1	Lecture inclinometriche.....	27
4.4.2	Prove di laboratorio .....	27
4.5	CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2017 .....	28
4.5.1	Lecture inclinometriche.....	31
4.5.2	Prove di laboratorio .....	31
<b>5.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	
	<b>33</b>	
5.1	DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE .....	34
5.2	CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE.....	35
5.2.1	Premessa .....	35
5.2.2	Depositi incoerenti .....	35
5.2.3	Depositi coesivi .....	40
5.3	DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ EC <sub>LA</sub> .....	44
5.4	DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI SABBIOSI – UNITÀ EC <sub>LS</sub> .....	45
5.5	DEPOSITI ALLUVIONALI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ A <sub>LA</sub> .....	46
5.6	DEPOSITI ALLUVIONALI SABBIOSI – UNITÀ A <sub>S</sub> .....	47

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 3 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

5.7	DEPOSITI ALLUVIONALI GHIAIOSO SABBIOSI – UNITÀ A <sub>G</sub>	48
5.8	DEPOSITI ALLUVIONALI TERRAZZATI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ A <sub>TE</sub>	48
5.9	DEPOSITI DI ALTERAZIONE DEL SUBSTRATO – UNITÀ S <sub>ALT</sub>	49
5.10	FORMAZIONE DI CAMERINO - UNITÀ PA / UNITÀ AP	50
5.10.1	Generalità e caratteristiche fisiche	50
5.10.2	Parametri di resistenza	51
5.10.3	Parametri di deformabilità	53
5.10.4	Permeabilità	53
5.11	FORMAZIONE DELLO SCHLIER - S <sub>CH</sub>	53
5.12	SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	56
5.13	FALDA	113
<b>6.</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA</b>	
	<b>115</b>	
6.1	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	115
6.2	AZIONI SISMICHE DI PROGETTO	117
6.3	LIQUEFAZIONE	121
<b>7.</b>	<b>METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI123</b>	
7.1	ANALISI AGLI STATI LIMITE	123
7.2	METODOLOGIA DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE AI CARICHI VERTICALI	125
7.2.1	Portata laterale	125
7.2.2	Portata di base	128
7.2.3	Determinazione della resistenza di progetto a trazione	130
<b>8.</b>	<b>PALIFICATE DI FONDAZIONE</b>	
	<b>131</b>	
8.1	COMPORAMENTO DEL PALO SOGGETTO AI CARICHI ORIZZONTALI - MODULO DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO	131
8.2	MOMENTO ADIMENSIONALE LUNGO IL PALO	132
<b>9.</b>	<b>VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI</b>	
	<b>134</b>	
9.1	PREMESSA	134
9.2	CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	134
9.2.1	Determinazione della zona compressibile H <sub>c</sub>	134
9.2.2	Tipi di cedimento	135
9.2.3	Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento	137
9.2.4	Determinazione teorica dell'andamento nel tempo dei cedimenti	138
9.3	ANALISI DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI	142
9.3.1	Sezioni di calcolo e parametri geotecnici	142
9.3.2	Risultati	144
<b>10.</b>	<b>ANALISI DI STABILITÀ' DELLE SCARPATE</b>	

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 4 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

**147**

10.1	METODOLOGIE DI CALCOLO .....	147
10.1.1	Carichi .....	148
10.1.2	Azioni sismiche per analisi di stabilità.....	148
10.2	SEZIONI DI CALCOLO .....	149
10.3	RISULTATI .....	150

**11. RIUTILIZZO DEI TERRENI DA**

**SCAVO** .....  
**156**

**12. PIANO DI**

**POSA**.....  
**158**

**13. TRATTAMENTO A**

**CALCE** .....

13.1	STUDIO MISCELE IN LABORATORIO .....	160
13.1.1	Preparazione dei campioni.....	160
13.1.2	Programma prove di laboratorio .....	160

**1. INTRODUZIONE**

Nella presente relazione viene riportata la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica per il tracciato del 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 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, in termini di proprietà fisiche e meccaniche (resistenza al taglio e deformabilità), per le unità geotecniche intercettate lungo la viabilità;
- classificazione sismica del sito;
- caratterizzazione geotecnica in corrispondenza delle opere d'arte principali: stratigrafia, definizione dei parametri geotecnici di progetto, individuazione livello di falda;
- metodologie di calcolo generali per la valutazione della capacità portante assiale dei pali e calcolo portanza pali per viadotti/ponti/cavalcavia;
- caratterizzazione dei pali alle azioni orizzontali;
- analisi dei cedimenti dei rilevati e loro decorso nel tempo;
- verifica di stabilità delle scarpate di rilevati e trincee;
- piani di posa;
- trattamento a calce.

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 5 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

**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 geoidrologica 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".

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 6 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

## 2. DESCRIZIONE DEL TRACCIATO E DELLE OPERE PRINCIPALI

Il tracciato stradale in oggetto comprende:

- 3° stralcio funzionale: Castelraimondo nord - Castelraimondo sud
- 4° stralcio funzionale: Castelraimondo sud - innesto S.S.77 a Muccia

Le opere d'arte principali sono le seguenti

Viadotto/Ponte	Viadotto Castelraimondo
	Viadotto Vallone
	Viadotto S. Anna
	Viadotto S. Pietro
	Viadotto S. Potenza
	Viadotto Cesara
	Viadotto Palente
	Ponte Varano
Galleria naturale	Mecciano
	S. Anna
	S. Barbara
Galleria artificiale	Feggiano II
	Seano

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 7 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

### 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

#### 3.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

Si riportano di seguito le descrizioni delle formazioni presenti nell'area, dalla più antica alla più recente.

Le unità stratigrafiche affioranti nell'area oggetto di studio sono dal basso verso l'alto: la Formazione dello Schlier, la Formazione di Camerino e la Formazione gessoso-solfifera.

##### **Formazione dello Schlier**

È costituita da alternanze di marne, marne siltose calcaree e argillose, a volte arenacee, di colore grigio e da calcari marnosi in quantità subordinata. In superficie la formazione è di colore chiaro a causa dell'alterazione. La stratificazione è medio-sottile, marcata solo in superficie dalla diversa resistenza agli elementi erosivi. Gli intervalli calcarenitici sono sviluppati soprattutto nella parte meridionale del bacino. La deposizione dello Schlier è avvenuta tra il Burdigaliano superiore e il Tortoniano, anche se il tetto varia in età da bacino a bacino. Lo spessore totale della formazione varia dai 150 ai 250 m in relazione alla difformità del fondo marino. La formazione dello Schlier rappresenta l'unità stratigrafica più antica direttamente interessata dal tracciato in progetto ed è attraversata dalla galleria naturale "Croce di Calle" e da un tratto di galleria artificiale "Mistrianello".

##### **Formazione di Camerino**

Su questa formazione si sviluppa per la maggior parte il tracciato in progetto. Si tratta nel complesso di torbiditi pelitiche, pelitico-arenacee, arenaceo-pelitiche, variamente associate tra loro e che presentano, soprattutto nelle porzioni pelitiche, caratteri analoghi alla sovrastante Formazione gessoso-solfifera, indicando un passaggio graduale, a carattere transizionale, con la sovrastante formazione stessa.

Il Bacino di Camerino è suddiviso in due sub-bacini attraverso un allungato "alto strutturale" costituito dalla Formazione dello Schlier (dorsale longitudinale Argignano – M. Gallo) che si raccorda alle laterali zone depresse (sub-bacino di Collamato ad ovest e sub-bacino di Matelica ad est) tramite faglie normali sinsedimentarie. Nel sub-bacino di Matelica si sviluppa il tracciato in progetto, un sub-bacino variamente articolato sia longitudinalmente, con graduale approfondimento da nord, in cui era presente un margine più rialzato, verso sud, sia trasversalmente con un profilo asimmetrico con la parte più profonda verso est.

In questa articolata paleo-depressione la successione verticale delle torbiditi si differenzia da zona a zona.

Le litofacies individuate tramite il rilievo geologico in scala 1:5000, molto basato su criteri morfologici, sono state confermate e dettagliate nel rilievo in scala 1:000 alla luce soprattutto dell'analisi e rielaborazione dei sondaggi. Detta analisi è stata condotta determinando lo spessore e la posizione degli strati litoidi o semi-litoidi (arenarie) e degli strati pelitico-marnosi, al fine di poter applicare il criterio del rapporto arenaria/pelite secondo la classificazione A.G.I. (1979).

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 8 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

L'ubicazione delle colonne stratigrafiche così definite sul profilo geologico longitudinale, unitamente ai caratteri litologici e analisi di facies, ha permesso la correlazione dei vari orizzonti per lunghezze significative ed apprezzabili in relazione alle distanze coinvolte dal progetto. Il riconoscimento di seppur sporadici livelli guida è stato di ausilio per l'interpretazione della struttura del sottosuolo.

Nell'ambito della Formazione di Camerino coinvolta dalle opere di progetto sono state dunque riconosciute le seguenti litofacies: associazione pelitica; associazione pelitico-arenacea; associazione arenaceo-pelitica.

La distinzione ed individuazione delle litofacies, oltre che su caratteri macroscopici, è stata eseguita attraverso dati quantitativi, ovvero attraverso il calcolo del rapporto arenaria/pelite (A/P), definendo per ogni litofacies un campo di valori rappresentativo.

### **Associazione pelitica – Rapporto $0 \leq A/P \leq 0,2$**

E' costituita da marne argillo-siltose scure, a stratificazione sottile o localmente media, laminate, con sequenze di Bouma del tipo Te; localmente sono presenti subordinate intercalazioni di strati arenacei o siltitici a spessore sottile e medio, a grana fine, con sequenze di Bouma principalmente del tipo Tde Tce.

Va segnalato che le porzioni pelitiche contengono sovente materia organica, resti di carbone, livelli a diatomiti e rari e sottili livelli lenticolari di calcari marnosi compatti, hanno superfici di strato lisce ed untuose al tatto, risultando nel complesso fetide.

### **Associazione pelitico-arenacea – Rapporto $0,2 \leq A/P \leq 1$**

E' costituita da una prevalenza di argille marnose ben stratificate di colore grigio scuro con intercalazioni subordinate di arenarie grigio-giallastre in strati sottili e medi, a grana da media a fine o finissima. Si rinvencono sequenze di Bouma del tipo Tac e qualche volta sequenze del tipo Tae come nel sondaggio A21.2.

Anche in questo caso gli orizzonti pelitici contengono sovente materia organica, resti di carbone, livelli a diatomiti, pirite e rari e sottili livelli lenticolari di calcari marnosi compatti, hanno superfici di strato lisce ed untuose al tatto, risultando nel complesso fetide.

### **Associazione arenaceo-pelitica – Rapporto $A/P \geq 1$**

E' formata essenzialmente da arenarie grigiastre e giallastre, con granulometria da grossolana a fine, in strati da sottili a spessi, da cementate a mediamente cementate e da subordinate marne argilloso-siltose grigie. Si rinvencono prevalentemente sequenze di Bouma del tipo Ta Tac Tce e sequenze del tipo Tae come nel sondaggio A7.2.

All'interno di questa litofacies si rinvencono locali e sottili livelli caotici di materiale risedimentato, per lo più in prossimità della faglia/paleoscarpata e resti carboniosi e fetidi concentrati nelle porzioni pelitiche.

Il rapporto arenaria/pelite sebbene sia  $\geq 1$ , è comunque basso poiché al massimo e isolatamente raggiunge il valore 2,39.

Le **alluvioni terrazzate** dell'Appennino Umbro-Marchigiano sono suddivise secondo quattro principali ordini di terrazzi poligenici posti ad altezze variabili da pochi metri ad oltre 200 m sugli attuali fondi vallivi. I depositi alluvionali fluviali delle principali valli

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 9 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	--------------------------

sono rappresentati da successioni (spessori fino a 30-35 m) prevalentemente ghiaiose con subordinate intercalazioni sabbiose o sabbioso-limose. La stratificazione è quasi sempre incrociata a grande scala, con tipico aspetto a "festoni", che permette di riferire i depositi in questione a corsi d'acqua a canali multipli intrecciati (braided).

I **depositi di versante** sono per la maggior parte rappresentati da coperture colluviali e accumuli caotici derivanti da movimenti di massa di varia estensione, per lo più riferibili all'Olocene. I depositi colluviali presenti nell'area studiata presentano una granulometria prevalentemente fine, condizionata dalla litologia delle formazioni del substrato da cui derivano. Sono infatti costituiti da argille limose, limi argilloso-sabbiosi e, subordinatamente sabbie limose, con ghiaie sparse e/o pezzame marnoso-calcareo o arenaceo eterometrico, localmente abbondante.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 10 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### 3.2 PROBLEMATICHE GEOMORFOLOGICHE

Alla luce delle risultanze delle indagini geognostiche, dei rilievi geomorfologici in sito e delle cartografie PAI, lungo la viabilità si evidenziano alcuni corpi di frana, che talvolta interferiscono con il tracciato.

Nella campagna di indagine integrativa del 2017 sono state eseguite indagini ed installati inclinometri per il monitoraggio di queste zone in frana; al momento della stesura del presente elaborato è disponibile solo la lettura di zero delle strumentazioni.

Nel seguito vengono sintetizzate le zone in frana interferenti con il tracciato.

Una prima area è segnalata dal PAI nei pressi del viadotto Vallone. La codifica del dissesto è F16-0707 (P1), il movimento è di tipo scorrimento.

Un'altra area segnalata dal PAI è in corrispondenza delle pile del viadotto "S. Anna". L'area è denominata F16-0945 (P1).

In corrispondenza della spalla 1 e prime pile del viadotto S. Pietro è presente una zona indicata con sigla F-16-0944 (P2).

Un'area non segnalata dal PAI, denominata L3-1, interessa l'imbocco Nord della galleria naturale "Mecciano". Il dissesto è di tipo scorrimento, e interessa la coltre superficiale formata da terreni limo-argillosi. Il substrato è costituito dall'Associazione Pelitico-Arenacea della Formazione di Camerino.

Altra frana segnalata dal PAI è denominata F16-0694 (P1), lambisce l'area dell'imbocco Sud della galleria "Mecciano".

L'area catalogata PAI F16-0683 (P3) ha uno spessore delle coperture di 10-11m; la frana, è di tipo scorrimento.

Il PAI identifica una area di dissesto denominata F19-1701 (P1). Il tracciato lambisce soltanto l'area dissestata e pertanto non ne è interessato.

La cartografia di progetto, ricavata anche da analisi di campagna, ingrandisce leggermente l'area probabilmente interessata da movimenti gravitativi, estendendo alla zona di interesse fenomeni provenienti dal colle su cui sorge Camerino (F19-1695- P3).

Proseguendo attorno al colle di Camerino, poco dopo lo svincolo per Muccia il tracciato attraversa un'altra area identificata come dissesto, denominata dal PAI F19-1682 (P3). Anche in questo caso la cartografia di progetto riconosce il fenomeno, considerandolo però un movimento di tipo colamento, tipico quindi dei terreni presenti nel territorio.

#### 3.2.1 Interferenza aree potenzialmente instabili con le opere

Nella campagna geognostica integrativa del 2017, oltre a rilievi geomorfologici in sito, sono state eseguite numerose indagini in corrispondenza di queste zone evidenziate dal PAI, al fine di verificare lo spessore ed estensione della coltre potenzialmente instabile e lo stato (frana attiva o quiescente).

Al momento della stesura del presente elaborato, le letture inclinometriche non sono ancora disponibili (solo lettura di zero). Quindi si è fatto riferimento alle attuali indicazioni PAI, alle stratigrafie dei sondaggi ed ai rilievi in sito. Per le opere che ricadono in aree potenzialmente instabili (Viadotto Vallone: spalla 2 e pile 3 e 4, viadotto S. Anna: pile centrali, viadotto S. Pietro: spalla 1 e prime 2 pile, viadotto Palente: spalla 2) le fondazioni sono previste su pali di grande diametro, disposti a formare delle "celle" al fine di realizzare una fondazione a "pseudo-pozzo". I pali inoltre sono dimensionati considerando una coltre potenzialmente instabile di circa 5-6 m; in cui è stata cautelativamente ridotta la portanza laterale ed il modulo di reazione orizzontale palo-terreno.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 11 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

## 4. INDAGINI GEOTECNICHE

### 4.1 GENERALITÀ

Al fine di caratterizzare i terreni presenti nel lotto in esame si è fatto riferimento alle seguenti campagne di indagine:

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

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

### 4.2 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2002

La campagna di indagine è stata svolta nel periodo ottobre-dicembre 2002 ed è consistita in:

- 16 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati "S") di profondità compresa tra 20 e 135 m;
- installazione di piezometri per la lettura del livello di falda;
- stendimenti per prove geofisiche di sismica a rifrazione (nelle zone degli imbocchi delle gallerie naturali).
- installazione di n. 1 tubi inclinometrico nel foro di sondaggio S42.

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;
- prove pressiometriche in foro;
- prove penetrometriche dinamiche pesanti DPSH (sigla "P");
- misure di valori di Pocket Penetrometer.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte nel lotto in esame. Alcuni sondaggi ubicati lungo il vecchio tracciato delle gallerie naturali, non verranno considerati nella caratterizzazione stratigrafica in quanto con il nuovo tracciato presentano elevato fuori asse.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 12 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**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	Strumentazione installata	n. prove pressiometriche	n. prove Lugeon
S28	30.0		2	-	-	-	
S29	30.0	-	-	Cl: 3 CL: 3	CC	-	
S30	30.0		1	-	-	-	
S31	30.0		-	-	-	-	
S32	35.0	317.0	1	-	-	-	
S33	40.2	375.0	-	Cl:4 CR: 4	TA	3	2
S34	30.0	-	-	Cl: 3 CR: 6	TA	-	-
S36	29.5	-	1	CR: 7	TA	-	-
S38	72.2	411	-	CL: 7	TA	2	3
S39	20.0	355.2	3	Cl: 1 CL: 3 CR: 1	-	-	-
S40	30.0	374.4	2	CL: 4	TA	-	-
S41	30.0	393.8	-	CL: 4	TA	-	-
S42	25.0	480.3	2	Cl: 2 CL: 4	IN	-	-
S43	40.0	499.6	1	Cl: 1 CL: 7	TA	-	4
S44b	30.0	-	1	Cl: 1 CL: 3	TA	-	-
S53	: 135.0	452	3	Cl: 4 CR1	TA	-	-

TA [m]: Piezometro a Tubo Aperto [profondità tratto filtrante]

CC : cella di Casagrande

IN. = Inclinometro

C.L. = Campione litoide

C.R. = Campione rimaneggiato

C.I. = Campione indisturbato

**Tabella 2 – Prove penetrometriche dinamiche pesanti DPSH campagna geognostica del 2002**

Prova	Profondità (m)
<i>P20</i>	<i>14.0</i>
<i>P21</i>	<i>8.2</i>
<i>P22</i>	<i>8.6</i>
<i>P23</i>	<i>11.2</i>
<i>P24</i>	<i>13.0</i>
<i>P25</i>	<i>6.0</i>
<i>P26</i>	<i>6.2</i>
<i>P27</i>	<i>8.6</i>
<i>P28</i>	<i>12.2</i>
<i>P29</i>	<i>10.4</i>
<i>P30</i>	<i>8.0</i>

### 4.2.1 Prove pressiometriche in foro

Nella seguente tabella sono elencati i risultati delle prove pressiometriche eseguite su ciascun sondaggio.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 13 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Tabella 3 – 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
S50P1	59.5	Pa	1009	121.39	322.91	702.04	788.59
S50P2	71.2	Pa	1221	136.99	364.4	717.63	732.29
S50P3	79.5	Pa	1298	143.41	381.19	962.98	1100.29
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

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 14 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	---------------	-----------	---------------------------

**4.2.2 Prove di permeabilità**

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

**Tabella 4 – 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
S50	52.0	< 1.80E-9
	62.0	< 3.3 E-8
	73.0	< 1.1E-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

**4.2.3 Indagini sismiche**

Durante la campagna di indagine del 2002 sono state eseguite prove sismiche a rifrazione, consistite in profili sismici in onde P ubicati agli imbocchi delle gallerie naturali, come di seguito specificato.

Si riporta la tabella riassuntiva delle indagini eseguite.

**Tabella 5 – 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

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 15 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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

**4.2.4 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 ( $\gamma_N$ );
- determinazioni del contenuto naturale d'acqua ( $w_N$ );
- prove di taglio diretto;
- prove triassiali non consolidate non drenate (UU);
- prove ad espansione laterale libera ELL.

In roccia:

- determinazioni del peso di volume naturale ( $\gamma_N$ );
- determinazione della resistenza a compressione monoassiale ( $\sigma_C$ ).

**Tabella 6 – Tabelle laboratorio campagna 2002**







## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 19 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	---------------------------

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 <sub>L</sub>	%	47.54	44.09	44.58			48.18				
W <sub>P</sub>	%	22.23	28.09	26.36			22.3				
I <sub>c</sub>	-	0.7	1.0	1.2			1.4				
I <sub>P</sub>	%	25.31	16.0	18.22			25.88				
Caratteristiche fisiche											
γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>		16.56	20.43	22.32		23.55	22.73	23.49	23.33	
V <sub>p</sub>	m/s										
V <sub>s</sub>	m/s										
w <sub>N</sub>	%	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 <sub>ed</sub>	MPa										
c <sub>v</sub>	cm <sup>2</sup> /s										
c <sub>u</sub>	-										
k	cm/s										
Resistenza a compressione monoassiale											
σ <sub>c</sub>	kPa						133.77	1290	12413	13738	
Resistenza non drenata											
(ELL) c <sub>u</sub>	kPa										
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa										
Resistenza drenata											
(TD) c	kPa		3.66								
(TD) f	°		27.53								
(TD) c <sub>r</sub>	kPa										
(TD) f <sub>r</sub>	°										
(TX-CIU) c	kPa										
(TX-CIU) f	°										
(TX-CID) c	kPa				3.58						
(TX-CID) f	°				56.73						



<b>RIEPILOGO RISULTATI PROVE DI LABORATORIO</b>											12 di 14
<b>OPERA: PEDEMONTANA</b>											
<b>Sondaggio</b>	-	S42	S42	S42	S42	S42	S53	S53	S53	S53	
<b>Campione</b>	-	2	3	4	5	6	1	CR	2	3	
<b>Unità</b>	-	ECla	S4	S4	S4	S4	ECla	ECla	S1	S1	
<b>Prof. iniziale</b>	m	5.00	9.20	15.50	19.50	23.50	5.40	9.00	20.10	26.50	
<b>Prof. finale</b>	m	5.50	9.90	16.50	20.50	24.20	6.00	9.60	20.80	27.10	
<b>Granulometria</b>											
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			
<b>Limiti di Atterberg</b>											
W <sub>L</sub>	%	44.28		41.03			53.05	49.18			
W <sub>P</sub>	%	22.09		22.41			23.95				
I <sub>c</sub>	-	0.9					0.9				
I <sub>p</sub>	%	22.19		18.61			29.1	29.18			
<b>Caratteristiche fisiche</b>											
γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>	19.44	20.66	22.65	23.27	22.9	18.87	20.62	24.36		
V <sub>p</sub>	m/s										
V <sub>s</sub>	m/s										
w <sub>N</sub>	%	24.996	17.1				27.378	27.76	8.13		
e	-										
S	%										
<b>Prove edometriche (valori riferiti alla tensione geostatica in sito)</b>											
E <sub>ed</sub>	MPa										
c <sub>v</sub>	cm <sup>2</sup> /s										
c <sub>o</sub>	-										
k	cm/s										
<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>											
σ <sub>c</sub>	kPa		729	120.07	2781	1747			403		
<b>Resistenza non drenata</b>											
(ELL) c <sub>u</sub>	kPa										
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa	51.73					48.28				
<b>Resistenza drenata</b>											
(TD) c	kPa			80				4.39			
(TD) f	°			28.86				23.35			
(TD) c <sub>d</sub>	kPa							0.77			
(TD) f <sub>d</sub>	°							17.16			
(TX-CIU) c	kPa										
(TX-CIU) f	°										
(TX-CID) c	kPa										
(TX-CID) f	°										

(\*) segue da pagina precedente.

#### 4.3 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2004

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

- 8 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati BH4 e BH5), con profondità rispettivamente di 25.0 e 40.0 m;
- installazione di piezometri nei fori di sondaggio eseguiti;
- tomografie sismiche a rifrazione.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati effettuati:

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

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 22 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

- prelievo di campioni per prove di laboratorio;
- prove pressiometriche Menard.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte nel lotto in esame.

**Tabella 7 – 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
BH17	25.0	360.65	2	Cl: 2 CR: 4	T.A.[2÷25]	1
BH18	25.0	363	2	Cl: 2 CR: 2	T.A.[0÷25]	1
BH07	40.0	326	6	CR: 11	CC [39]	-
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
BH12	25.0	447	2	Cl: 2 CR: 2	T.A.[3÷25]	-

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

### 4.3.1 Prove pressiometriche in foro tipo Menard

Nella seguente tabella sono elencati i risultati delle prove pressiometriche eseguite su ciascun sondaggio.

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 23 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**4.3.2 Indagini sismiche**

Durante la campagna di indagine del 2004 sono state eseguite prove sismiche a rifrazione.

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.

**4.3.3 Prove di laboratorio**

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



Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE000	Id. doc. REL	N,prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 25 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	--------------	--------------------	---------------	-----------	---------------------------

<b>Sondaggio</b>	-	BH10	BH10	BH10	BH11	BH12	BH12	BH18
<b>Campione</b>	-	1.00	2.00	3.00	3.00	1.00	2.00	1.00
<b>Tipo</b>	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Unità</b>	-	EClA	EClA	Sch	Sch	EClA	Pa	EClS
<b>Prof.</b>	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 <sub>L</sub>	%	40.8	88.6	52.5	72.5	41.8	42.7	
W <sub>P</sub>	%	27.1	41.9	25.7	32.4	23.2	27.1	
I <sub>c</sub>	-	1.42	1.24	1.37	1.40	1.27	1.74	
I <sub>p</sub>	%	13.7	46.7	26.8	40.1	18.6	15.6	

**Caratteristiche fisiche**

γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>	19.6	17.7	18.9	20.2	18.6	21.1	21.6
w <sub>N</sub>	%	21.3	30.8	15.7	16.5	18.2	15.5	9.4

**Resistenza a compressione monoassiale**

σ <sub>c</sub>	MPa							
----------------	-----	--	--	--	--	--	--	--

**Resistenza non drenata**

(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa							
(TX-ELL) c <sub>u</sub>	kPa							

**Resistenza drenata**

(TD) c	kPa	8.7		23.3	64.7			
(TD) f	°	26.6		26.1	23.3			
(TD) c <sub>r</sub>	kPa							
(TD) f <sub>r</sub>	°							
(TX-CIU) c	kPa		49.0					
(TX-CIU) f	°		28.0					

#### 4.4 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2006-2007

La campagna di indagine effettuata nel 2006-2007 è consistita in:

- 8 sondaggi geognostici a carotaggio continuo (denominati "SN") di profondità compresa tra 14 e 35 m;
- n. 7 sondaggio geognostici eseguiti a distruzione di nucleo;
- installazione di piezometri a tubo aperto (Norton) e piezometri Casagrande nei fori dei sondaggi eseguiti;
- installazione di tubi inclinometrici;

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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 26 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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

Nelle seguenti tabelle si sintetizzano le attività svolte nel lotto in esame.

**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 dilatomet riche
SN2226	35.0	340	3	Cl: 3	IN	3	1
SN2226bis (SD)	30.0	340	-	-	C.C.:[17;30]	-	-
SN2236	25.7	391.5	4	Cl:3	IN	-	-
SN2238	16.5	453.8	3	C.l.: 4	IN	-	-
SN2238bis(SD)	15.0	453.8	-	-	T.A.:[2÷15]	-	-
SN2242	21.0	472	2	C.l.: 3	IN	-	-
SN2242bis(SD)	15.0	470.5	-	-	T.A.:[3÷15]	-	-
SN2244	14.3	448.5	1	Cl: 2	IN	-	-
SN2244bis(SD)	9.0	448.5	-	-	T.A.:[3÷9]	-	-
SN2245	18.0		3	Cl:3 CR:3	IN	-	-
SN2245bis (SD)	15.0		-	-	TA	-	-
SN2246	15.0		2	Cl:3 CR:2	IN	-	-
SN2246bis (SD)	10.0		-	-	TA	-	-
SN2252	16.5		-	Cl:2	IN	-	-
SN2252bis (SD)	14.0		-	-	TA	-	-

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. = Inclino metro  
C.L. = Campione litoide  
C.R. = Campione rimaneggiato  
C.I. = Campione indisturbato

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 27 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

#### 4.4.1 Letture inclinometriche

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

#### 4.4.2 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 ( $\gamma_N$ );
- determinazione del contenuto d'acqua naturale ( $w_N$ );
- prove di taglio diretto;
- prove riassiali.

**Tabella 9– Tabelle laboratorio campagna 2006-2007**

Sondaggio		SN2226	SN2226	SN2226	SN2236	SN2236	SN2236	SN2238	SN2238
Campione	-	1S	2S	3M	1S	2S	3S	1M	1S
Tipo	-	ind							
Unità	-	EClā	EClā	Pa	EClā	EClā	Ala	Salt	EClā
Prof.	m	4.00	9.50	29.60	3.20	5.50	12.00	16.00	1.80
<b>Granulometria</b>									
G	%						0.0		
S	%						8.3		
L + A	%						91.7		
L	%						28.9		
A	%						62.8		
D50	mm								
<b>Limiti di Atterberg</b>									
W <sub>L</sub>	%	40.4	42.5		37.5	31.3	36.8		42.2
W <sub>P</sub>	%	24.0	28.9		24.8	21.5	26.8		26.3
I <sub>c</sub>	-	1.24	1.58		1.06	0.50	1.41		1.46
I <sub>P</sub>	%	16.4	13.6		12.7	9.8	10.0		15.9
<b>Caratteristiche fisiche</b>									
$\gamma_N$	kN/m <sup>3</sup>	19.3	18.7	22.8	18.3	17.9	18.0	21.6	19.6
w <sub>N</sub>	%	20.0	21.0	10.6	24.0	26.4	22.6	13.6	18.9
<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>									
$\sigma_c$	MPa								
<b>Resistenza non drenata</b>									
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa								
(TX-ELL) c <sub>u</sub>	kPa								
<b>Resistenza drenata</b>									
(TD) c	kPa						26.0		
(TD) f	°		27.2		27.3	27.2	18.9		
(TD) c <sub>r</sub>	kPa								
(TD) f <sub>r</sub>	°		12.6						

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 28 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

<b>Sondaggio</b>	-	SN2238	SN2238	SN2242	SN2242	SN2242	SN2244	SN2244
<b>Campione</b>	-	2S	3S	1M	1S	2S	1S	2M
<b>Tipo</b>	-	ind	ind	ind	ind	ind	ind	ind
<b>Unità</b>	-	ECl <sub>a</sub>	ECl <sub>a</sub>	Sch	ECl <sub>a</sub>	ECl <sub>a</sub>	ECl <sub>a</sub>	Salt
<b>Prof.</b>	m	6.60	9.00	19.00	5.90	11.60	2.10	7.00

**Granulometria**

G	%	0.0						
S	%	1.9						
L + A	%	98.1						
L	%	36.4						
A	%	61.7						
D50	mm							

**Limiti di Atterberg**

$W_L$	%	45.0	53.9	36.5	49.2	33.2	34.1	
$W_P$	%	25.7	28.6	24.4	25.9	23.8	23.7	
$I_c$	-	1.19	1.21	2.05	1.24	1.14	1.63	
$I_p$	%	19.3	25.3	12.1	23.3	9.4	10.4	

**Caratteristiche fisiche**

$\gamma_N$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	18.6	21.1	19.2	19.9	17.9	20.5
$w_N$	%	22.1	23.2	11.7	20.3	22.4	17.1	9.9

**Resistenza a compressione monoassiale**

$\sigma_c$	MPa							
------------	-----	--	--	--	--	--	--	--

**Resistenza non drenata**

(TX-UU) $c_u$	kPa							
(TX-ELL) $c_u$	kPa					122.5		

**Resistenza drenata**

(TD) c	kPa	4.2	14.9		17.5		4.1	
(TD) f	°	28.8	20.1		23.9		32.2	
(TD) $c_r$	kPa		27.0		7.9			
(TD) $f_r$	°		12.8		17.0			

**4.5 CAMPAGNA GEOGNOSTICA DEL 2017**

La campagna geognostica del 2017 è stata programmata con le seguenti finalità:

- Realizzazione di sondaggi geotecnici in corrispondenza di opere non precedentemente indagate o con poche indagini rispetto alla importanza dell'opera ed in relazione alla variabilità stratigrafica;
- Prelievo di campioni indisturbati da sottoporre alle prove di laboratorio per la caratterizzazione meccanica sia delle coltri, talvolta potenzialmente instabili, sia delle formazioni del substrato;
- La realizzazione di numerose prove in foro di sondaggio per la caratterizzazione dei materiali in sito (SPT in terreni incoerenti e PP in terreni coesivi).
- Installazione di strumentazioni inclinometriche per il monitoraggio dei numerosi corpi di frana (anche catalogati PAI) che intercettano il tracciato;
- Installazione di tubazioni piezometriche per il rilievo dei livelli di falda;
- Esecuzione dei pozzetti esplorativi con prelievo di campioni rimaneggiati per analisi di classificazione e prove di carico su piastra al fine di indagare i terreni per il trattamento del piano di posa.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N,prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 29 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	---------------	-----------	---------------------------

In particolare, la campagna di indagine integrativa effettuata nel 2017 è consistita in:

- n. 19 sondaggi geognostici a carotaggio continuo di profondità compresa tra 15 e 45 m, eseguiti nelle tratte all'aperto;
- n. 4 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo, eseguiti nelle tratte all'aperto;
- n. 7 sondaggi geognostici eseguiti nelle Gallerie naturali (denominati "A");
- n. 12 pozzetti esplorativi, denominati "XP", di profondità compresa tra 1 e 2 m, dove sono state eseguite prove di carico su piastra e prelievo di un campione rimaneggiato;
- installazione di piezometri a tubo aperto per la lettura del livello di falda;
- installazione di tubi inclinometrici nei fori di sondaggio per il monitoraggio delle aree in frana.

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 coesivi;
- prove dilatometriche su roccia;
- rilievo falda.

Durante l'esecuzione dei pozzetti esplorativi sono stati effettuati:

- descrizione stratigrafica e rilievo dello spessore vegetale;
- prelievo di campioni sottoposti a prove di laboratorio;
- prove di carico su piastra.

Nella seguente tabella si sintetizzano le attività svolte nel lotto in esame.

**Tabella 10 – Riepilogo delle indagini in sito eseguite nella campagna geognostica del 2016**

Sondaggio /Pozzetto	Profondità [m]	Quota boccaforo [m] s.l.m.	n. prove SPT	Prelievo campioni	Strumentazione installata
X3.3	26.8	311.699	1	C.I.: 2 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[0÷26]
X3.4	34.5	333.340	6	C.I.: 2 CR:9	T.A.[0÷30]
X3.5	20.0	341.078	3	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[3÷15]
X3.6	18.6	347.101	5	C.I.: 2 C.L.: 2 CR: 7	T.A.[3÷18.6]
X3.7	20.0	323.050	4	C.I.: 2 C.L.: 1 CR: 2	IN.[20]
X3.7bis (DS)	20.0	323.148	-	-	T.A.[3÷20]
X3.9	27.0	356.232	3	C.I.: 1 C.L.: 1 CR: 5	IN.[27]
X3.10	15.0	337.710	3	C.I.: 2 C.L.: 1 CR: 5	T.A.[0÷15]
X3.13	20.0	343.624	3	C.I.: 1 C.L.: 2	T.A.[0÷20]

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 30 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

				CR: 4	
X3.14	20.0	327.945	3	C.I.: 1 C.R.: 2 C.L.: 4	T.A.[0÷20]
X3.16	30.0	304.983	2	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 5	T.A.[6÷30]
X3.17	45.0	325.801	5	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 8	T.A.[0÷35]
X3.18	20.0	338.738	3	C.I.: 2 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[0÷20]
X3.20	15.0	354.617	3	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[0÷15]
X3.22	25.0	369.004	5	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 7	T.A.[0÷25]
X4.1	16.0	373.981	3	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 4	T.A.[0÷16]
X4.3	15.0	383.634	2	C.I.: 1 C.L.: 2 CR: 3	T.A.[0÷15]
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]
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	-
X4.4 (DS)	15.0		-	-	IN
X4.4bis (DS)	15.0		-	-	TA
X3.18bis (DS)	20.0		-	-	IN
XPZ1.3	1.6	-	-	CR:1	-
XPZ4.3	2.0	-	-	CR:1	-
XPZ5.3	1.6	-	-	CR:1	-
XPZ6.3	1.6	-	-	CR:1	-
XPZ7.3	1.9	-	-	CR:1	-
XPZ8.3	2.0	-	-	CR:1	-
XPZ9.3	1.6	-	-	CR:1	-
XPZ1.4	2.0	-	-	CR:1	-
XPZ2.4	2.0	-	-	CR:1	-
XPZ3.4	1.6	-	-	CR:1	-
PA3.2	2.2	-	-	-	-
PA3.3	2.0	-	-	-	-

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 31 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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
---

Nella seguente tabella si riportano i risultati delle prove di carico su piastra circolare (D= 29.8 cm) eseguite nei pozzetti esplorativi:

**Tabella 11 - Risultati prove di carico su piastra sui pozzetti - campagna geognostica del 2017**

Pozzetto	Profondità [m]	Md1 [MPa]	Md2 [MPa]	Unità
XPZ1.3	0.50	2.8	129.8	Ecla
XPZ4.3	0.50	3.2	80.7	Ecla
XPZ5.3	0.50	7.7	175.6	Ala
XPZ6.3	0.50	8.2	21.9	Ecla
XPZ7.3	0.50	2.7	13.3	Ecla
XPZ8.3	0.50	3.5	29.6	Ala
XPZ9.3	0.50	4.8	38.8	Ala
XPZ1.4	0.50	10.3	67.8	Ala
XPZ2.4	0.50	3.2	3.8	Ecla
XPZ3.4	0.50	12.2	102.9	Ecla

Md1 = modulo di deformazione al primo ciclo di carico  
 Md2 = modulo di deformazione al secondo ciclo di carico

#### 4.5.1 Letture inclinometriche

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

#### 4.5.2 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;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- determinazione del peso di volume naturale ( $\gamma_N$ );
- 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 ( $\gamma_N$ );
- determinazione della resistenza a compressione monoassiale ( $\sigma_c$ ).

Al momento della stesura del presente elaborato, si ha a disposizione solo una minima parte dei risultati delle prove di laboratorio, che sono attualmente in corso. Nelle tabelle seguenti sono sintetizzati i risultati delle prove eseguite.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 32 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Tabella 12 – Tabelle laboratorio campagna 2017

<b>Sondaggio</b>	-	X3.3	X3.3	X3.3	X3.3	X3.3	X3.4	X3.4	X3.4	X3.4	
<b>Campione</b>	-	Cl1	Cl2	CRL1	CRL2	SPT1	Cl1	Cl2	SPT4	SPT6	
<b>Tipo</b>	-	ind	ind	rim	rim	rim	ind	ind	rim	rim	
<b>Unità</b>	-	Salt	Pa	Pa	Pa	Ag	Ate	Ate	Ate	Ate	
<b>Prof.</b>	m	6.00	8.75	13.00	15.60	3.00	3.50	8.60	12.30	18.00	
<b>Granulometria</b>											
G	%	0.0	0.0				1.0	2.0	0.0	0.5	
S	%	6.0	41.0				34.0	32.0	36.0	31.5	
L +A	%	94.0	59.0				65.0	66.0	64.0	68.0	
L	%	53.0	59.0				39.0	32.0	40.0	39.0	
A	%	41.0	0.0				26.0	34.0	24.0	29.0	
<b>Limiti di Atterberg</b>											
W <sub>L</sub>	%	46.7					37.3	36.8	39.4	38.0	
W <sub>p</sub>	%	22.1					17.7	16.4	16.0	17.6	
I <sub>p</sub>	%	24.6					19.5	20.4	23.3	20.4	
<b>Caratteristiche fisiche</b>											
γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>	21.9	22.9				20.3	20.3			
w <sub>N</sub>	%	15.5	8.8				20.4	20.6			
<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>											
σ <sub>c</sub>	MPa			4.66	3.24						
<b>Resistenza non drenata</b>											
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa										
(TX-ELL) c <sub>u</sub>	kPa	301.5	577.5				66.0	81.5			
<b>Resistenza drenata</b>											
(TD) c	kPa							50.0			
(TD) f	°							19.0			
(TD) c <sub>r</sub>	kPa							8.5			
(TD) f <sub>r</sub>	°							22.7			
<b>Sondaggio</b>											
<b>Sondaggio</b>	-	X3.5	X3.5	X3.5	X3.5	X3.5	X3.5	X3.6	X3.6	X3.6	
<b>Campione</b>	-	Cl1	SPT1	SPT2	SPT3	CRL1	CRL2	Cl1	Cl2	SD1	SPT1
<b>Tipo</b>	-	ind	rim	rim	rim	rim	rim	ind	ind	ind	rim
<b>Unità</b>	-	Ate	Ate	Ag	Pa	Pa	Pa	Ecls	Ecls	Ecls	Ecla
<b>Prof.</b>	m	2.00	2.50	5.30	9.00	9.55	14.80	5.00	8.00	7.70	3.00
<b>Granulometria</b>											
G	%	2.0	2.0						33.0	18.0	8.0
S	%	34.0	26.0						50.0	47.0	23.0
L +A	%	64.0	71.0						16.0	36.0	69.0
L	%	33.0	32.0						11.0	36.0	42.0
A	%	31.0	39.0						5.0	0.0	27.0
<b>Limiti di Atterberg</b>											
W <sub>L</sub>	%	44.5	57.1	26.2	52.0			46.9			42.4
W <sub>p</sub>	%	19.6	23.0	17.0	26.7			22.2			18.7
I <sub>p</sub>	%	24.9	34.1	9.3	25.3			24.6			23.6
<b>Caratteristiche fisiche</b>											
γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>										
w <sub>N</sub>	%										
<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>											
σ <sub>c</sub>	MPa						5.6				
<b>Resistenza non drenata</b>											
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa										
(TX-ELL) c <sub>u</sub>	kPa										
<b>Resistenza drenata</b>											
(TD) c	kPa	30.3						10.0			
(TD) f	°	27.9						36.6			
(TD) c <sub>r</sub>	kPa	9.7						-2.0			
(TD) f <sub>r</sub>	°	24.7						37.3			

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 33 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

<b>Sondaggio</b>	-	X3.6	X3.6	X3.6	X3.6	X3.7	X3.7	X3.7
<b>Campione</b>	-	SPT2	SPT3	SPT5	CRL1	C11	C12	CRL1
<b>Tipo</b>	-	rim	rim	rim	ind	ind	ind	ind
<b>Unità</b>	-	ECl <sub>s</sub>	ECl <sub>a</sub>	Salt	Pa	ECl <sub>a</sub>	ECl <sub>a</sub>	Pa
<b>Prof.</b>	m	6.00	10.50	15.00	17.70	6.00	15.00	18.00
<b>Granulometria</b>								
G	%		0.0	1.0		0.0	0.0	
S	%		26.0	10.0		30.0	23.0	
L + A	%		74.0	89.0		69.0	76.0	
L	%		36.0	52.0		37.0	31.0	
A	%		38.0	37.0		32.0	45.0	
<b>Limiti di Atterberg</b>								
W <sub>L</sub>	%		48.0	60.5		39.9	43.3	
W <sub>p</sub>	%		18.9	30.0		17.5	20.7	
I <sub>p</sub>	%		29.1	30.5		22.5	22.6	
<b>Caratteristiche fisiche</b>								
γ <sub>N</sub>	kN/m <sup>3</sup>					20.3	19.3	
w <sub>N</sub>	%					20.9	25.2	
<b>Resistenza a compressione monoassiale</b>								
σ <sub>c</sub>	MPa				2.94			2.2
<b>Resistenza non drenata</b>								
(TX-UU) c <sub>u</sub>	kPa							
(TX-ELL) c <sub>u</sub>	kPa				108.0	56.0		
<b>Resistenza drenata</b>								
(TD) c	kPa						28.5	
(TD) f	°						29.4	
(TD) c <sub>r</sub>	kPa						12.2	
(TD) f <sub>r</sub>	°						29.8	

(\*) segue da pagina precedente.

## 5. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente capitolo si riporta la caratterizzazione geotecnica generale del tracciato in esame, valutata sulla base dell'interpretazione di tutte le indagini geotecniche svolte in sito. 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 tutti i risultati. Quindi al fine della definizione dei parametri geotecnici di progetto, si farà riferimento anche 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 intercettate lungo il tracciato, verranno interpretati i risultati delle indagini sulla base dei criteri di seguito esposti e quindi verranno definiti i parametri geotecnici di progetto e la stratigrafia di riferimento sia lungo il tracciato, sia per le principali opere d'arte.

Nel profilo stratigrafico longitudinale sono riportati in forma grafica i risultati delle indagini

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 34 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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.

Il profilo stratigrafico verrà preso a riferimento per definire la stratigrafia di dettaglio lungo il tracciato ed in corrispondenza delle opere d'arte in progetto.

### 5.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE

Di seguito si elencano le unità geotecniche individuate lungo il tracciato:

- **Unità R - Terreno di riporto e coltre vegetale:** si includono i riporti di origine antropica ed il terreno vegetale; si tratta generalmente di limo sabbioso e sabbia limosa con clasti e frammenti vegetali e di laterizi. Non riveste rilevanza progettuale in quanto rimossa durante le operazioni di scavo/scotico.
- **Unità ECl<sub>a</sub>, ECl<sub>s</sub>,  $\alpha$  - Depositi eluvio colluviali:** si tratta di depositi a composizione granulometrica variegata ma generalmente a prevalente componente fine limo argillosa (**Unità ECl<sub>a</sub>**); localmente si rinviene sabbia limosa con clasti derivanti dalla disgregazione del substrato roccioso (**Unità ECl<sub>s</sub>**). Localmente sono state individuate zone con coperture di materiale di accumuli di frana (**Unità  $\alpha$** ).
- **Unità Ag, As, Ala - Alluvioni:** si tratta di depositi alluvionali rinvenibili in corrispondenza dei corsi d'acqua e si distinguono: ghiaie eterometriche ed eterogenee in matrice sabbiosa (**Unità Ag**), sabbie, sabbie debolmente limose (**Unità As**); limi argillosi (**Unità Ala**).
- **Unità Ate – Alluvioni terrazzate:** si tratta di depositi alluvionali prevalentemente coesivi (argille limose).
- **Unità Salt – substrato alterato:** si tratta di una fascia di spessore variabile costituita da argilla limosa, marnosa, consistente che sovrasta il substrato a carattere da semilitoide a litoide, rappresenta la parte superiore alterata del substrato.

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 pu 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 pari a  $A/P = 0.9$  in corrispondenza della GN Croce di Calle,  $A/P = 0.65$  in corrispondenza della GN Mistrinello,  $A/P = 0.8$  come valore medio complessivo. Quindi prevale generalmente la componente pelitico-marnosa ( $A/P < 1$ ) il

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 35 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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 accorpata in una unità unica geotecnica.

La formazione gessoso solfifera (unità geologica denominata gs) nell'area è prevalentemente pelitica e quindi viene accorpata all'unità geotecnica Pa.

- **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).

## 5.2 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE

### 5.2.1 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.

### 5.2.2 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  $N_{SPT}$  con la seguente legge:

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

essendo:

$A, B$  = costanti empiriche indicate in tabella seguente

$\sigma'_{vo}$  = pressione verticale efficace alla quota della prova SPT ( $\text{kg/cm}^2$ );

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

$D_r$  = densità relativa (-).

**Tabella 13 - 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:

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 37 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

$D_R$  = densità relativa (-).

$\sigma_{vo}'$  = pressione verticale efficace in sito alla quota della prova SPT (kg/cm<sup>2</sup>);

$N_{SPT}$  = 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:

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

### 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 ( $\phi'$ ) 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:

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

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

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

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

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  $\phi'$  è stato determinato in accordo al metodo proposto da Bolton (1986):

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

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

essendo:

$\phi'$  = 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;

## 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 GE000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 38 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	--------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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

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

$Dr$  = densità relativa (-).

**Tabella 14 - 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
$\sigma_2'$ = tensione principale efficace intermedia	
$\sigma_3'$ = tensione principale efficace minore	

I valori dell'angolo di attrito  $\phi_{cv}'$  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  $\phi_{cv}'$  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 15 - Valori dell'angolo di attrito  $\phi_{cv}'$  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	$\phi_{cv}' = 33^\circ$	$\phi_{cv}' = 30^\circ$

Dalle prove CPT, la resistenza al taglio per depositi incoerenti può essere stimata dalla correlazione di Dorgunoglu & Mitchell 1975 in funzione della resistenza penetrometrica e della tensione efficace in sito.

### 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:

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

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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 39 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale del terreno in assunto pari a 19 kN/m<sup>3</sup>;

$\nu$  = coefficiente di Poisson del terreno (assunto pari a 0.3);

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

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

### Correlazione di Ohta e Goto (1978)

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

essendo:

$C = 53.3$ ;

$z$  = profondità dal p.c. in metri;

$f_A$  = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedasi la Tabella 16);

$f_G$  = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedasi la Tabella 17).

**Tabella 16 - Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente  $f_A$  (funzione dell'epoca geologica del deposito)**

$f_A$	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

**Tabella 17 - 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;

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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 40 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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 ( $E_{op}' = E_0/10$ ).

### 5.2.3 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.

#### 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

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	41 di 162

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):

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

Dove:

$E'v$  = modulo di deformazione operativo (kPa)

$cu$  = 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  $N_{SPT}$ .

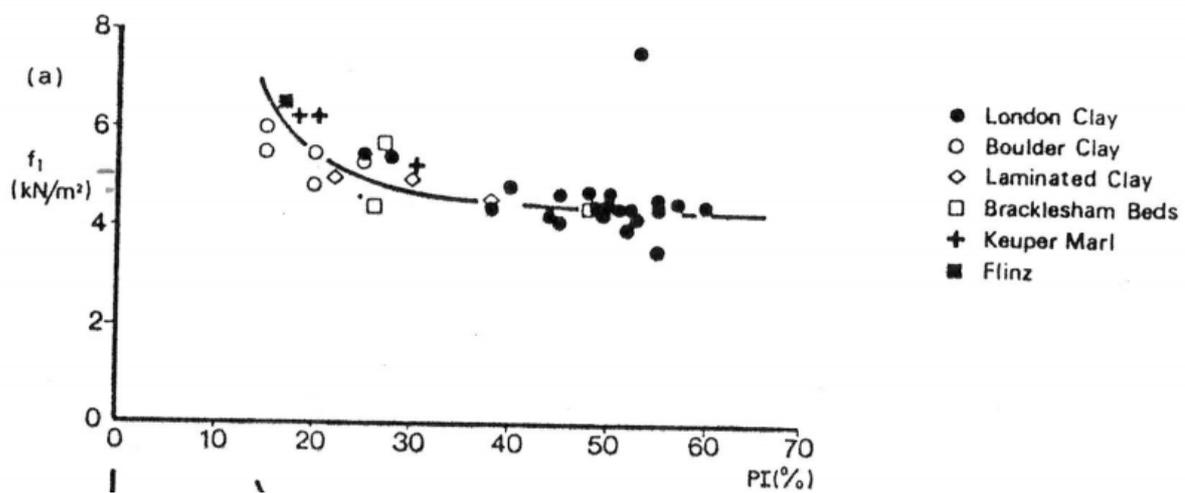


Figura 1 – Fattore  $f1$  in funzione di IP

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:

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

essendo:

$cu$  = 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)  $E_u = k \cdot cu$ ; 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 42 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

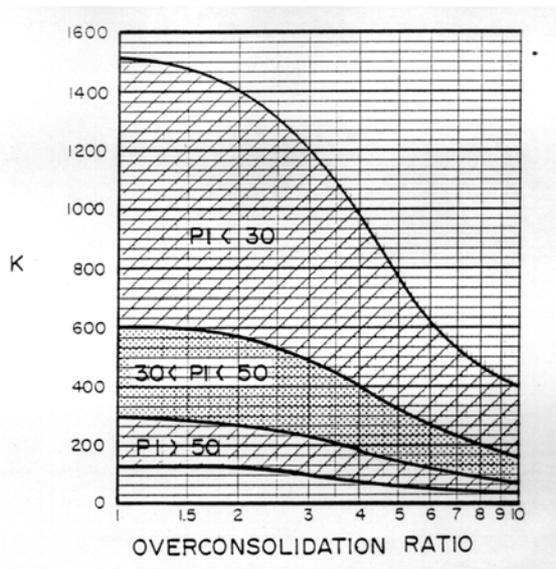


Figura 2 – Duncan & Buchigani

### 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 ( $w_n$ ).

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 43 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

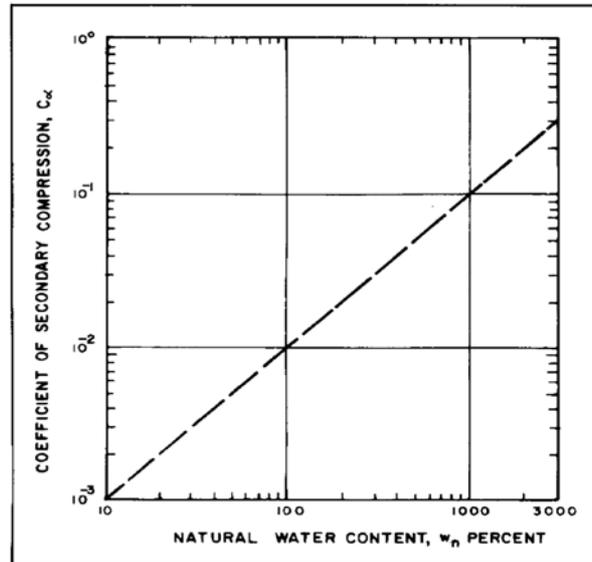


Figura 3 – Abaco di calcolo del coefficiente di consolidazione secondaria da  $w_n$  (NAVFAC, 1982)

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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 44 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### 5.3 DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ EC<sub>LA</sub>

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 2016. Al momento della stesura del presente elaborato si ha a disposizione una sola lettura inclinometrica.

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/m<sup>3</sup> (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
$\phi' = 17 \div 36$ °	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 14 sono inseriti i risultati di tutte le prove di laboratorio (valori di picco e residui) ed i valori di progetto di picco:

$\phi' = 24 \div 27$ °	angolo di resistenza al taglio
$c' = 5 \div 15$ 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 45 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

e in condizioni residue:

$$\phi_r' = 19\div 21^\circ$$
$$c_r' = 0 \text{ kPa}$$

angolo di resistenza al taglio residuo  
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:

$$\phi_r' \approx 14^\circ$$
$$c_r' = 0 \text{ kPa}$$

angolo di resistenza al taglio residuo  
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).

**5.4 DEPOSITI ELUVIO COLLUVIALI SABBIOSI – UNITÀ  $EC_{L5}$** 

Si tratta della componente incoerente dei depositi eluvio colluviali, costituita prevalentemente da sabbia limosa con clasti derivanti dalla disgregazione del substrato roccioso.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori compresi fra 40 e 52 colpi/30 cm (Figura 4).

La densità relativa stimata dalle prove SPT è compresa fra 70 e 87% (Figura 17).

Nell'unità geotecnica in esame è stato prelevato un campione indisturbato su cui sono state eseguite prove di laboratorio.

Il peso di volume naturale è circa  $19.0 \text{ kN/m}^3$  (Figura 5).

Dall'analisi granulometrica si ha (Figura 7).

- percentuale di ghiaia pari a 0%;
- percentuale di sabbia pari a 55%;
- percentuale di fine (limo+argilla) pari a 45%.

**Parametri di resistenza:**

Dalla prova a taglio diretto eseguita sull'unità in esame si ottengono i seguenti valori:

$$c' = 12 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 46 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

$\phi' = 32^\circ$       angolo di resistenza al taglio

Dall'interpretazione dei risultati delle prove SPT sull'unità Ecls si ottengono valori dell'angolo di resistenza al taglio maggiori di  $38^\circ$  (Figura 18). Cautelativamente in progetto si assume un range:

$\phi' = 30 \div 34^\circ$       angolo di resistenza al taglio,

associato a coesione nulla ( $c' = 0$  kPa).

Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame si stima un modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 250 e 400 MPa (Figura 19).

## **5.5 DEPOSITI ALLUVIONALI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ A<sub>LA</sub>**

Si tratta di depositi alluvionali a componente limo argillosa.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori generalmente compresi fra 9 e 30 colpi/30 cm (Figura 20) con sporadici valori maggiori di 50.

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 fra 18.5 e 20.0 kN/m<sup>3</sup> (media 19) (Figura 21).

Dalle analisi granulometriche si ha (Figura 22).

- percentuale di ghiaia generalmente bassa compresa fra 0 e 10% (media 3%);
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 2 e 48% (media 20%);
- percentuale di fine (limo+argilla) generalmente maggiore del 60% 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 24).

Il limite liquido è compreso fra 18 e 55%, il limite plastico tra 14 e 28%, l'indice plastico fra 15 e 35% (Figura 24). Nella Carta di Plasticità di Casagrande (Figura 25) il materiale si colloca nella zona delle argille a medio-alta plasticità.

Parametri di resistenza:

Dalle analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza (Figura 26, Figura 27, Figura 28 e Figura 29):

$c' = 15 \div 30$  kPa      coesione drenata  
 $\phi' = 21 \div 35^\circ$       angolo di resistenza al taglio  
 $c_u = 60 - 137$  kPa      resistenza al taglio in condizioni non drenate

In laboratorio sull'unità sono disponibili anche i risultati di prove di resistenza al taglio in condizioni residue, che però hanno fornito valori dell'angolo di resistenza al taglio praticamente uguali ai valori di picco; data la scarsa attendibilità dei risultati, non

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 47 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

vengono considerati.

E' inserito in figura anche un valore singolare con coesione drenata di 117 kPa associato ad angolo di resistenza al taglio di 11° (sondaggio X1), molto probabilmente dovuto a condizioni di prova non correttamente impostate.

Nella Figura 29 sono inseriti anche i valori di resistenza al taglio non drenata derivanti dalle prove di Pocket Penetrometer e dall'interpretazione delle prove SPT; da cui si osservano valori compresi tra 50 e 200 kPa.

Cautelativamente in progetto si assumono i seguenti valori dei parametri di resistenza:

$$\begin{array}{ll} \phi' = 24 \div 26^\circ & \text{angolo di resistenza al taglio} \\ c' = 0 \div 5 \text{ kPa} & \text{coesione drenata} \end{array}$$

Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame non si hanno a disposizione indagini sismiche, quindi le caratteristiche di deformazione sono state stimate dalle correlazioni in base alle prove SPT. Da cui si stimano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 70 e 250 MPa (Figura 31), in linea con i valori stimati dalle prove CPT eseguite in corrispondenza dell'unità (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Permeabilità:

In corrispondenza dell'unità è disponibile una prova di permeabilità in sito che ha dato un valore di permeabilità, pari a 9.90E-11 m/s.

## 5.6 DEPOSITI ALLUVIONALI SABBIOSI - UNITÀ A<sub>5</sub>

Si tratta di depositi alluvionali costituiti da sabbie e sabbie debolmente limose, sono state intercettate solo localmente in lenti di ridotto spessore (1-2 m) intercalati ai depositi grossolani (unità Ag) che predominano in corrispondenza degli attraversamenti di fossi/fiumi.

Quindi in corrispondenza di questa unità sono disponibili poche prove SPT che hanno dato valori compresi fra 13 e 64 colpi/30 cm (Figura 32).

La densità relativa stimata dalle prove SPT è compresa fra 40 e 90% (Figura 33).

Nell'unità geotecnica in esame non sono stati prelevati campioni.

Parametri di resistenza:

Dall'interpretazione dei risultati delle prove SPT sull'unità, si stimano valori dell'angolo di resistenza al taglio compresi fra 33 e 41° (Figura 34). Cautelativamente, per l'angolo di resistenza al taglio, si assume un range:

$$\phi' = 34-38^\circ,$$

associato a coesione drenata nulla ( $c' = 0$  kPa).

Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame non si hanno a disposizione indagini sismiche, quindi le caratteristiche

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 48 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

di deformazione sono state stimate dalle correlazioni in base alle prove SPT. Da cui si stimano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 200 e 350 MPa (Figura 35).

## 5.7 DEPOSITI ALLUVIONALI GHIAIOSO SABBIOSI – UNITÀ A<sub>G</sub>

Si tratta di depositi alluvionali costituiti da ghiaie eterometriche ed eterogenee in matrice sabbiosa.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori compresi fra 28 e 85 colpi/30 cm (Figura 36).

La densità relativa stimata dalle prove SPT è compresa fra 55 e 90% (Figura 37).

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

Dall'analisi granulometrica si ha (Figura 38).

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 4 e 70% (media 45%);
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 7 e 30% (media 23%);
- percentuale di fine (limo+argilla) generalmente maggiore del 20% con percentuale di limo compresa fra 5 e 33% e percentuale di argilla compresa fra 0 e 36%.

### Parametri di resistenza:

Dall'interpretazione dei risultati delle prove SPT si stimano valori dell'angolo di resistenza al taglio compresi nel range (Figura 39):

$$\varphi' = 38\div 42^\circ,$$

con coesione nulla ( $c' = 0$  kPa).

### Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame non si hanno a disposizione indagini sismiche, quindi le caratteristiche di deformazione sono state stimate dalle correlazioni in base alle prove SPT. Da cui si stimano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 200 e 600 MPa (Figura 40).

## 5.8 DEPOSITI ALLUVIONALI TERRAZZATI LIMOSO ARGILLOSI – UNITÀ A<sub>T</sub>E

Si tratta di depositi alluvionali a componente limo argilloso che si presentano moderatamente consistenti.

In corrispondenza di questa unità sono disponibili prove SPT che hanno dato valori generalmente compresi fra 10 e 30 colpi/30 cm (Figura 20).

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 20.0 kN/m<sup>3</sup> (Figura 21).

### Parametri di resistenza:

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 49 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Nella Figura 29 sono inseriti anche i valori di resistenza al taglio non drenata derivanti dalle prove di Pocket Penetrometer e dall'interpretazione delle prove SPT; da cui si osservano valori compresi tra 50 e 200 kPa.

Cautelativamente in progetto si assumono i seguenti valori dei parametri di resistenza:

$$\phi' = 24\div 26^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio}$$
$$c' = 0\div 5 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$

Parametri di deformabilità:

Per l'unità in esame non si hanno a disposizione indagini sismiche, quindi le caratteristiche di deformazione sono state stimate dalle correlazioni in base alle prove SPT. Da cui si stimano valori del modulo elastico di deformazione iniziale compresi fra 70 e 250 MPa (Figura 31).

## 5.9 DEPOSITI DI ALTERAZIONE DEL SUBSTRATO – UNITÀ SALT

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 41), 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/m<sup>3</sup> (Figura 42).

Dalle analisi granulometriche si ha (Figura 43).

- percentuale di ghiaia generalmente compresa fra 0 e 30% (media 3%);
- percentuale di sabbia generalmente compresa fra 1 e 50% (media 21%);
- 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 44).

Il limite liquido è compreso fra 35 e 54%, il limite plastico tra 18 e 24%, l'indice plastico fra 19 e 39% (Figura 44). Nella carta di plasticità di Casagrande il materiale si colloca nella zona delle argille inorganiche di media plasticità (Figura 45).

Parametri di resistenza:

Dalle analisi di laboratorio eseguite sui campioni prelevati si sono ottenuti i seguenti valori dei parametri di resistenza (Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50):

$$c' = 2\div 93 \text{ kPa} \quad \text{coesione drenata}$$
$$\phi' = 22\div 38^\circ \quad \text{angolo di resistenza al taglio}$$
$$c_u = 430 \text{ kPa} \quad \text{resistenza al taglio in condizioni non drenate}$$

Nella Figura 49 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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 50 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

valori molto dispersi tra 75 e maggiori di 700 kPa nei livelli più consistenti.

Nella Figura 50 sono riportati tutti i valori delle prove di laboratorio (parametri di picco e residui) confrontati con i valori assunti in progetto:

$$\begin{array}{ll} \phi' = 27 \div 30^\circ & \text{angolo di resistenza al taglio} \\ c' = 20 \text{ kPa} & \text{coesione drenata} \end{array}$$

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:

$$\begin{array}{ll} \phi_r' = 19^\circ & \text{angolo di resistenza al taglio residuo} \\ c_r' = 0 \text{ kPa} & \text{coesione drenata residua} \end{array}$$

Dalla Figura 50 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 51).

## 5.10 FORMAZIONE DI CAMERINO – UNITÀ PA / UNITÀ AP

### 5.10.1 Generalità e caratteristiche fisiche

All'interno della formazione di Camerino si sviluppa la maggior parte del tracciato di progetto. Da una attenta analisi dei sondaggi è stato determinando 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.

Al momento della stesura del presente elaborato, non sono ancora disponibili i risultati di tutte le 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 pari a  $A/P = 0.9 - 0.65$ ,  $A/P = 0.8$  come valore medio complessivo. Prevalde 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

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 51 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

motivi:

- le due componenti litologiche, Ap e Pa, 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 (Pa e Ap, Figura 53 e Figura 54); 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 Pa e Ap).

Pertanto, ai fini della caratterizzazione geotecnica di progetto, si è scelto di accorpate la formazione di Camerino in una 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<sup>3</sup> (Figura 52). Si adotta un range di progetto di 23.0÷23.5 kN/m<sup>3</sup>.

Dalle analisi granulometriche sull'unità Pa si ha (Figura 53).

- 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%.

Dalle analisi granulometriche sull'unità Ap si ha (Figura 54).

- 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.

### 5.10.2 Parametri di resistenza

Dalle analisi di laboratorio complessivamente disponibili si sono ottenuti i seguenti valori

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 52 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

dei parametri di resistenza mostrati in Figura 55, Figura 56, Figura 57:

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

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

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

I risultati sono sintetizzati nel grafico di Figura 58.

Nella stessa Figura 58 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 58).

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 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.

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 59):

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

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

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

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

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 53 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

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

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

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:

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

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

### 5.10.3 Parametri di deformabilità

In Figura 61 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 60).

In progetto si assume la seguente correlazione in funzione della profondità (graficata anch'essa in Figura 61):

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

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

### 5.10.4 Permeabilità

In corrispondenza dell'unità Pa sono disponibili prove di permeabilità Lefranc e Lugeon che hanno fornito valori compresi tra  $5.79 \cdot 10^{-9}$  e  $1.07 \cdot 10^{-8}$  m/s, mentre per l'unità Ap è disponibile solo una prova Lefranc che ha fornito un valore di permeabilità di  $1.10 \cdot 10^{-8}$  m/s.

### 5.11 FORMAZIONE DELLO SCHLIER – $S_{CH}$

Si tratta di alternanze di marne argillose, siltose e con intercalazioni di calcare detritico e calcarenifi. 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).

Al momento della stesura del presente elaborato, non sono ancora disponibili i risultati di tutte le 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

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 54 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	---------------	-----------	---------------------------

in laboratorio per la caratterizzazione di queste formazioni di base.

Il peso di volume naturale è compreso mediamente fra 22.0 e 24.0 kN/m<sup>3</sup> (Figura 62).

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 63).

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 59):

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

Dalle stratigrafie dei sondaggi 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 (vedasi Appendice E):  $GSI = 44 \div 84$  (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..

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 63):

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

Per tensioni  $\sigma_v' > 550$  kPa si assumono i seguenti parametri di resistenza (Figura 63):

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

In Figura 61 sono riportati i valori del modulo di deformazione elastico operativo  $E'_{operativo}$  ottenuti dalle varie prove, rappresentati insieme ai dati della formazione di Camerino (cfr. paragrafo 5.10.3. Si adotta una legge di progetto unica per le due unità come rappresentata in Figura 61:

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

In corrispondenza dell'unità in esame sono disponibili prove di permeabilità Lefranc e Lugeon che hanno fornito valori compresi tra 3.00 E-10 e 1.44E-08 m/s.



**QUADRILATERO**  
Merche Umbria S.p.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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 55 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 56 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

## 5.1.2 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Nel seguito si riassumono i parametri geotecnici di progetto per le varie unità geotecniche.

### Unità R - Terreno di riporto e coltre vegetale

$\gamma = 19.0 \div 20.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 27 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E_o = 200 \div 300 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità Ecla - Depositi eluvio colluviali limoso argillosi

$\gamma = 18.5 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 24 \div 27^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 5 \div 15 \text{ kPa}$	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)
$c_r' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata residua
$c_u = 50 \div 160 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E_o = 100 \div 400 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità Ecls - Depositi eluvio colluviali sabbiosi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 30 \div 34^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E_o = 250 \div 400 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità Ala - Depositi alluvionali limoso argillosi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 24 \div 26^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$c_u = 50 \div 100 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E_o = 70 \div 250 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità As - Depositi alluvionali sabbiosi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 34 \div 38^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E_o = 200 \div 350 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità Ag - Depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\phi' = 38 \div 42^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E_o = 200 \div 600 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità Ate - Depositi alluvionali terrazzati limoso argillosi

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
--------------------------------	-------------------------

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 57 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

$\phi' = 24 \div 26^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$c_u = 50 \div 200 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E_o = 70 \div 250 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

**Unità Salt – Substrato alterato argilloso limoso**

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

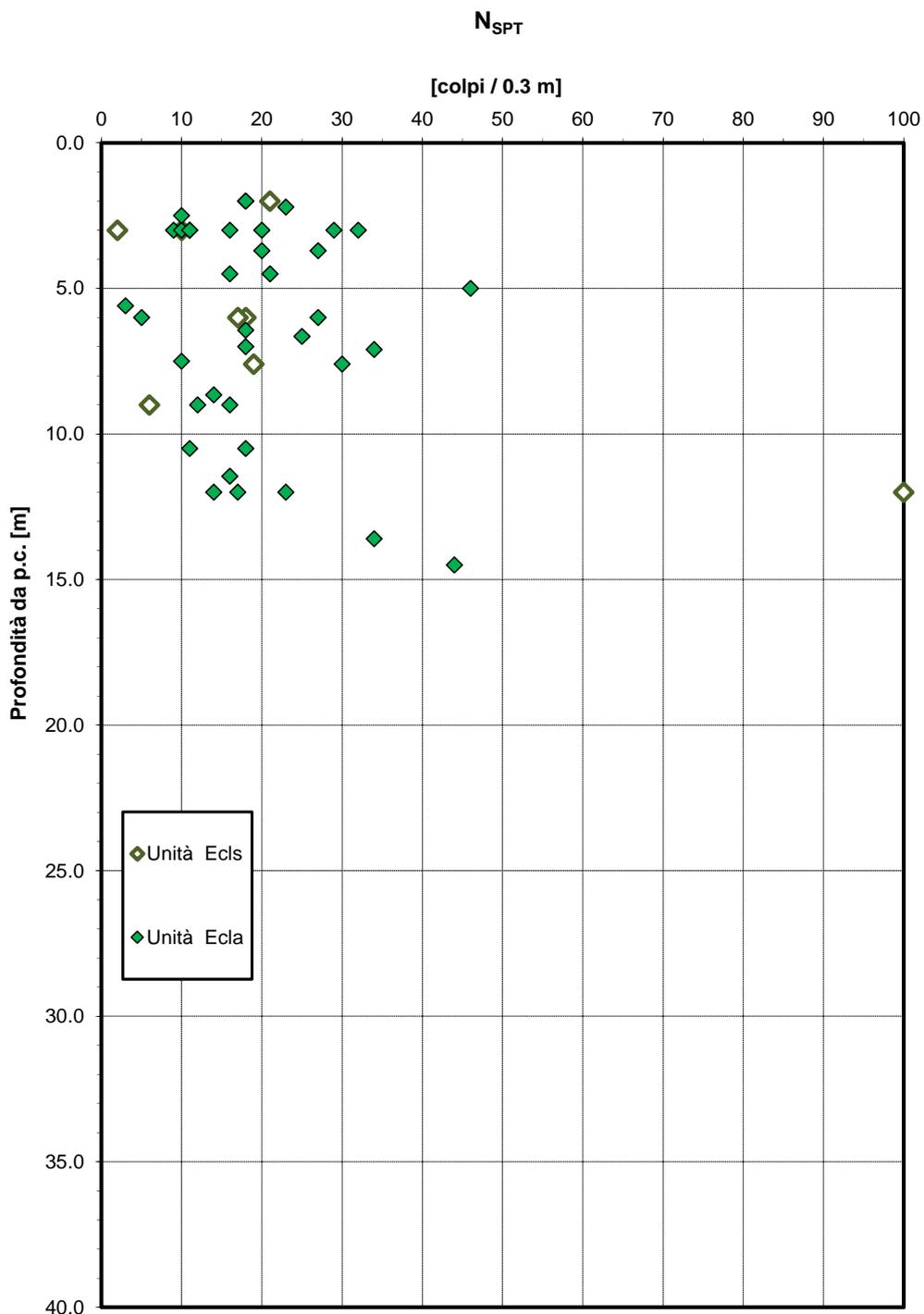
**Unità Pa – Substrato pelitico arenaceo / Unità Ap – substrato arenaceo pelitico**

$\gamma = 23.0 \div 23.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
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
$E'_{op} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa}$ per $z < 40 \text{ m}$ operativo	modulo di deformazione elastico
$E'_{op} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa}$ per $z > 40 \text{ m}$	

**Unità Sch – Formazione dello Schlier**

$\gamma = 23.0 \div 24.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
per tensioni $\sigma_v' < 550 \text{ kPa}$ :	
$\phi' = 26 \div 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 50 \div 60 \text{ kPa}$	coesione drenata
per tensioni $\sigma_v' > 550 \text{ kPa}$ :	
$\phi' = 25 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 220 \div 250 \text{ kPa}$	coesione drenata
$E'_{operativo} = 20 + 5.75 \cdot z \text{ MPa}$ per $z < 40 \text{ m}$ operativo	modulo di deformazione elastico
$E'_{operativo} = 250 + 0.8 \cdot z \text{ MPa}$ per $z > 40 \text{ m}$ .	

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 58 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Figura 4 – Valori di  $N_{SPT}$  – Unità Ecla e 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 59 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Peso di volume

$\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>]

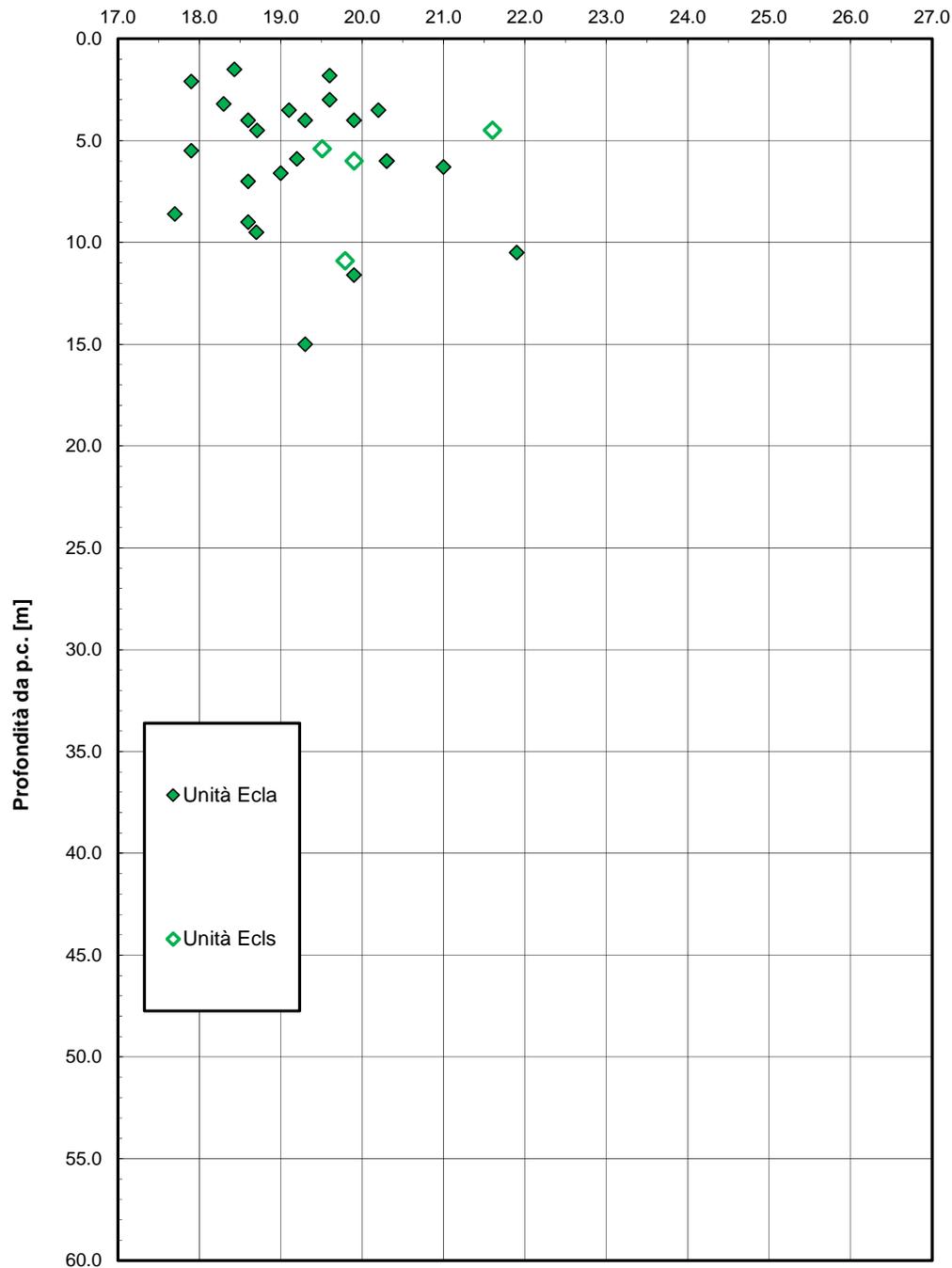


Figura 5 – Peso di volume naturale – Unità Ecla e Ecls

## 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	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	60 di 162

### Granulometria unità Ecla

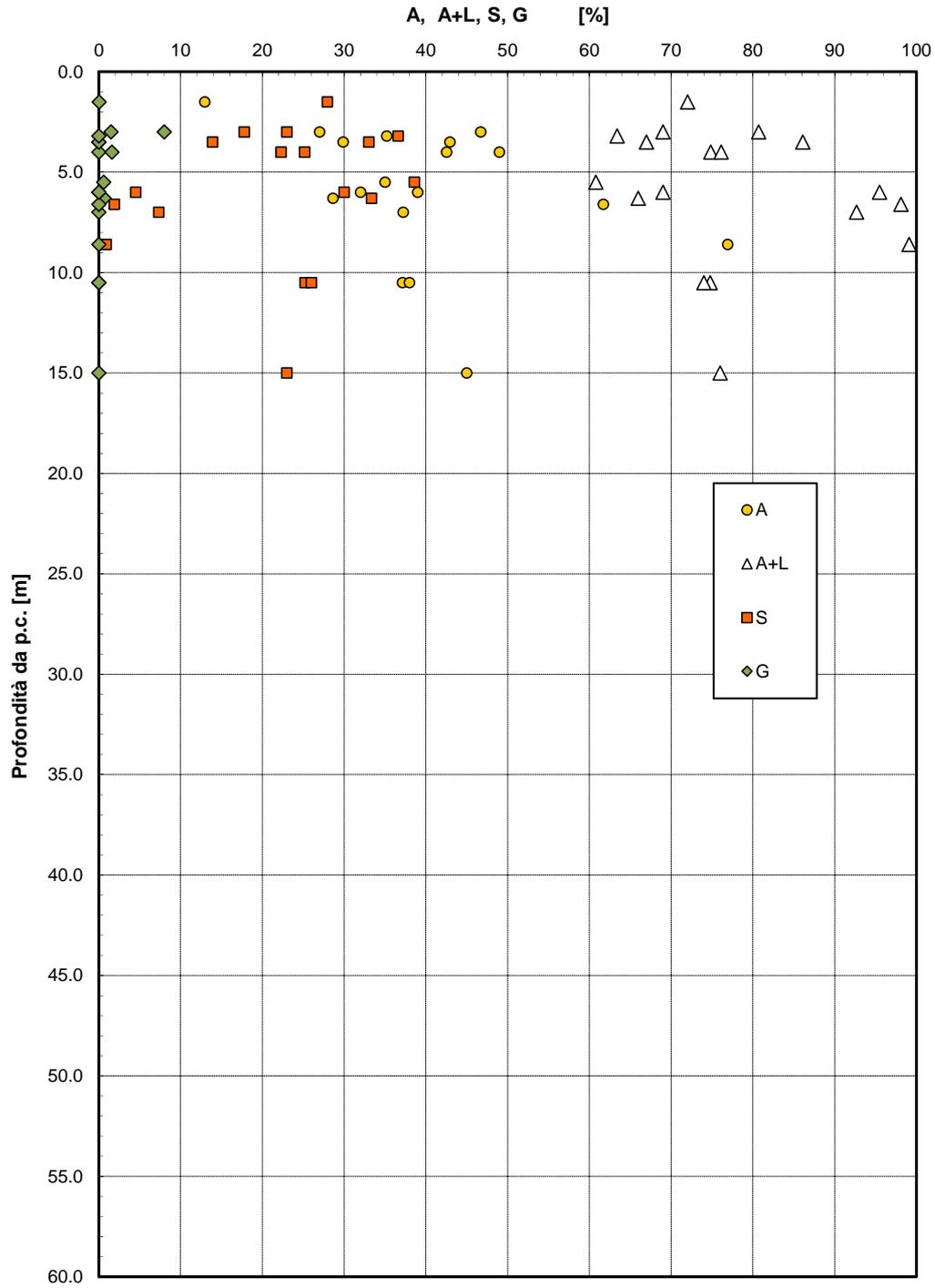


Figura 6 – Analisi granulometrica – Unità Ecla

## 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	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	61 di 162

### Granulometria unità Ecls

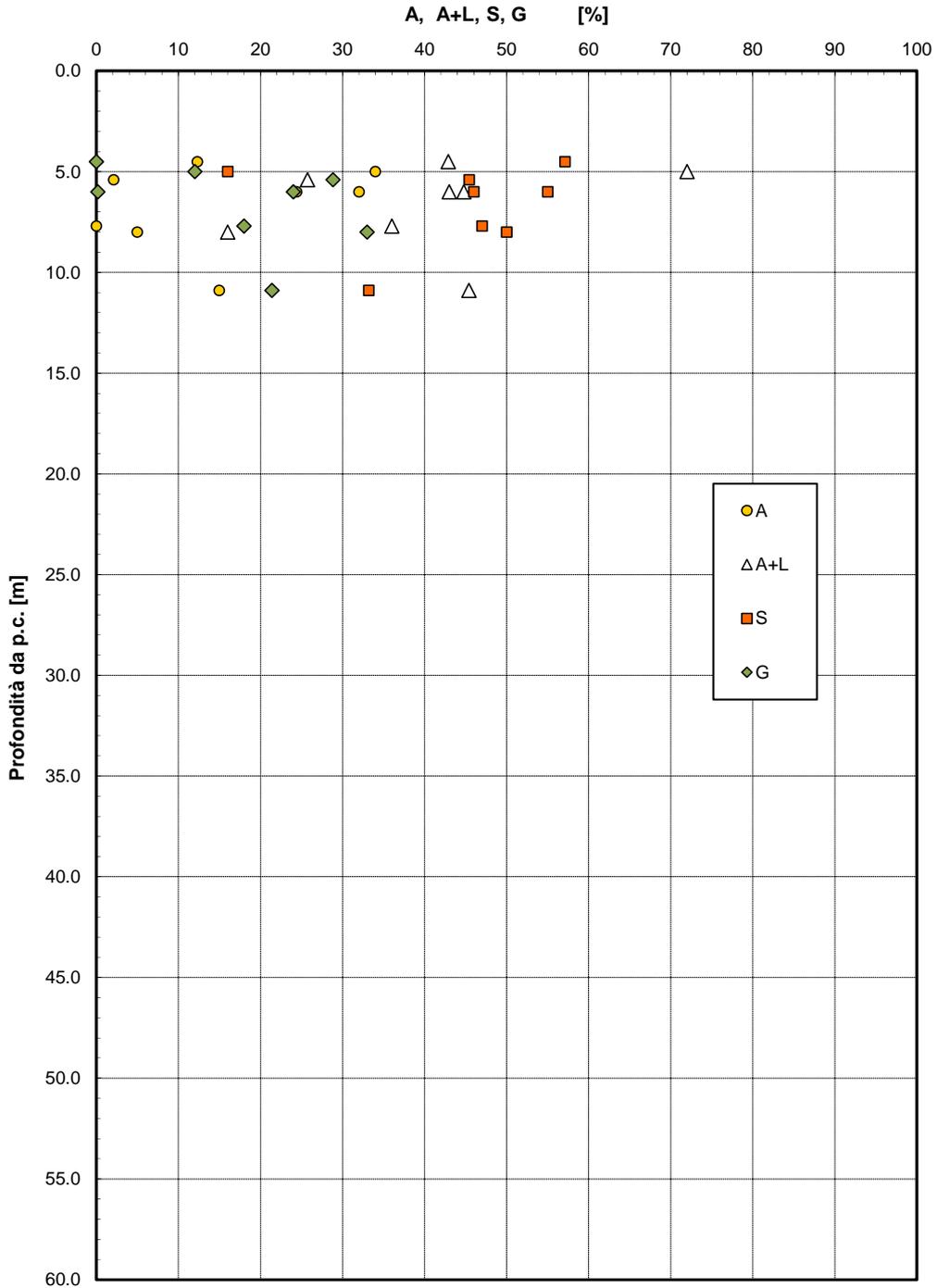
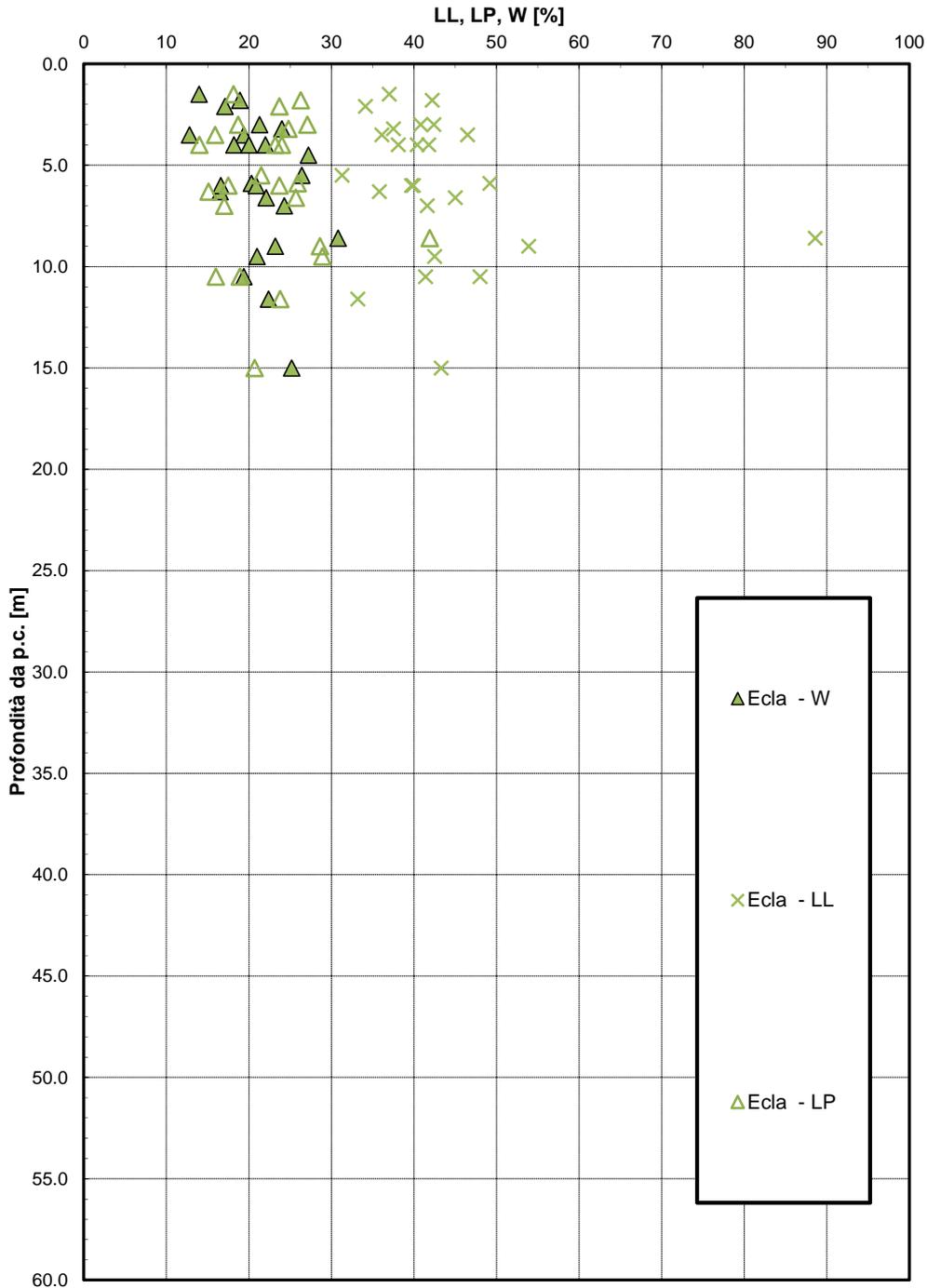


Figura 7 – Analisi granulometrica – Unità Ecls

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000		02	A	62 di 162

**Limiti di Atterberg e contenuto naturale d'acqua**



**Figura 8 – Limiti di Atterberg – Unità Ecla**

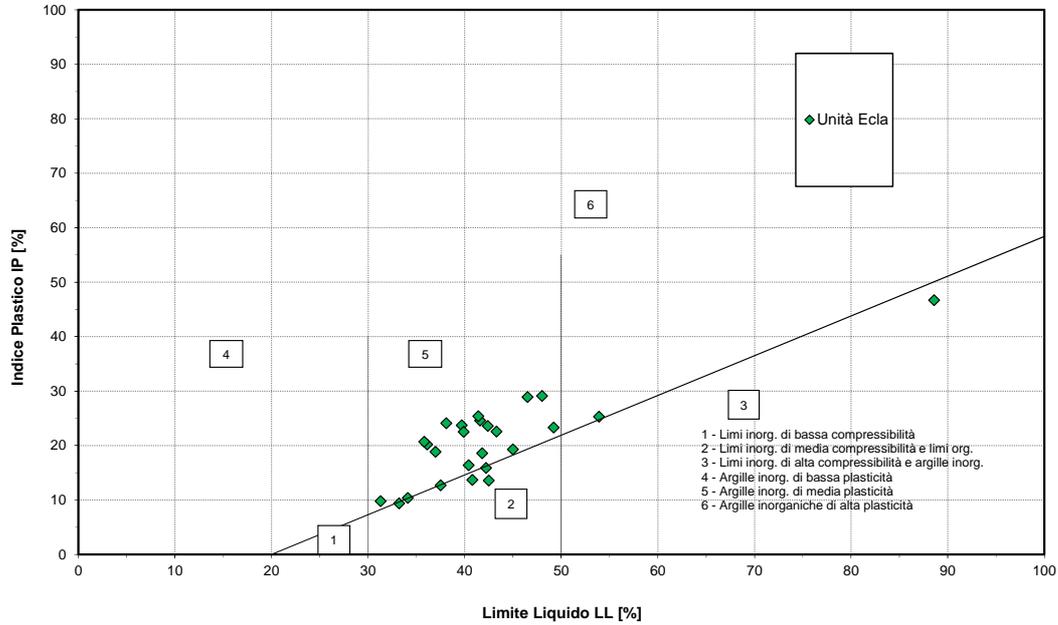
## 2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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

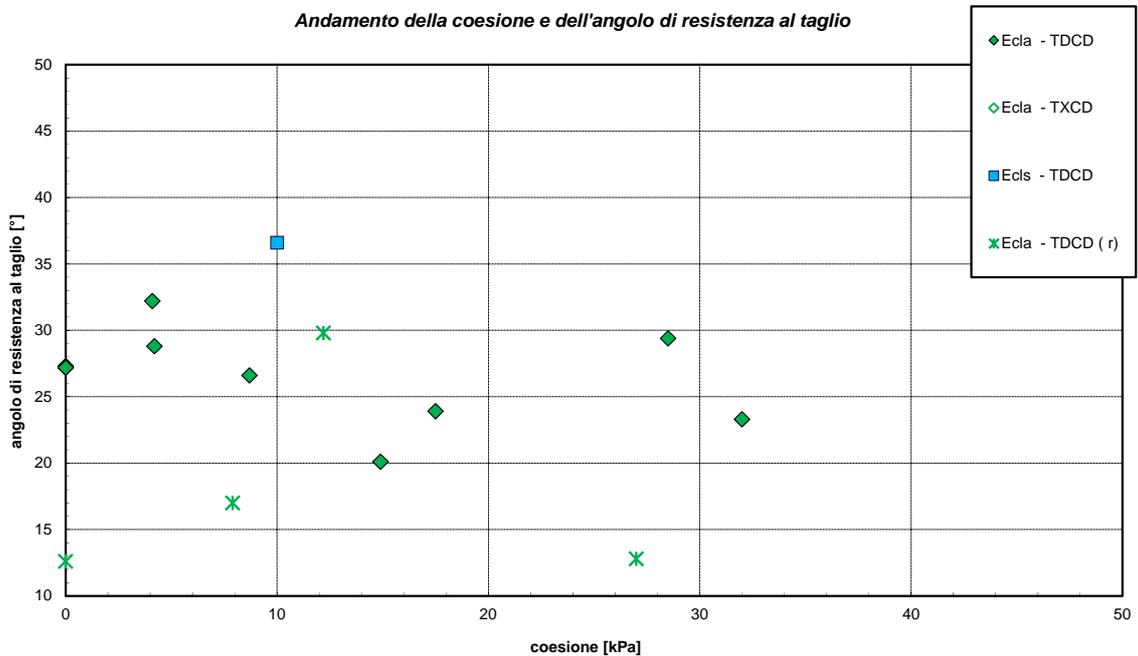
Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	63 di 162

*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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 64 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Andamento della coesione con la profondità

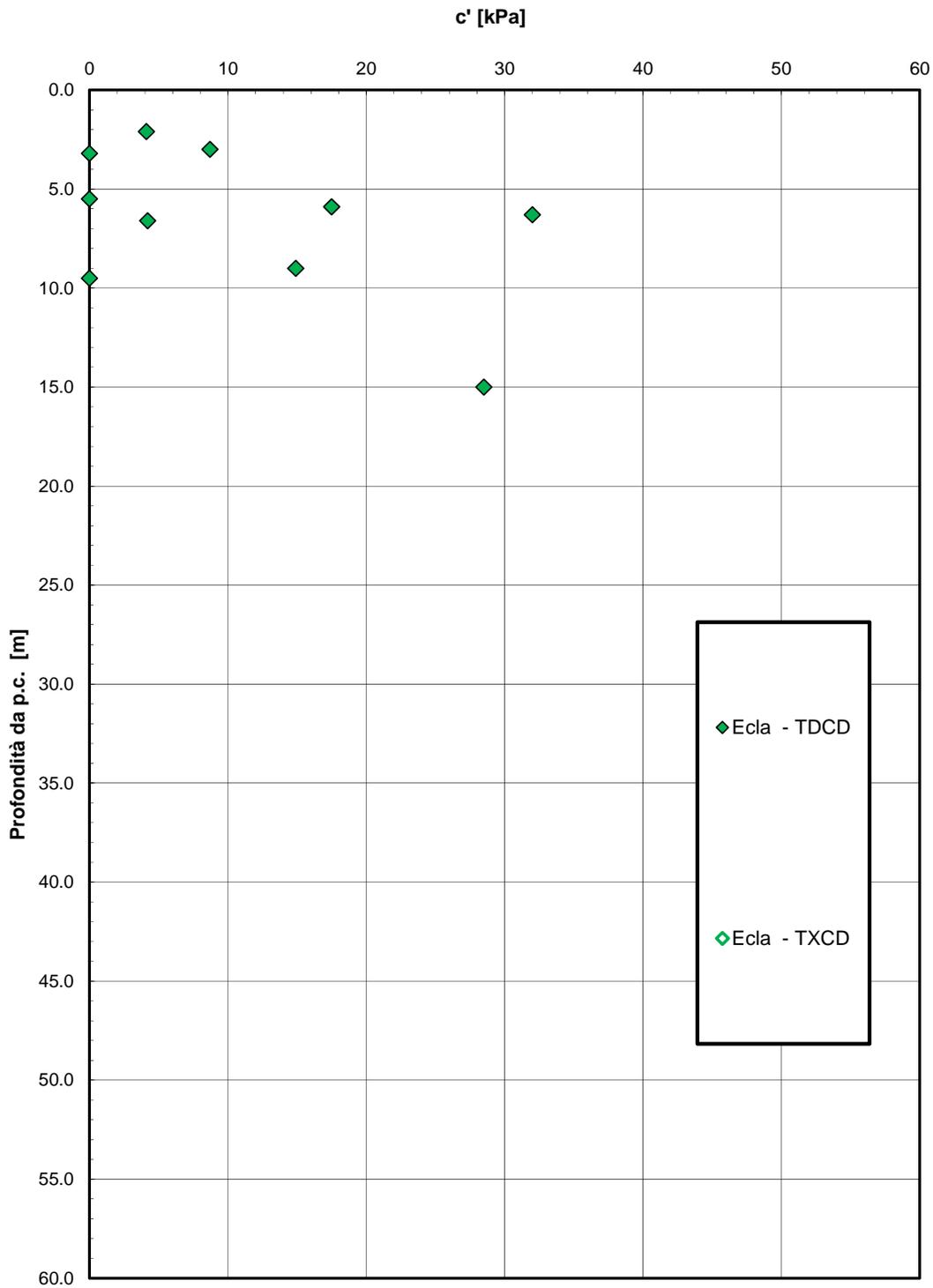


Figura 11 – Andamento della coesione con la profondità – Unità Ecla

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 65 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

Andamento della resistenza al taglio con la profondità

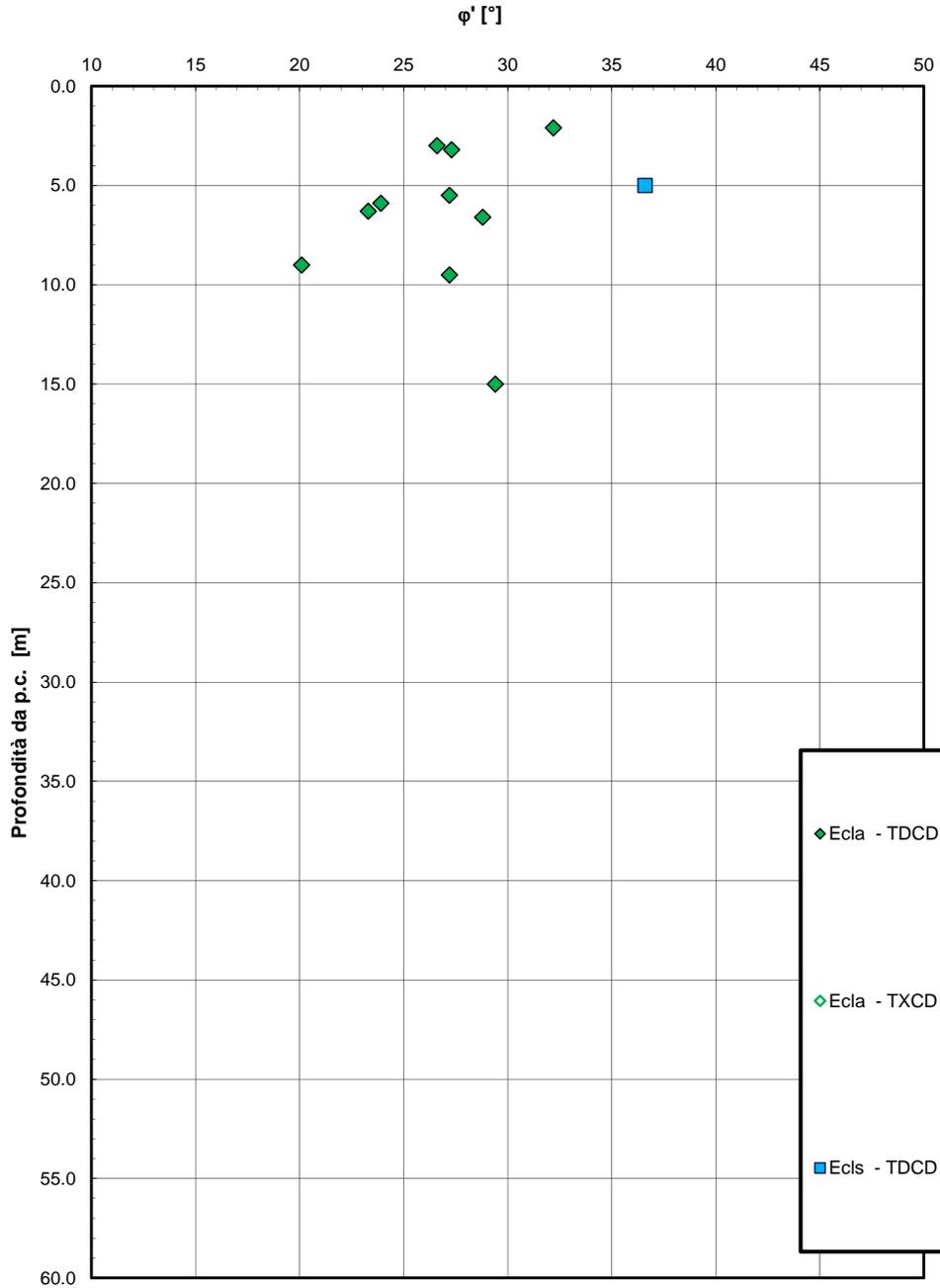


Figura 12 – Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Ecla

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 66 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

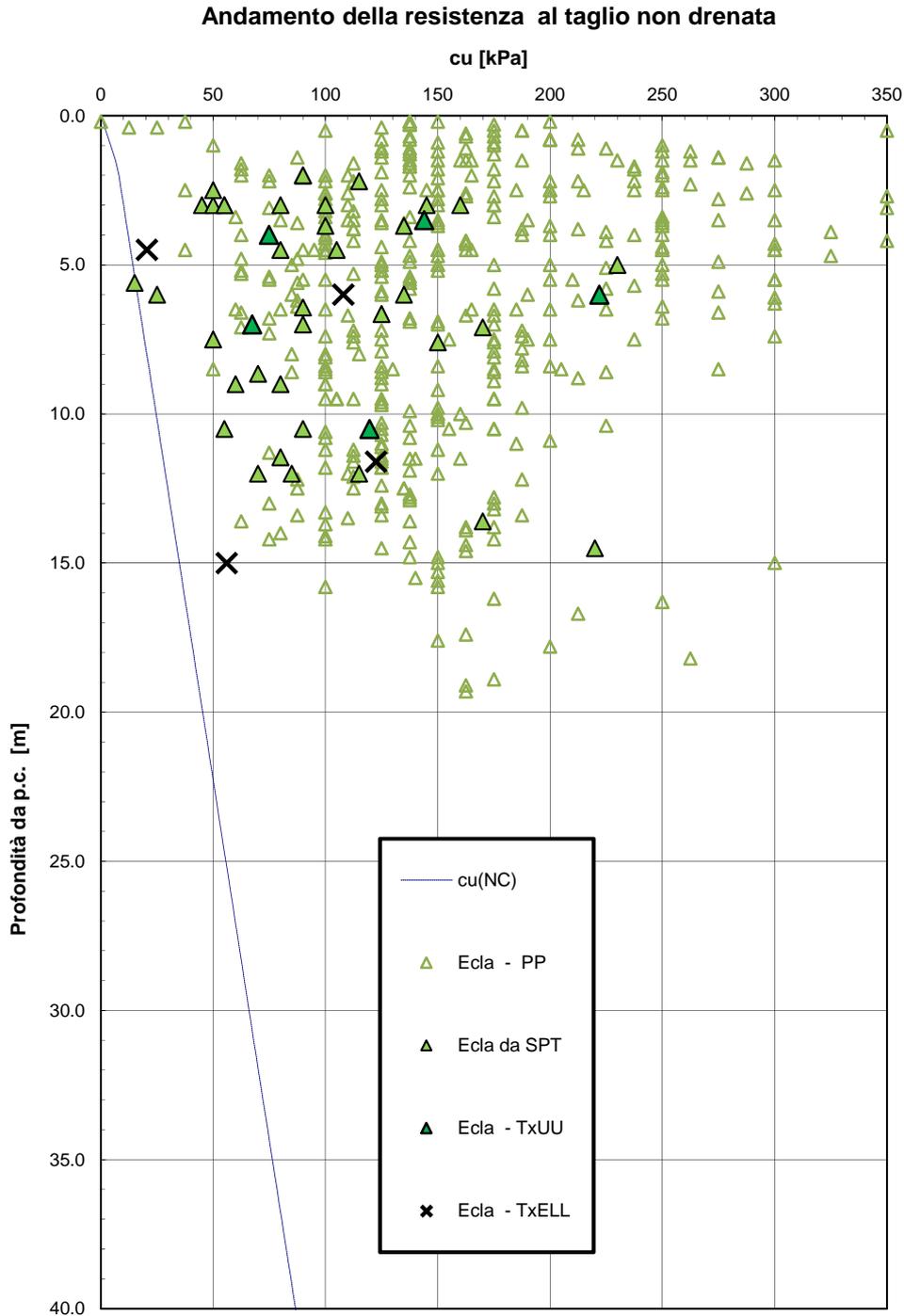


Figura 13 – Resistenza al taglio non drenata – Unità Ecla

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 67 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

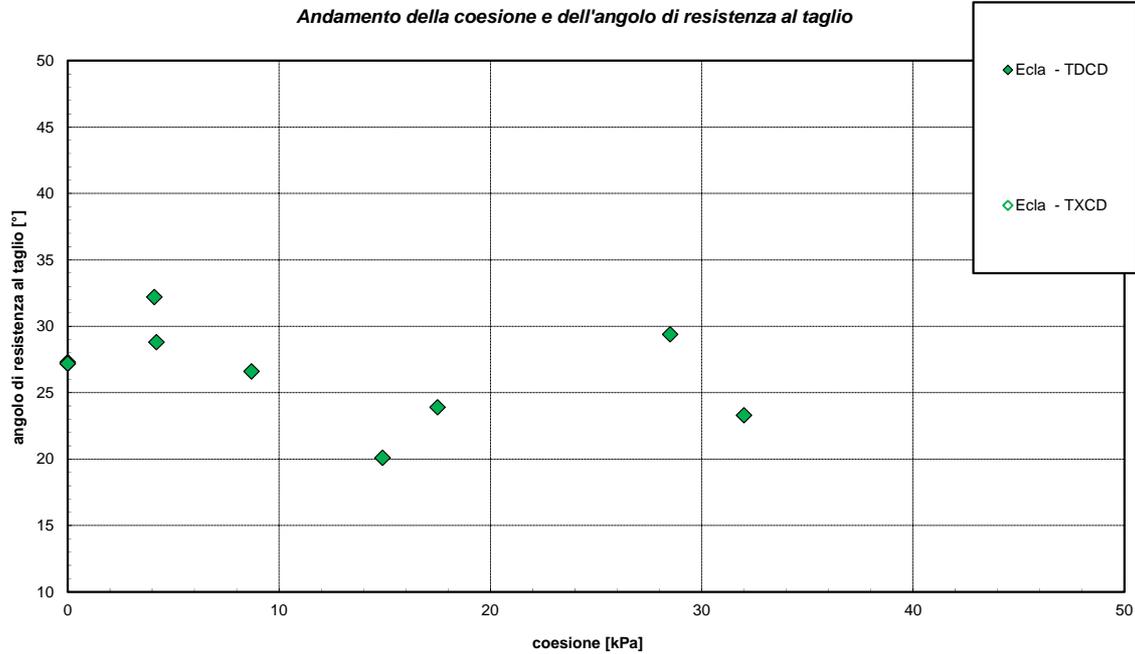


Figura 14 - Parametri di resistenza coltri eluvio colluviali coesive – unità Ecla

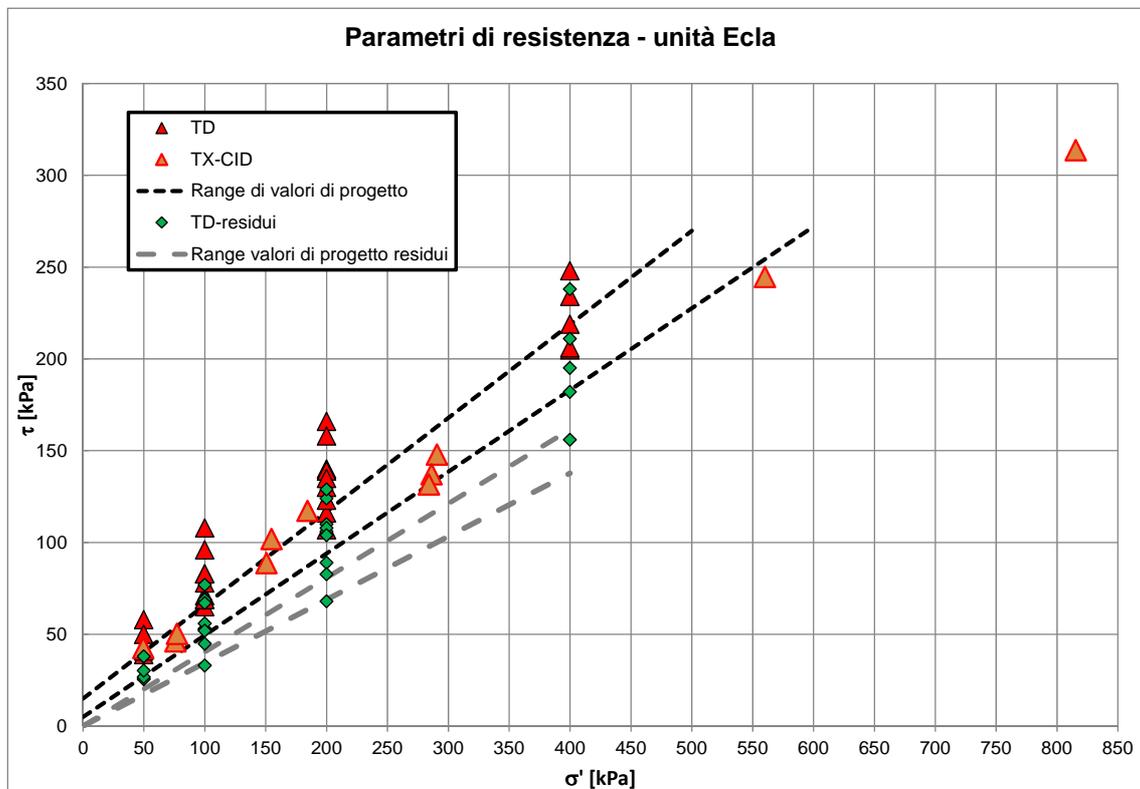


Figura 15 - Parametri di resistenza coltri eluvio colluviali coesive – unità Ecla (dal lotto 2 – per confronto)

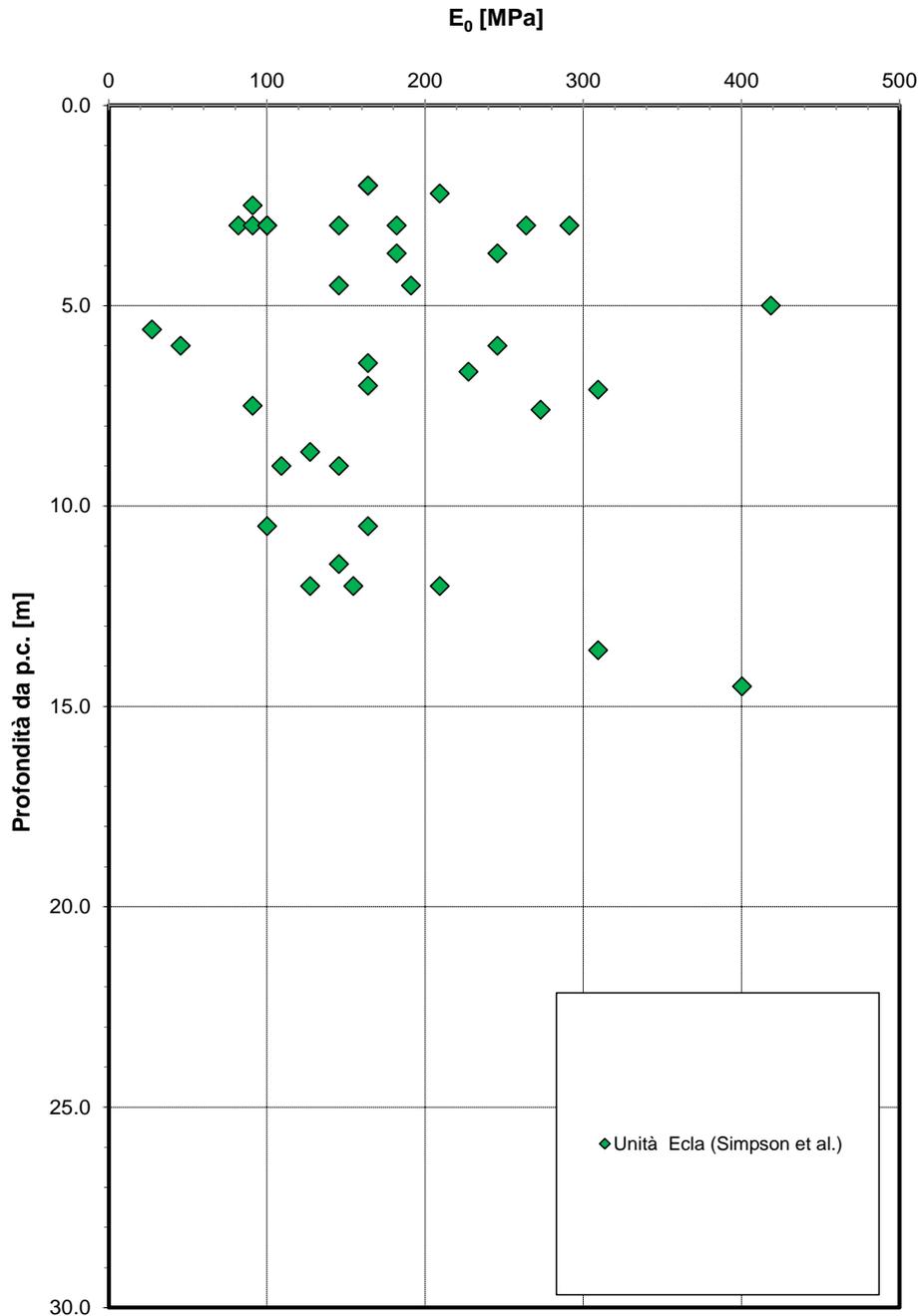
**2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE**

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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

Opera	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	68 di 162

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 69 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Densità relativa da prove SPT

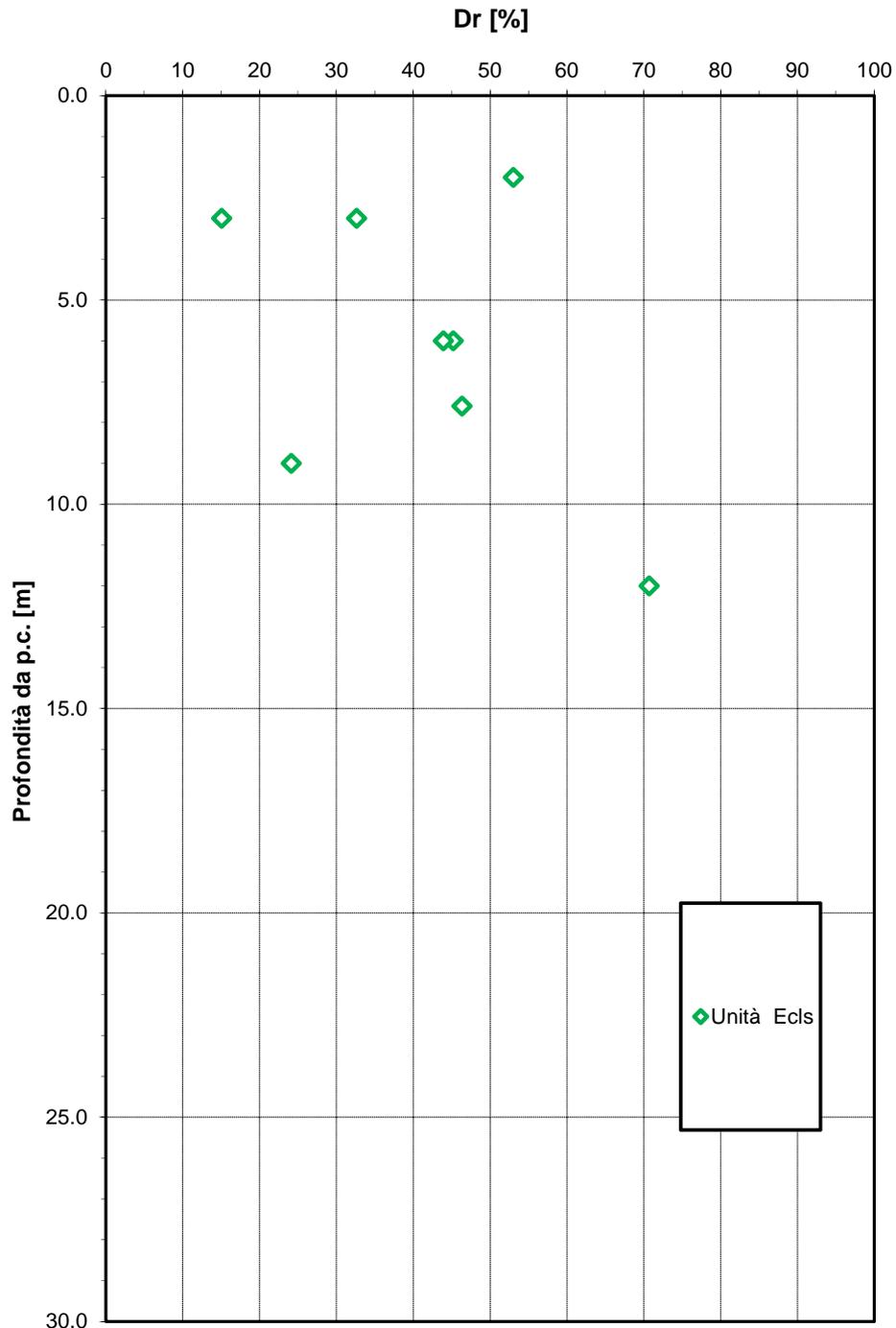


Figura 17 – Densità relativa da prove SPT – Unità Ecls

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 70 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Angolo di resistenza al taglio da prove SPT

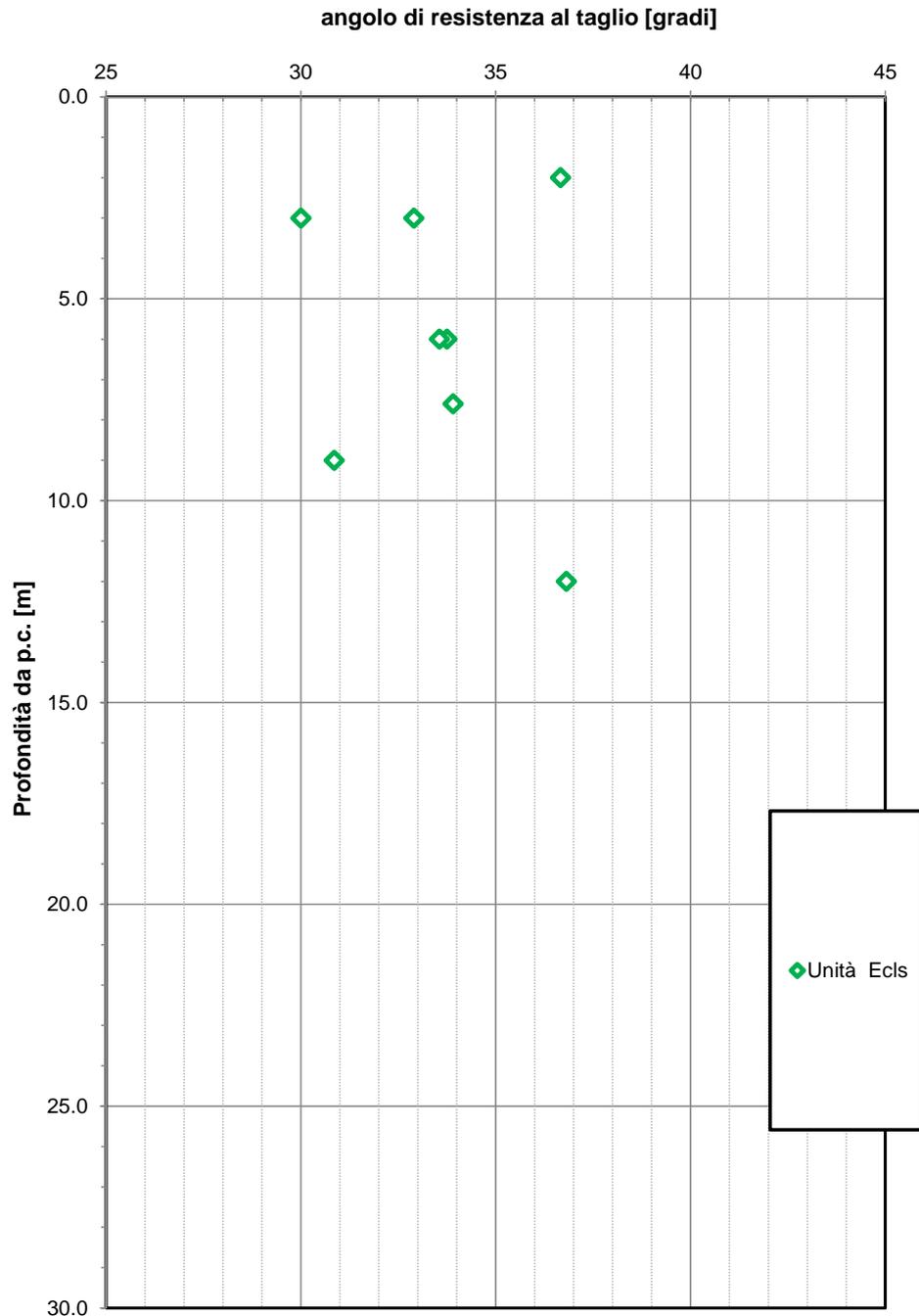
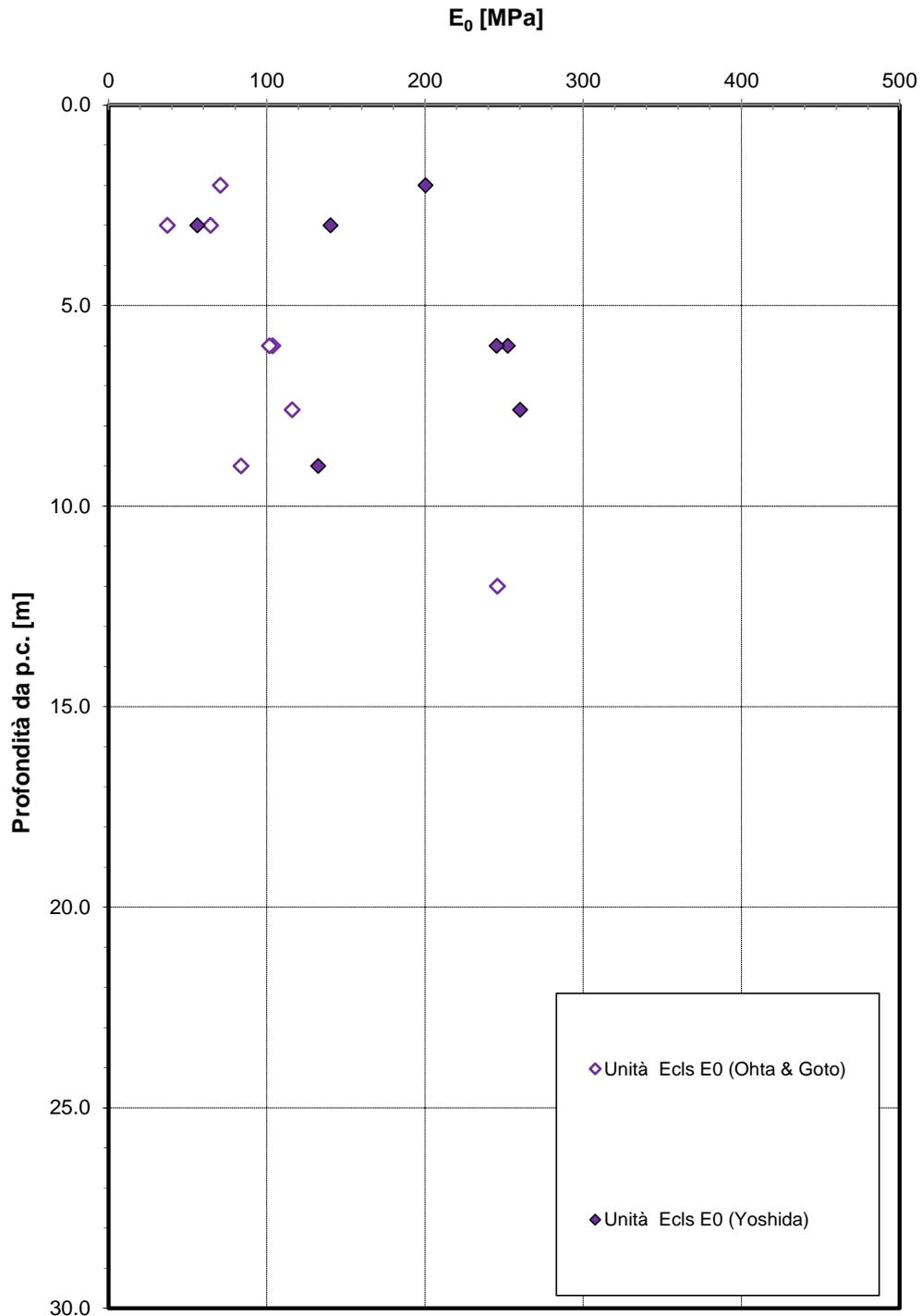


Figura 18 – Angolo di resistenza al taglio da prove SPT – Unità Ecls

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 71 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT**



**Figura 19 - Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 72 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

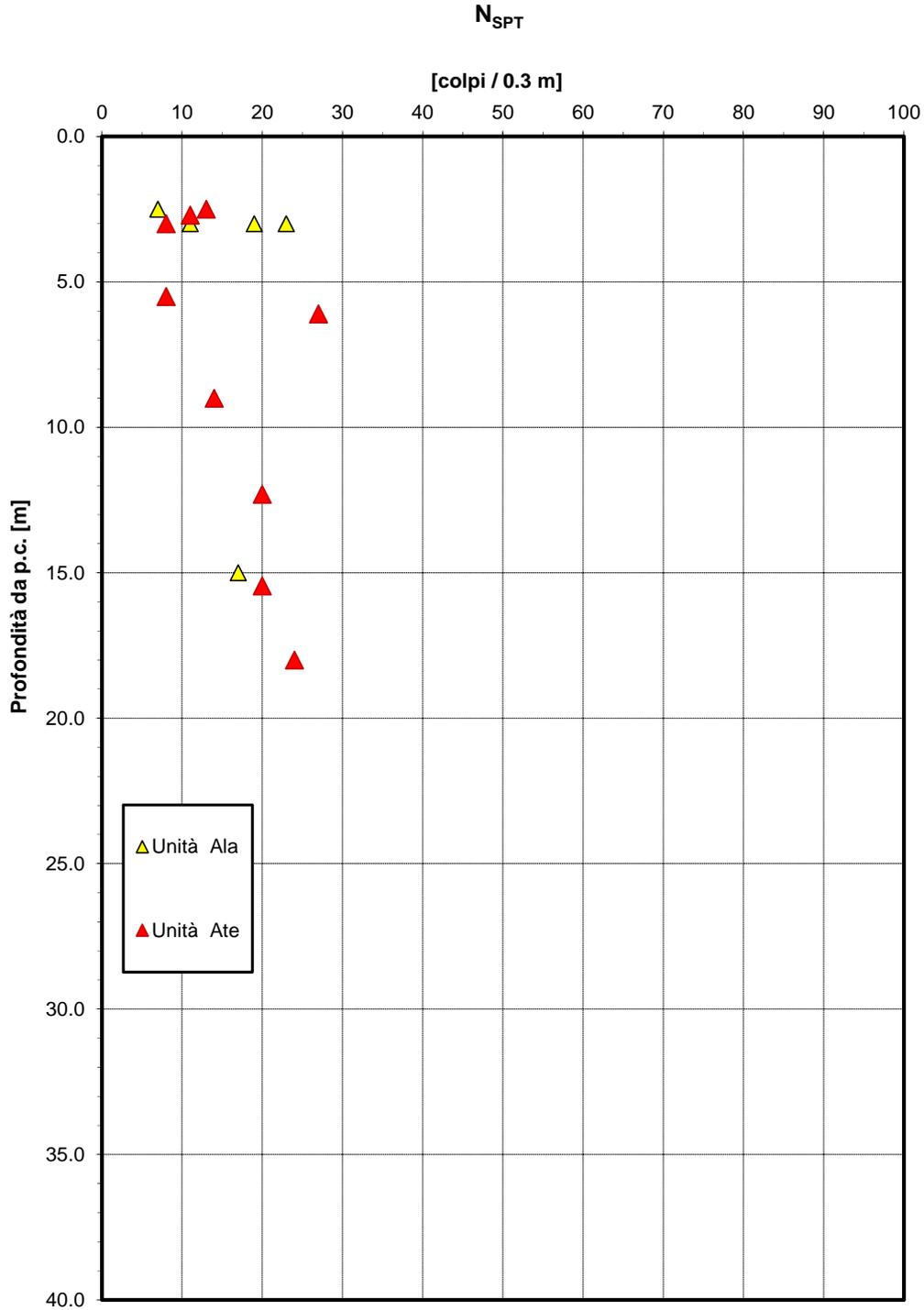


Figura 20 – Valori di N<sub>SPT</sub> – Unità Ala e unità Ate

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 73 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

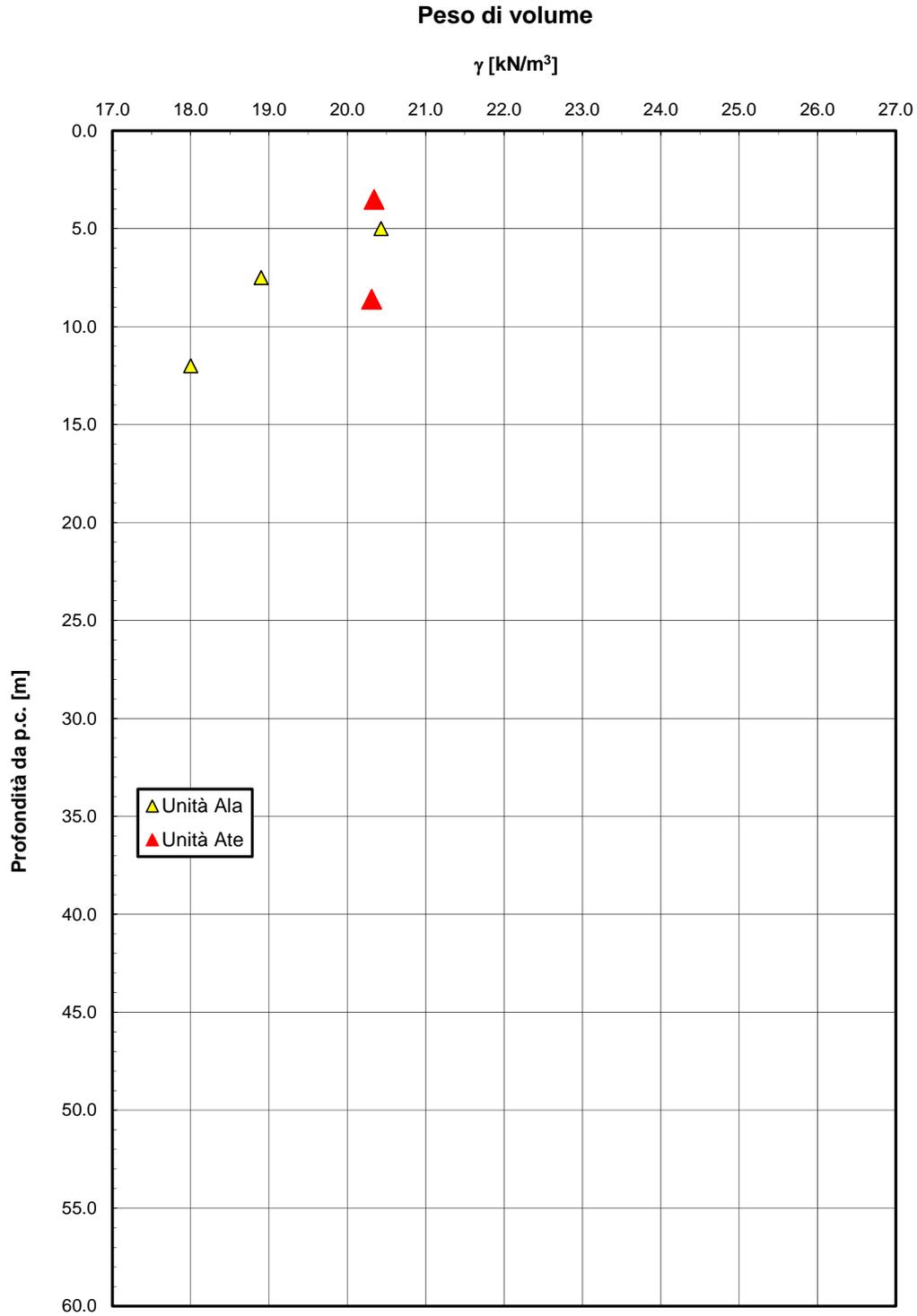


Figura 21 – Peso di volume naturale– Unità Ala e unità Ate

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 74 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Granulometria unità Ala**

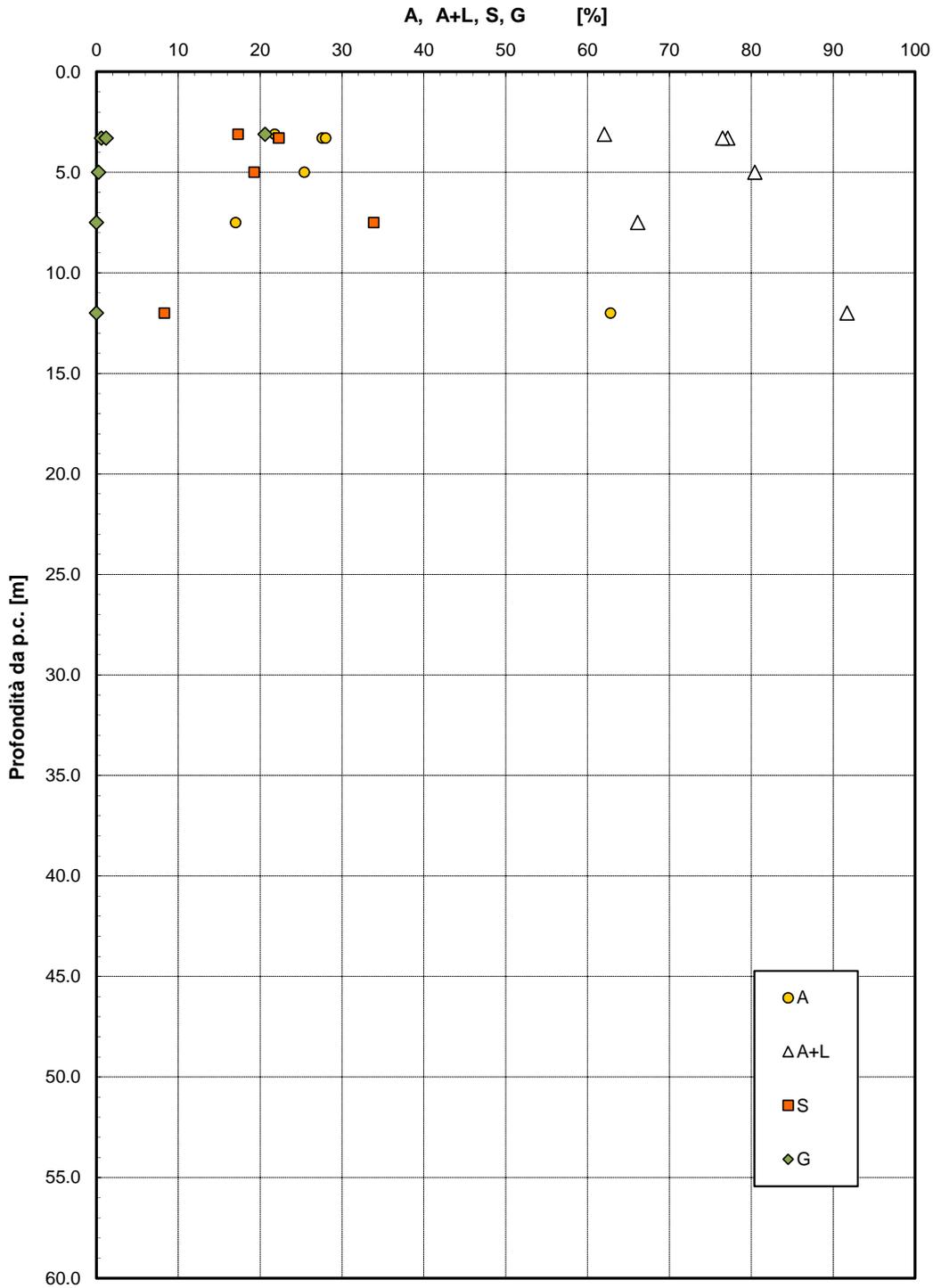


Figura 22- Analisi granulometrica – Unità Ala

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 75 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Granulometria unità Ate**

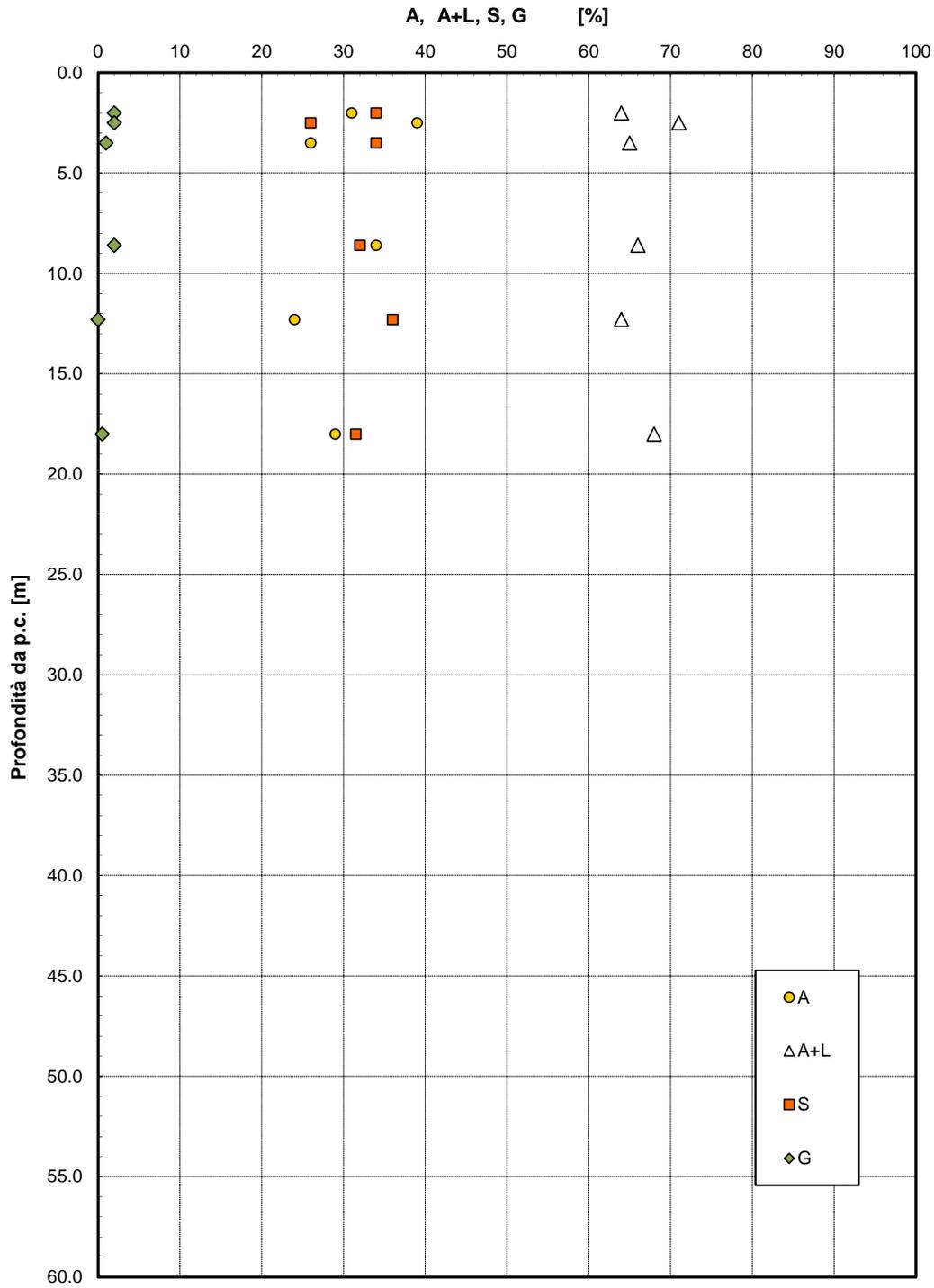


Figura 23- Analisi granulometrica - Unità Ate

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 76 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Limiti di Atterberg e contenuto naturale d'acqua**

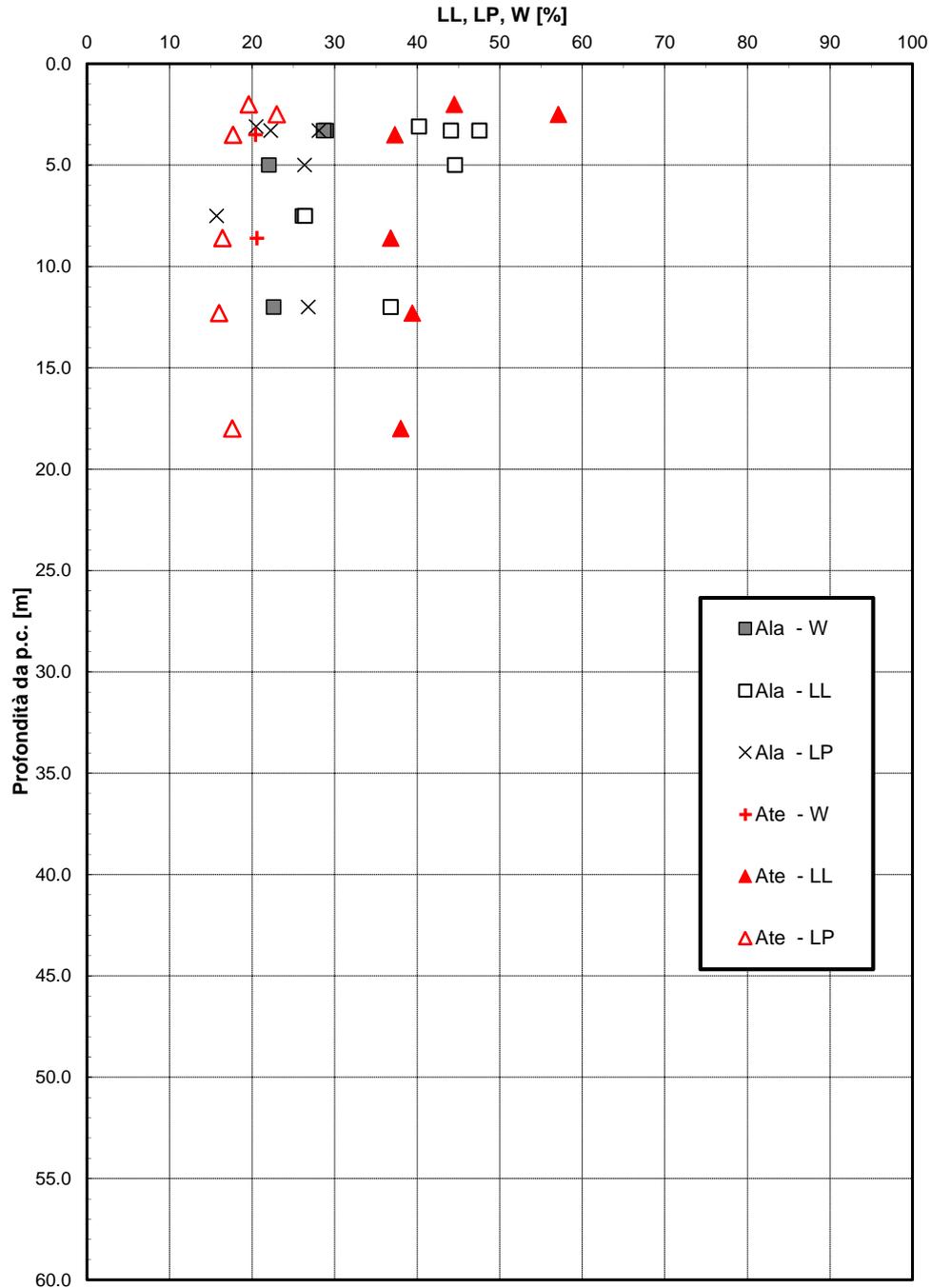


Figura 24 – Limiti di Atterberg – Unità Ala e unità Ate

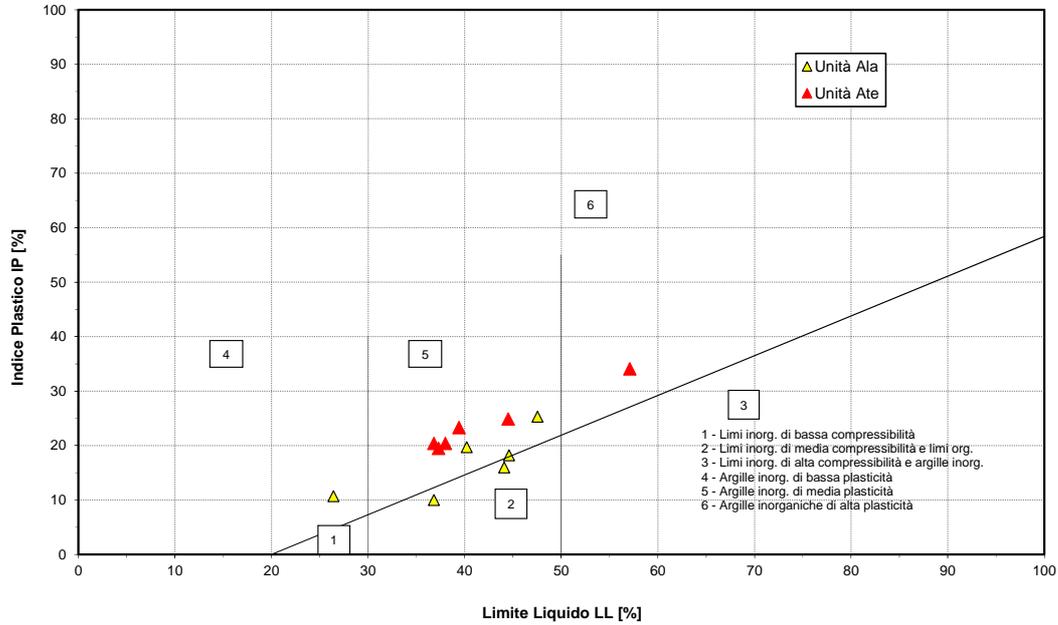
## 2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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

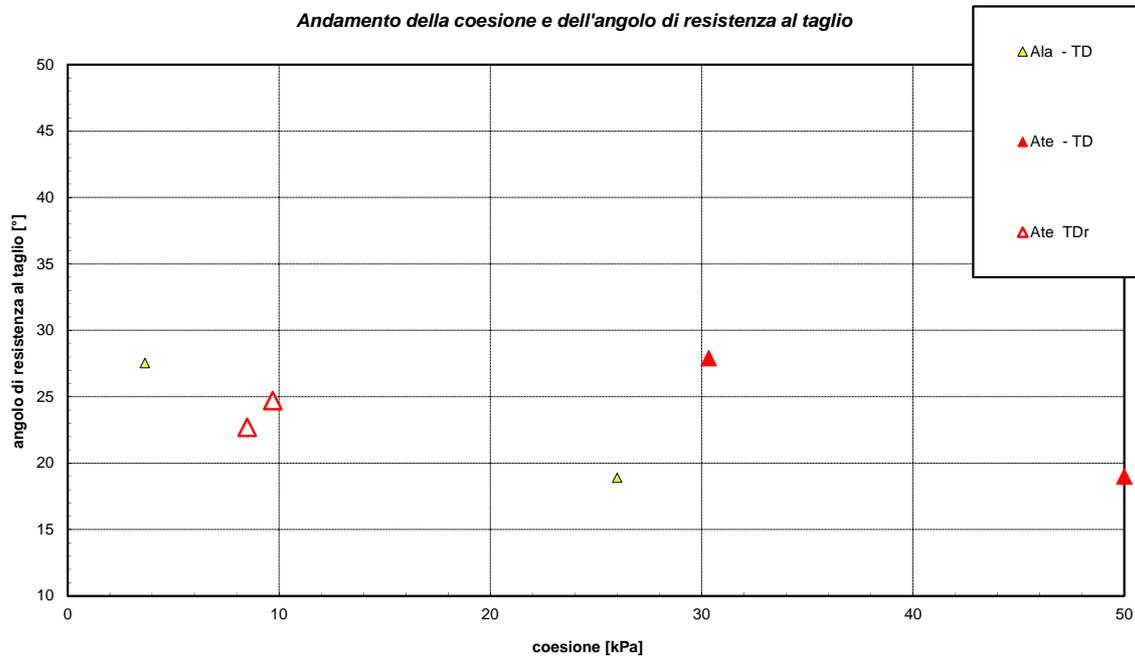
Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 77 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

*Carta di Plasticità di Casagrande*



**Figura 25– Carta di plasticità di Casagrande – Unità Ala e unità Ate**

*Andamento della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio*



**Figura 26– Angolo di resistenza al taglio e coesione drenata – Unità Ala e unità Ate**

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 78 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Andamento della coesione con la profondità**

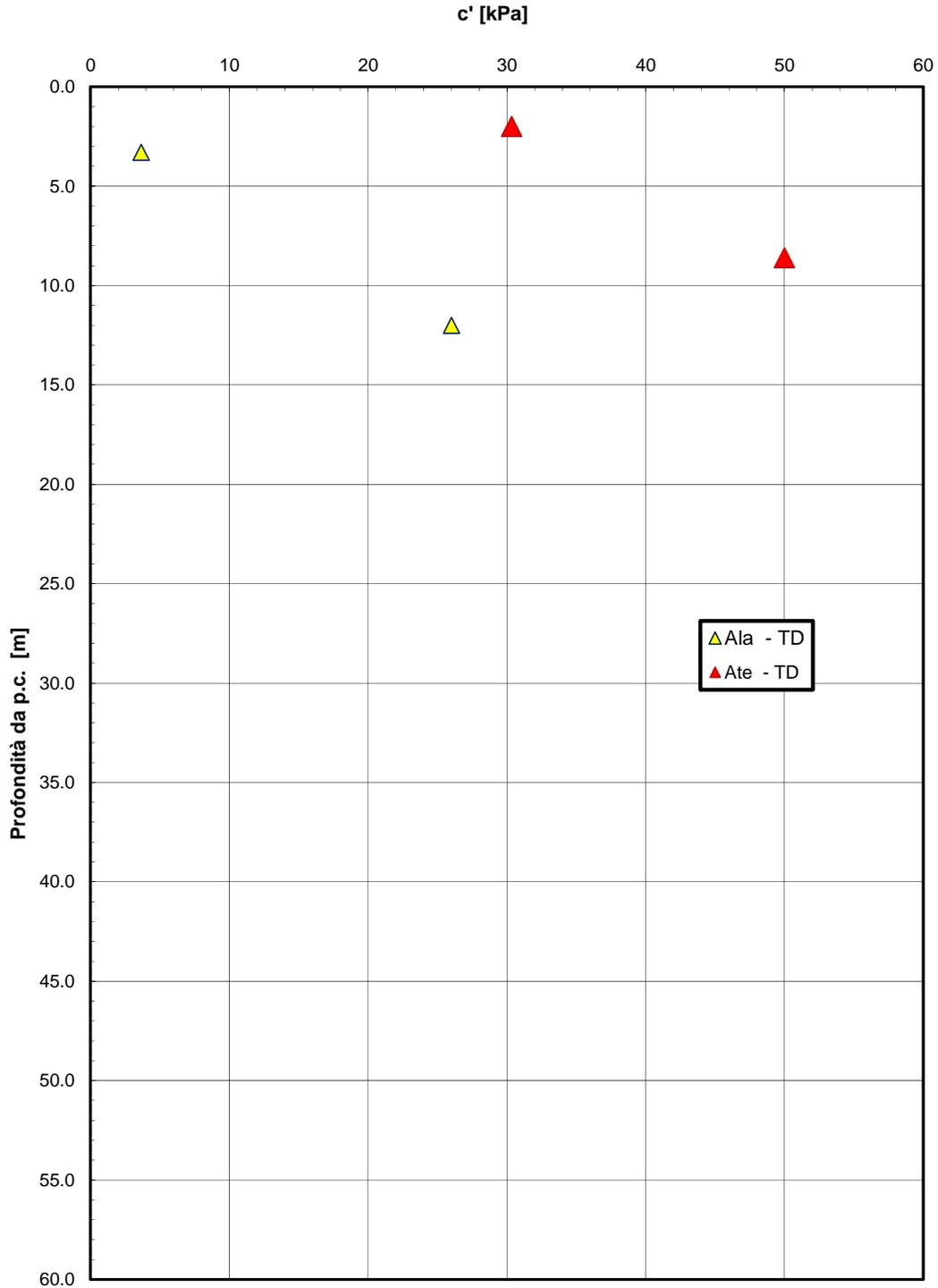


Figura 27 – Andamento della coesione con la profondità – Unità Ala e unità Ate

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 79 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Andamento della resistenza al taglio con la profondità**

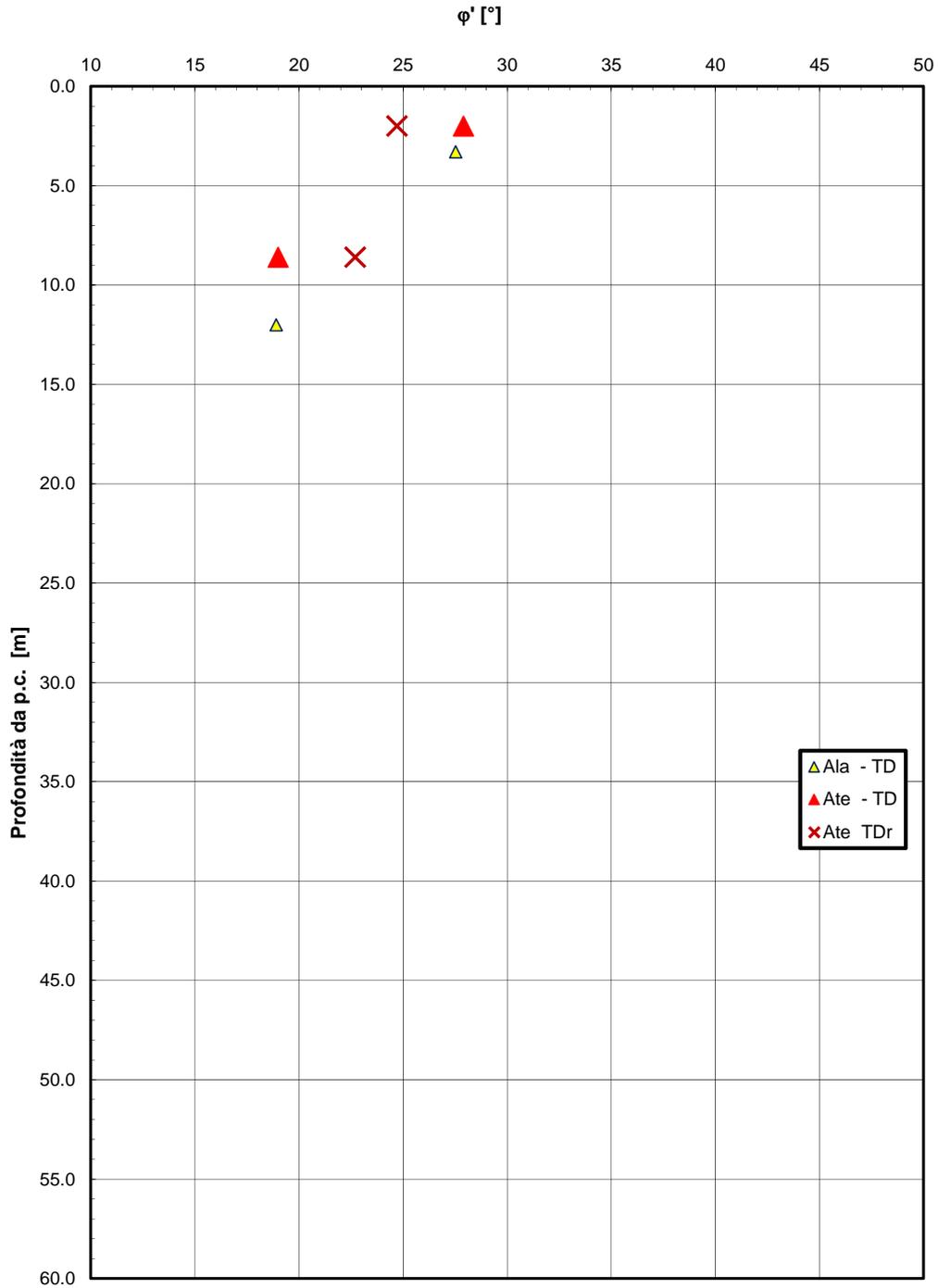


Figura 28– Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Ala e unità Ate

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 80 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

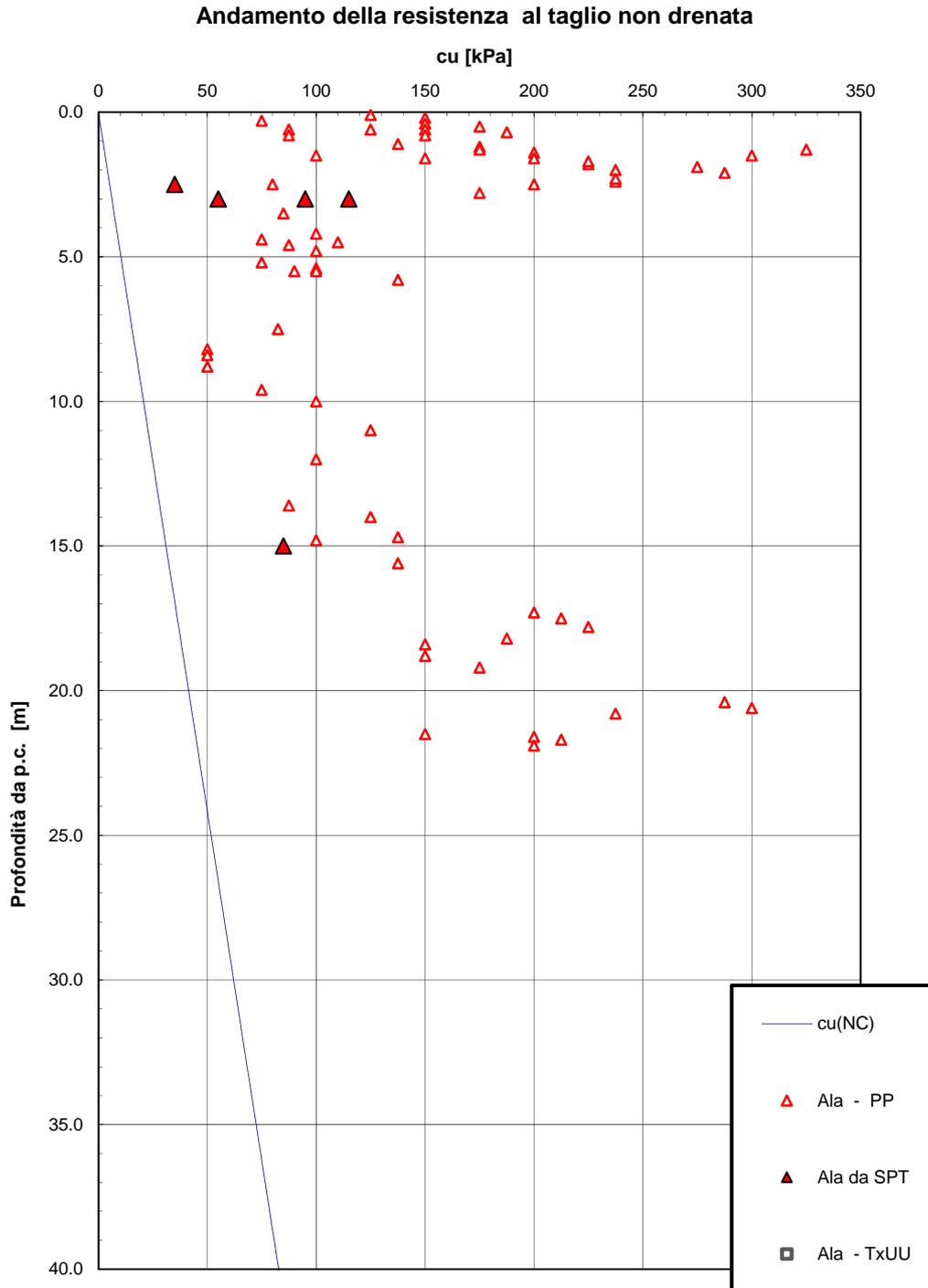


Figura 29– Resistenza al taglio non drenata – Unità Ala

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 81 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Andamento della resistenza al taglio non drenata**

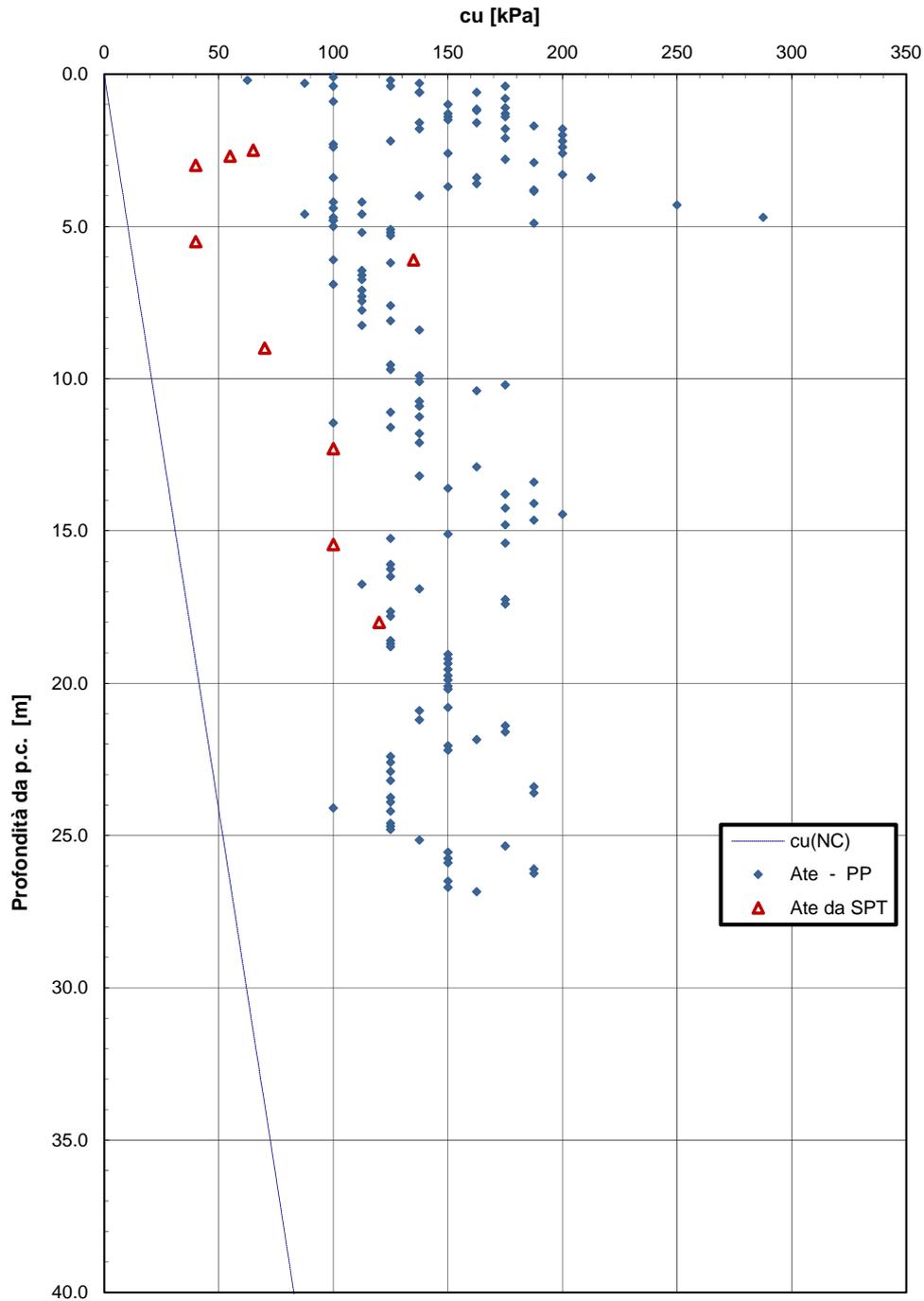


Figura 30- Resistenza al taglio non drenata - Unità Ate

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 82 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT**

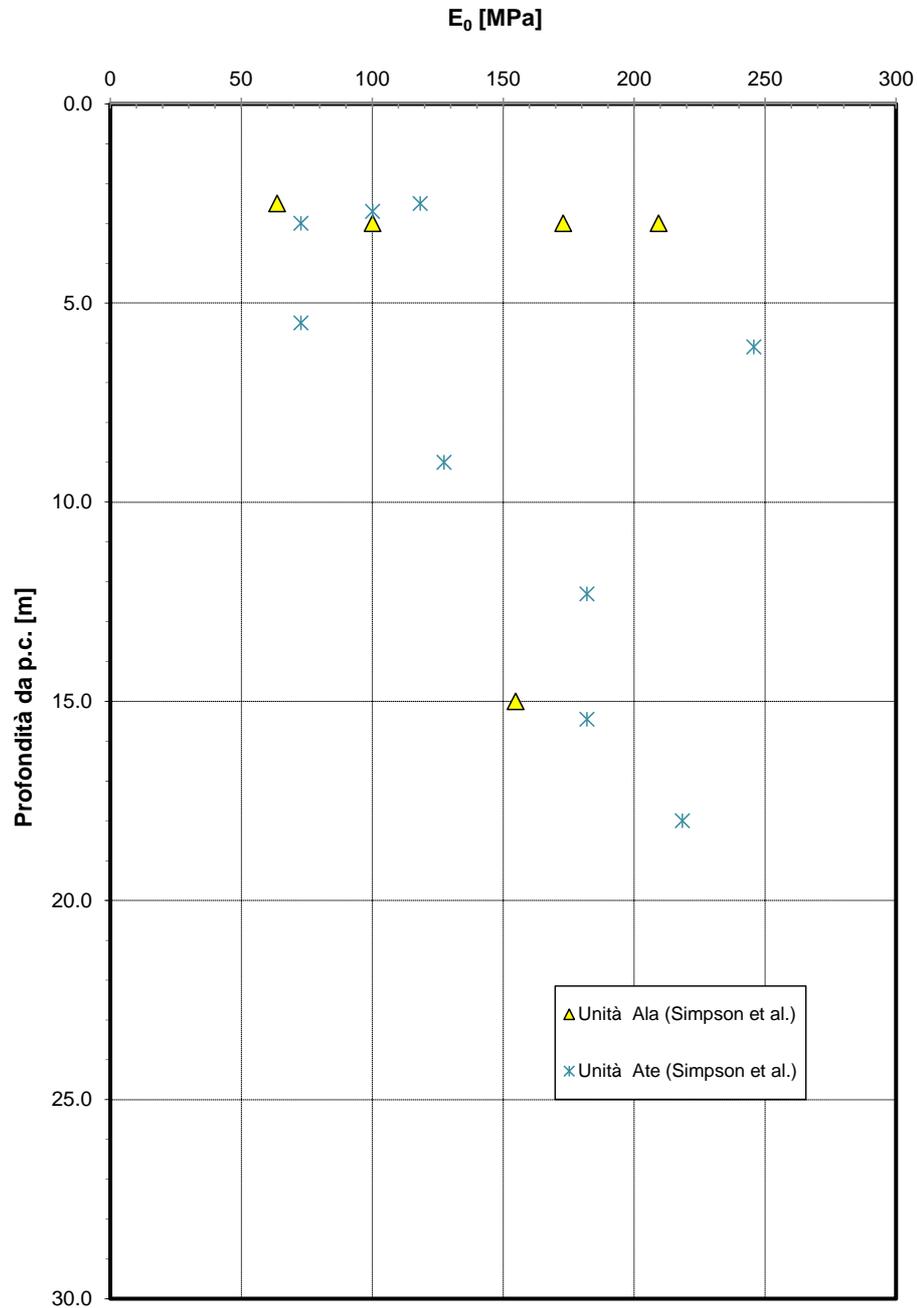


Figura 31- Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – Unità Ala e Ate

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 83 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

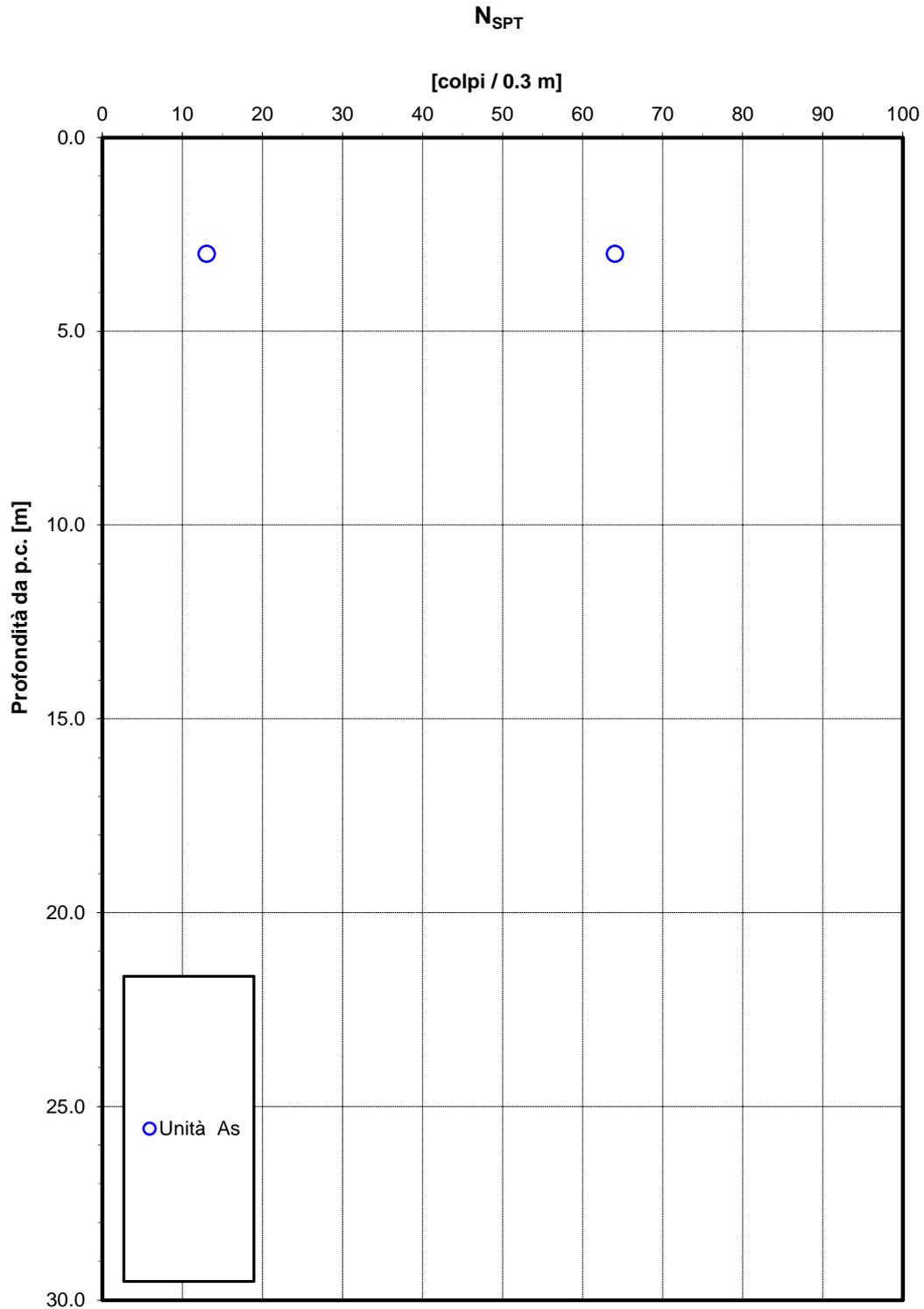


Figura 32 – Valori di N<sub>SPT</sub> – Unità As (dal lotto 2)

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 84 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Densità relativa da prove SPT**

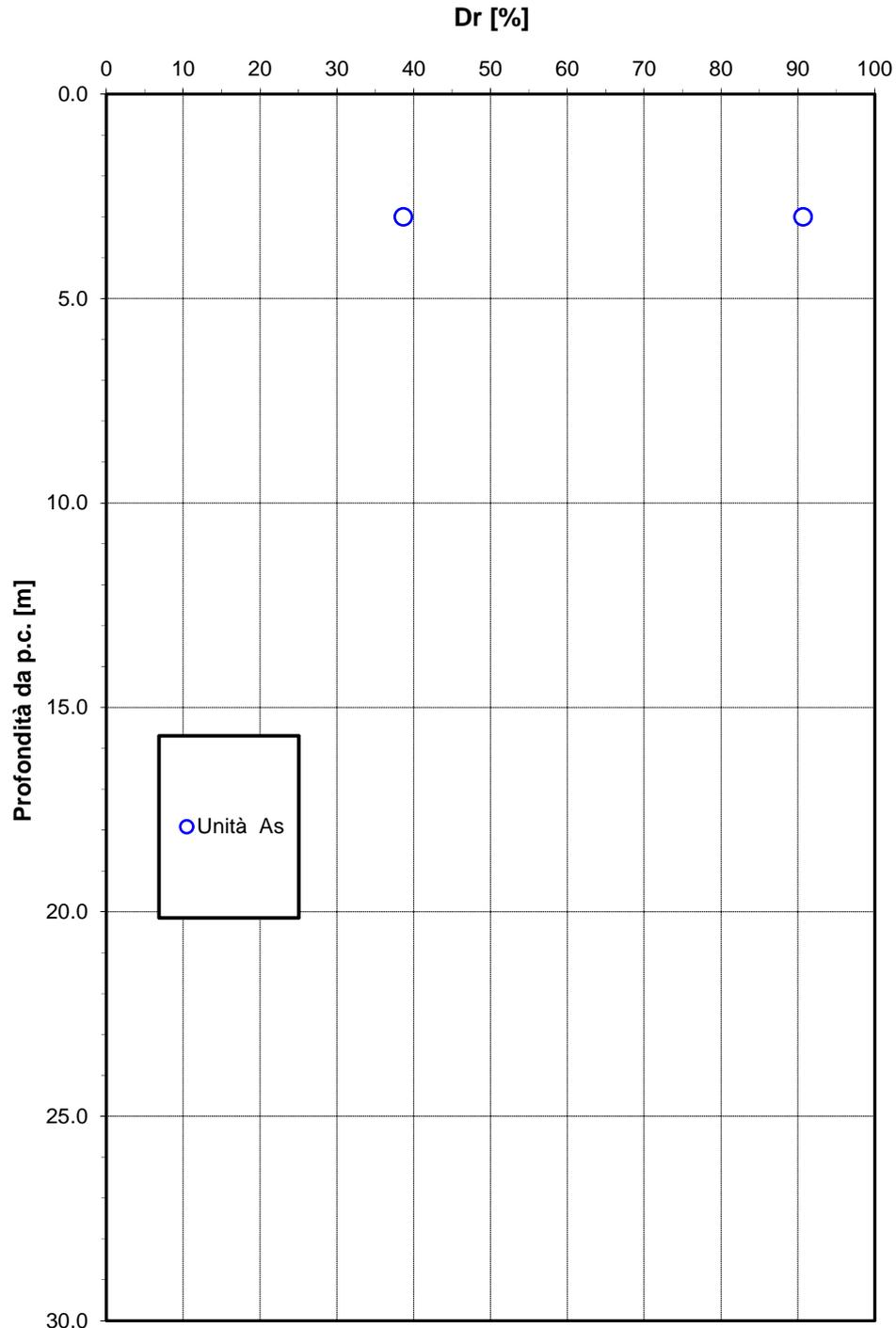


Figura 33 – Densità relativa da prove SPT – Unità As (dal lotto 2)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 85 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Angolo di resistenza al taglio da prove SPT

angolo di resistenza al taglio [gradi]

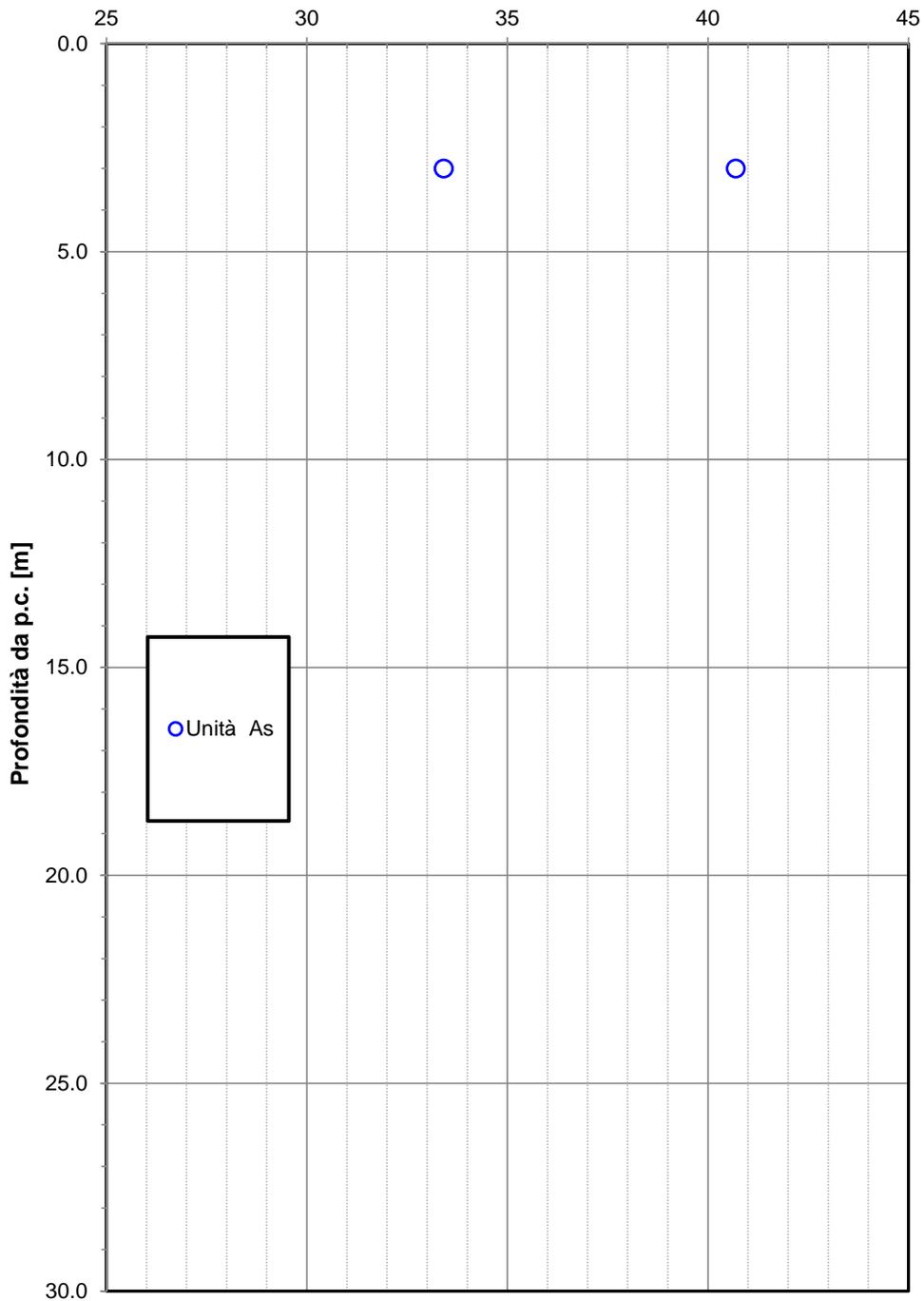


Figura 34 – Angolo di resistenza al taglio da prove SPT – Unità As (dal lotto 2)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 86 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT**

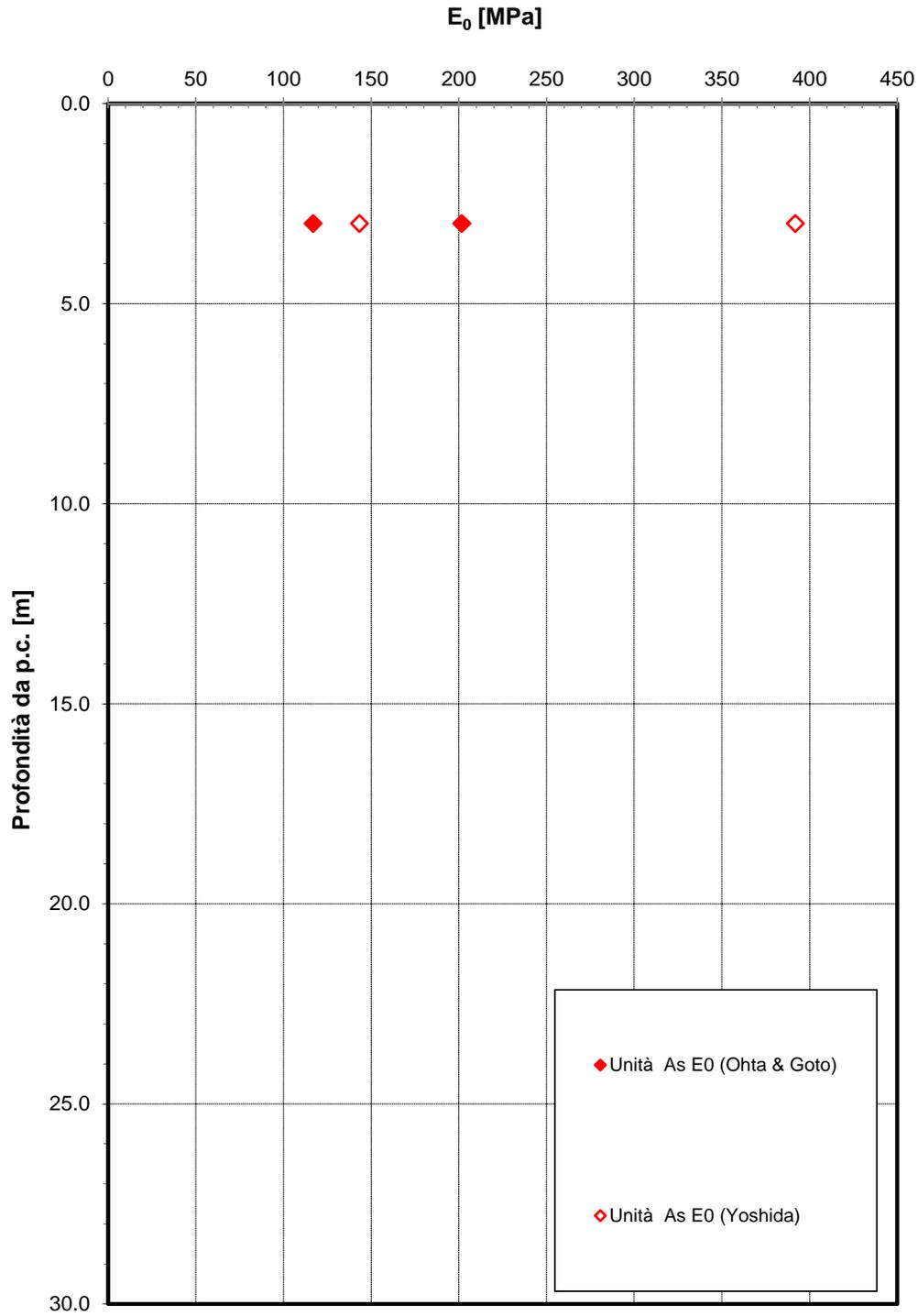


Figura 35- Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – Unità As (dal lotto 2)

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 87 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

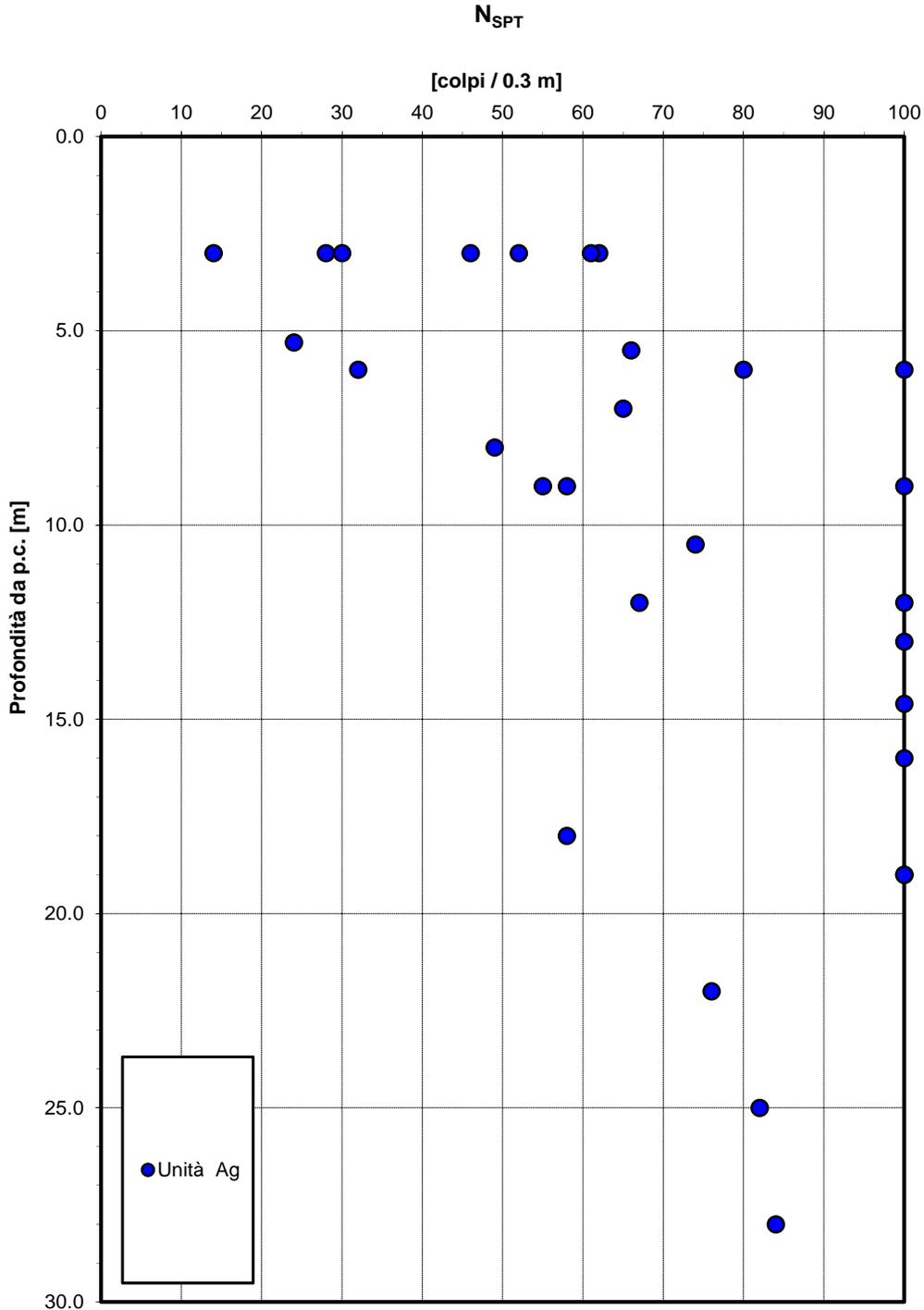


Figura 36- Valori di  $N_{SPT}$  - Unità Ag

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 88 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Densità relativa da prove SPT**

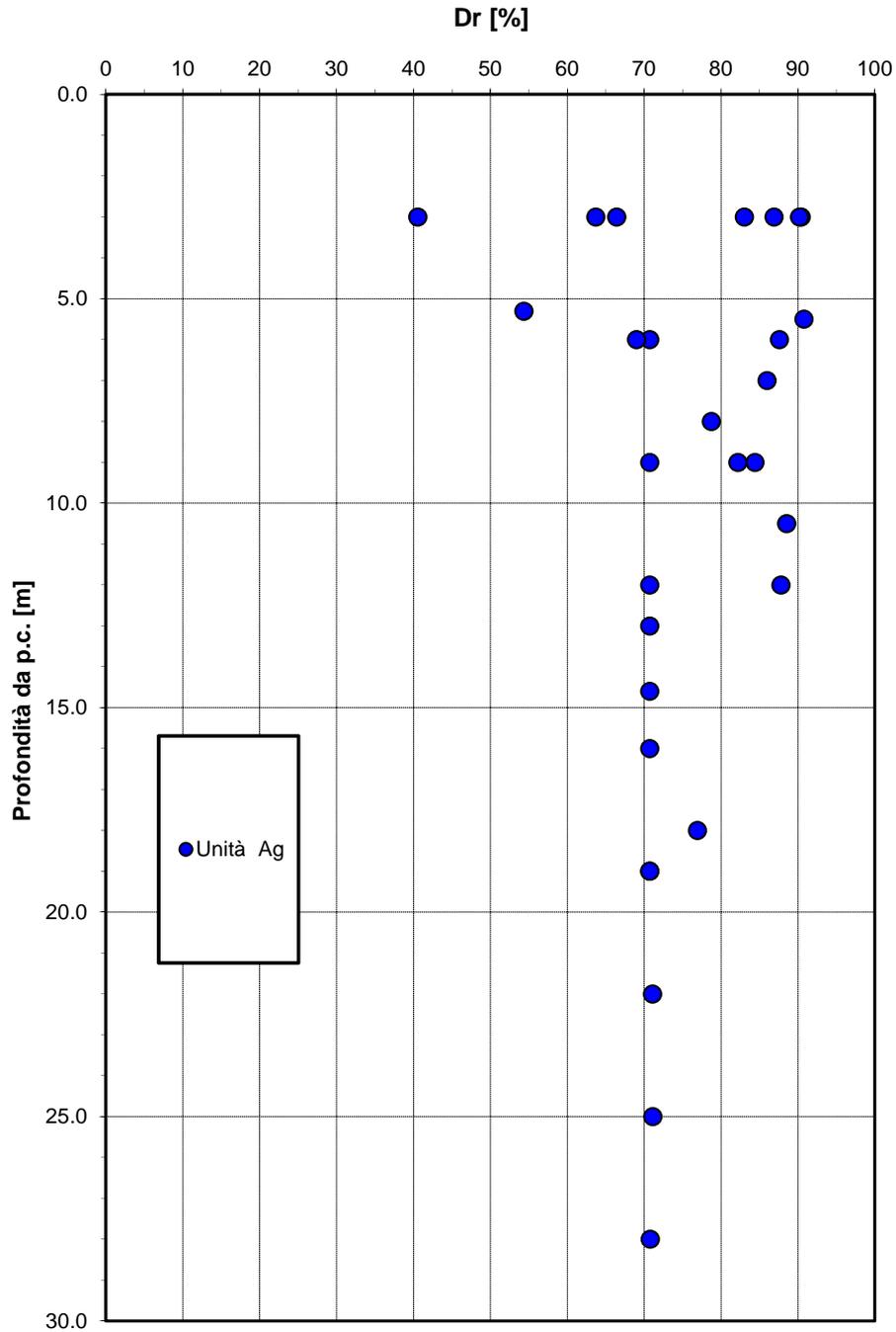


Figura 37– Densità relativa da prove SPT – Unità Ag

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 89 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Granulometria unità Ag**

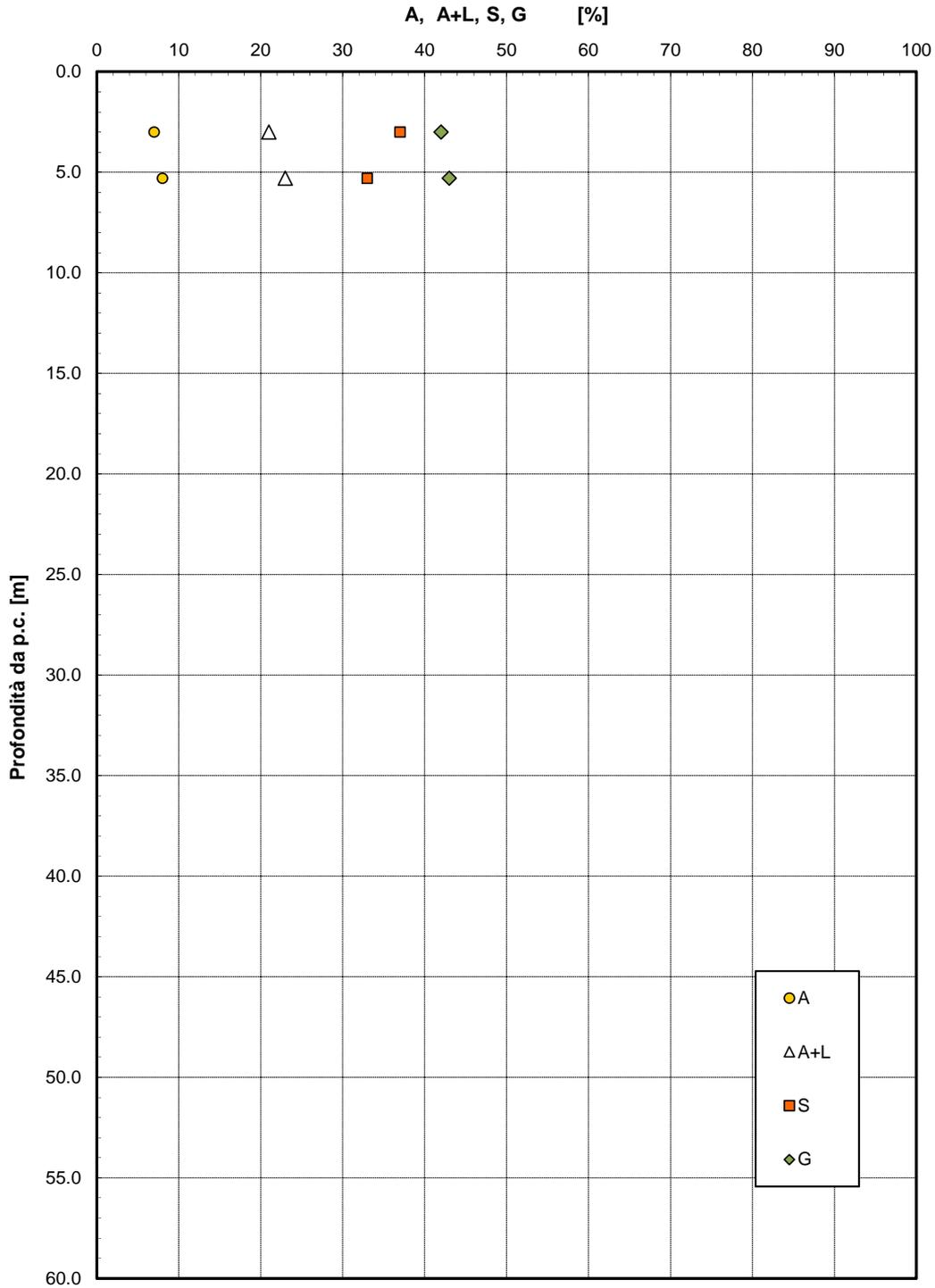


Figura 38 – Analisi granulometrica – Unità Ag

## 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	Tratto	Settore	CEE	WBS	Id. doc. REL	N. prog.	Rev.	Pag. di Pag.
L0703	213	E	02	GE0000	REL	02	A	90 di 162

### Angolo di resistenza al taglio da prove SPT

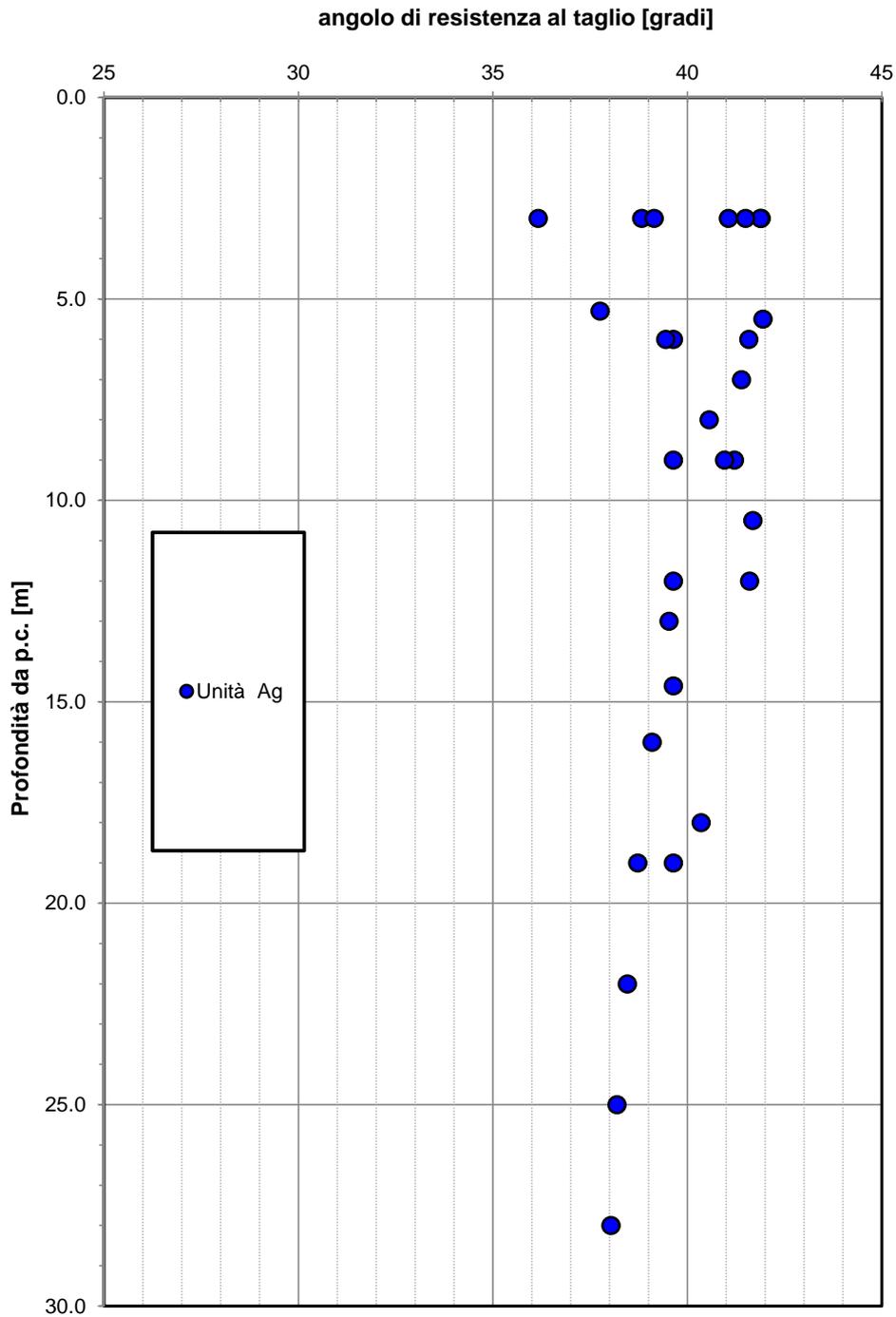
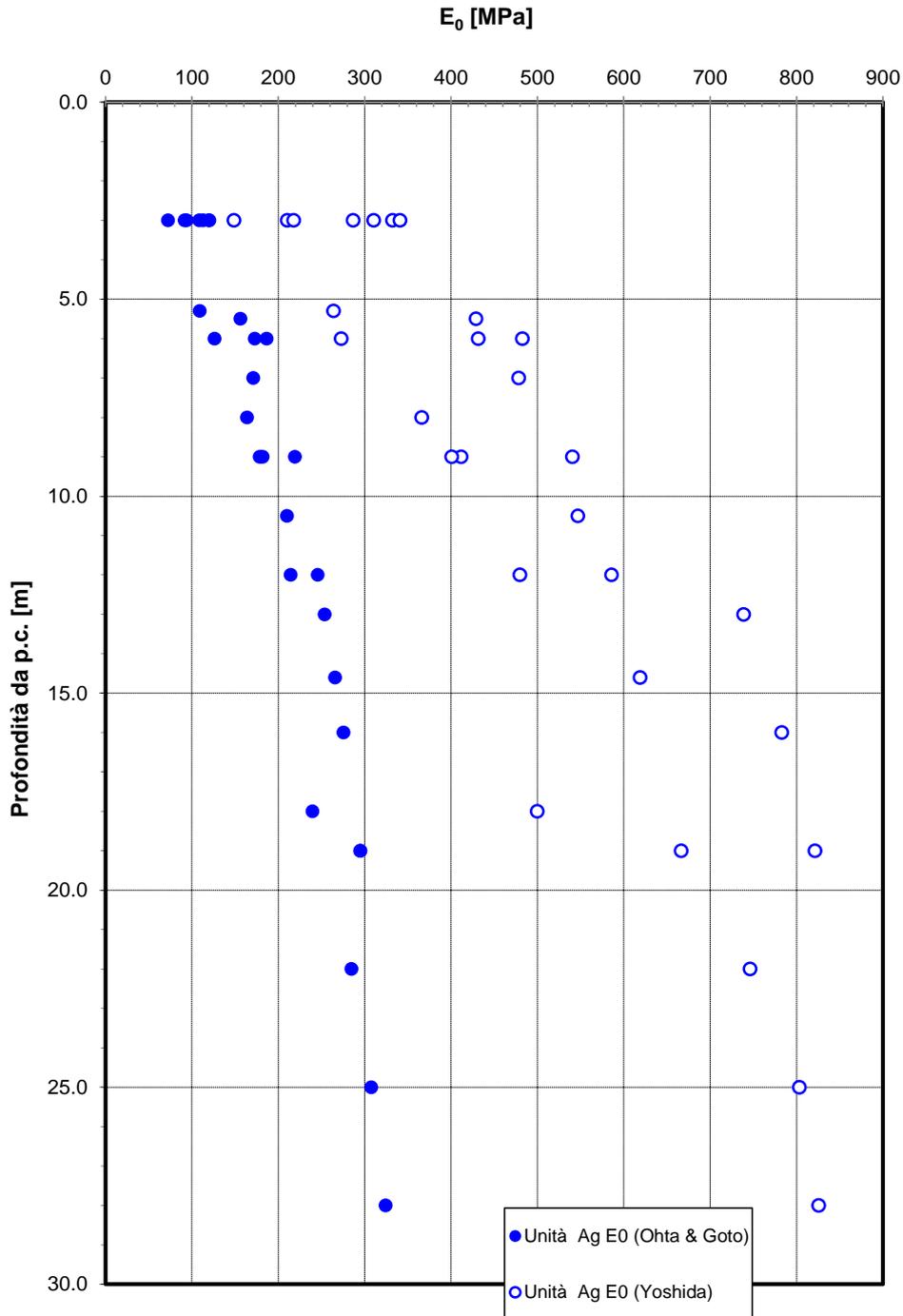


Figura 39– Angolo di resistenza al taglio da prove SPT – Unità Ag

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 91 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT**



**Figura 40- Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – Unità Ag**

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 92 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

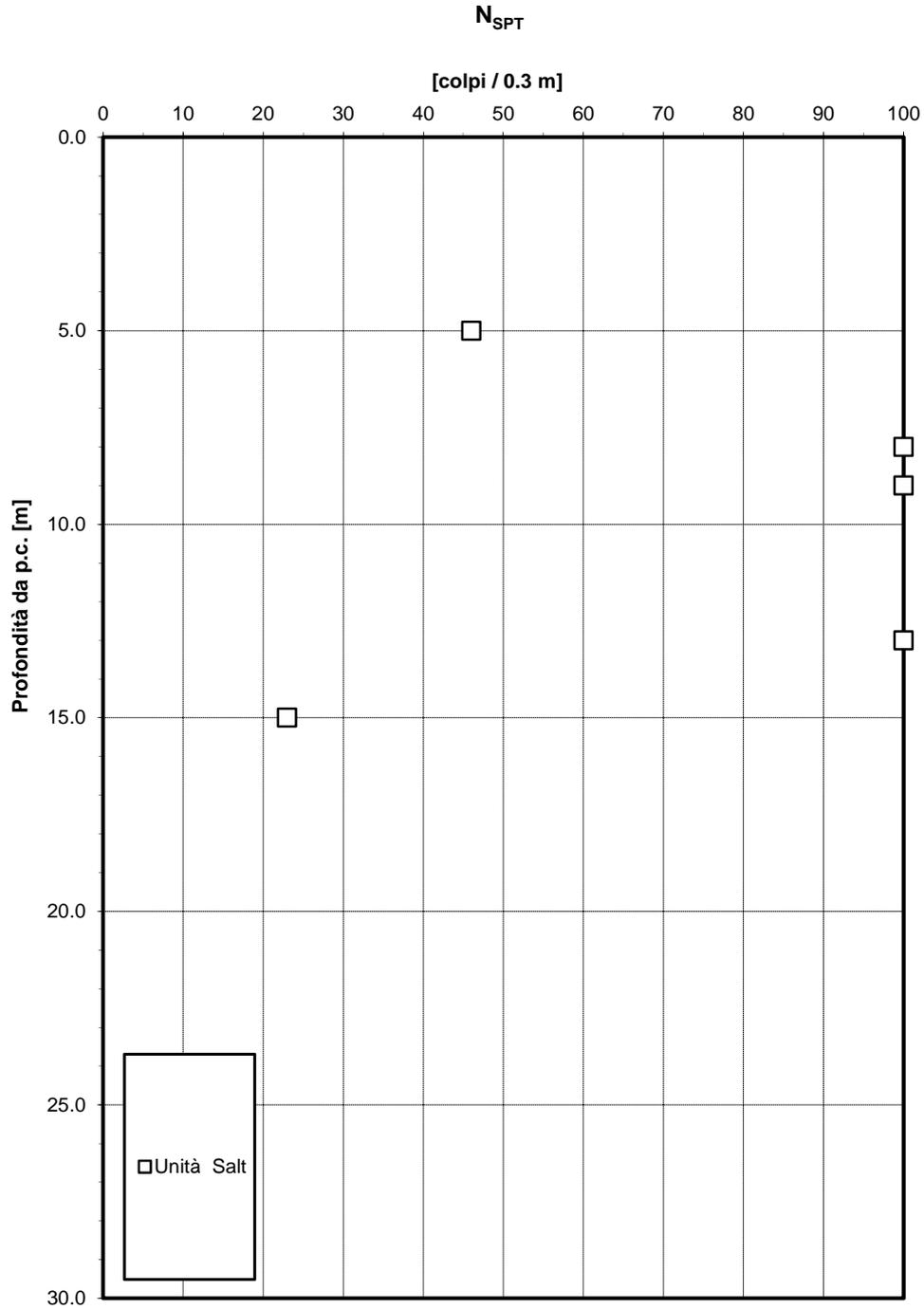


Figura 41- Valori di N<sub>SPT</sub> - Unità Salt

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 93 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Peso di volume

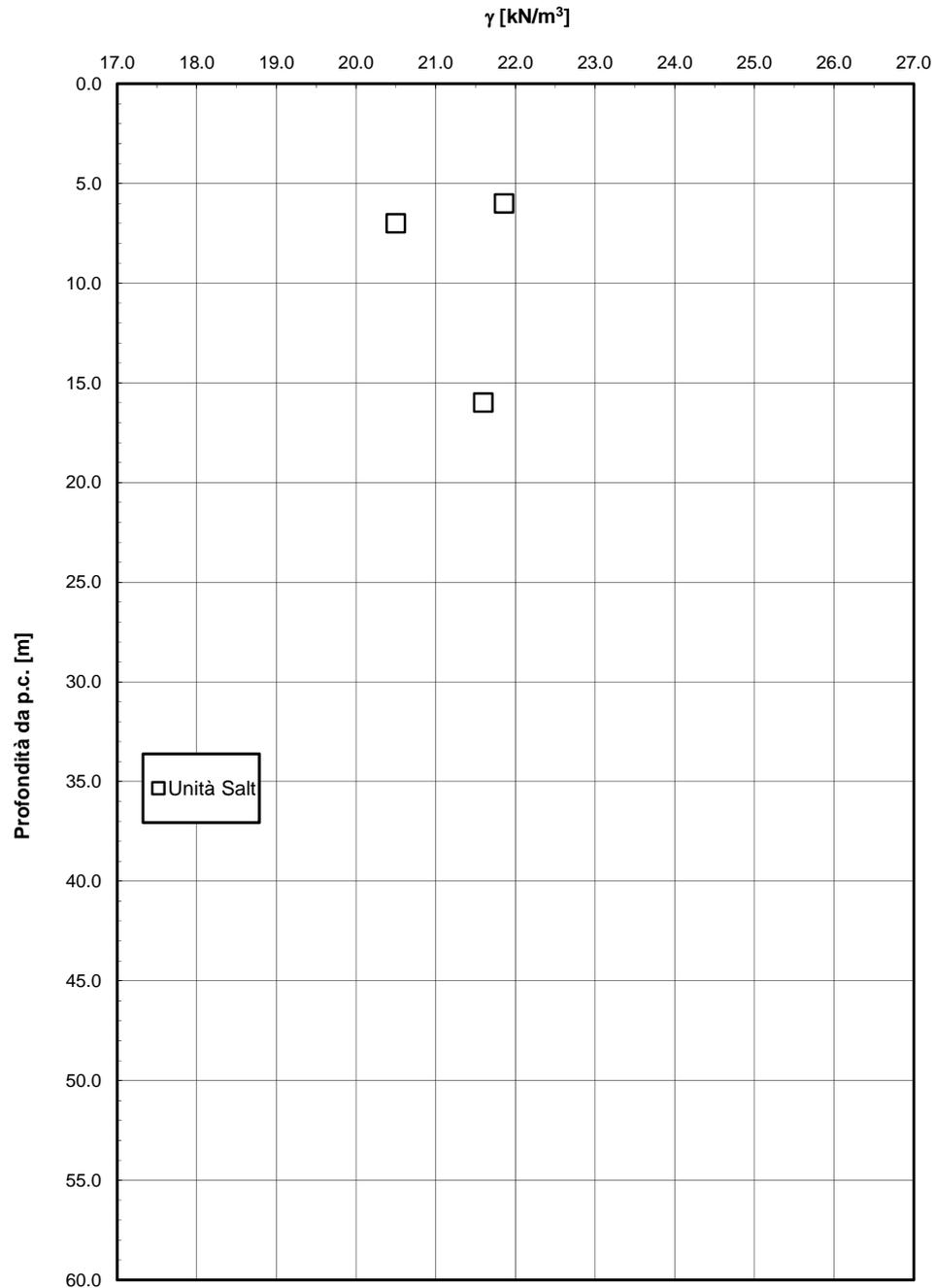


Figura 42– Peso di volume naturale– Unità Salt

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 94 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

### Granulometria unità Salt

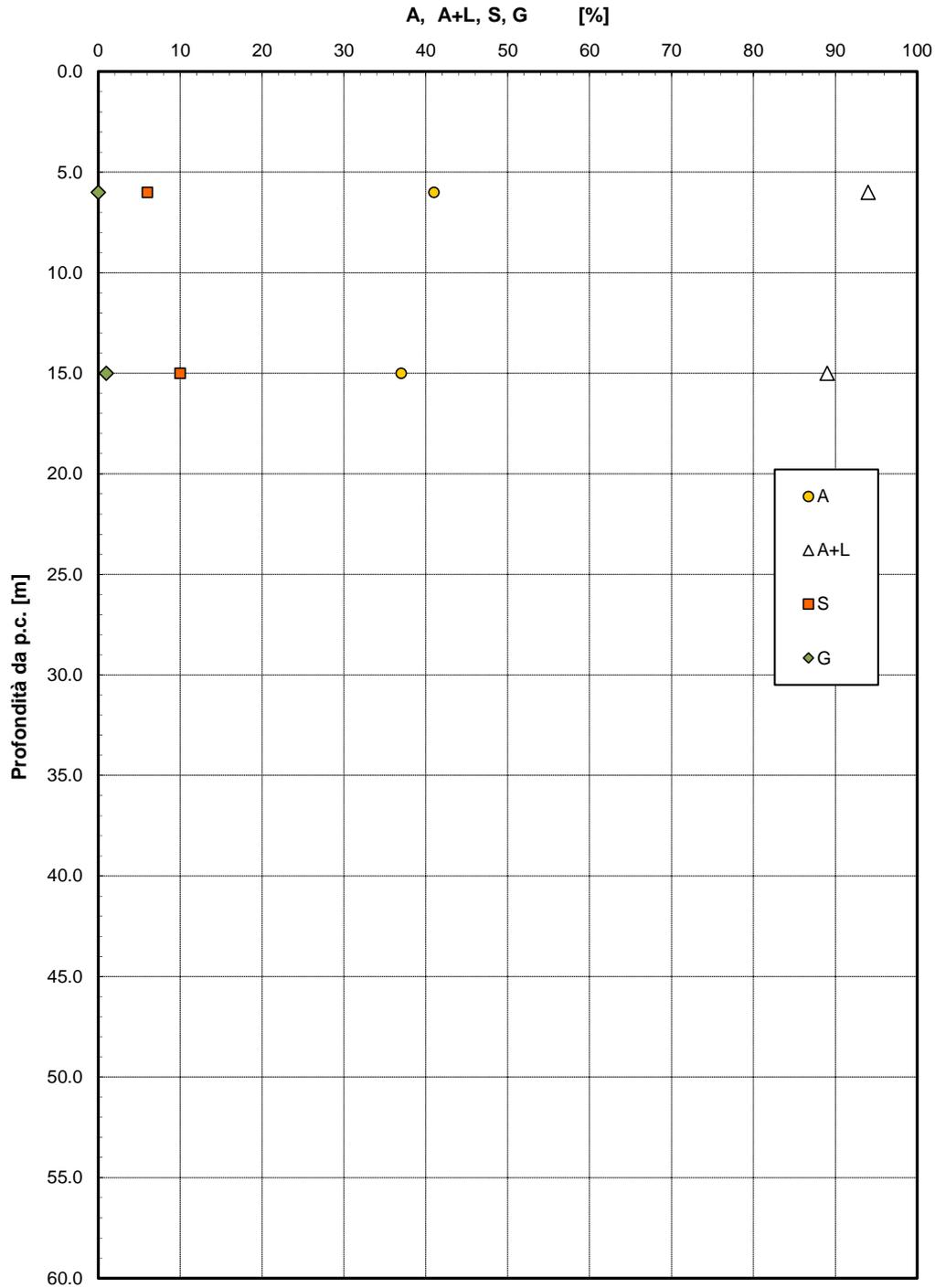


Figura 43– Analisi granulometrica – Unità Salt

**2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE**

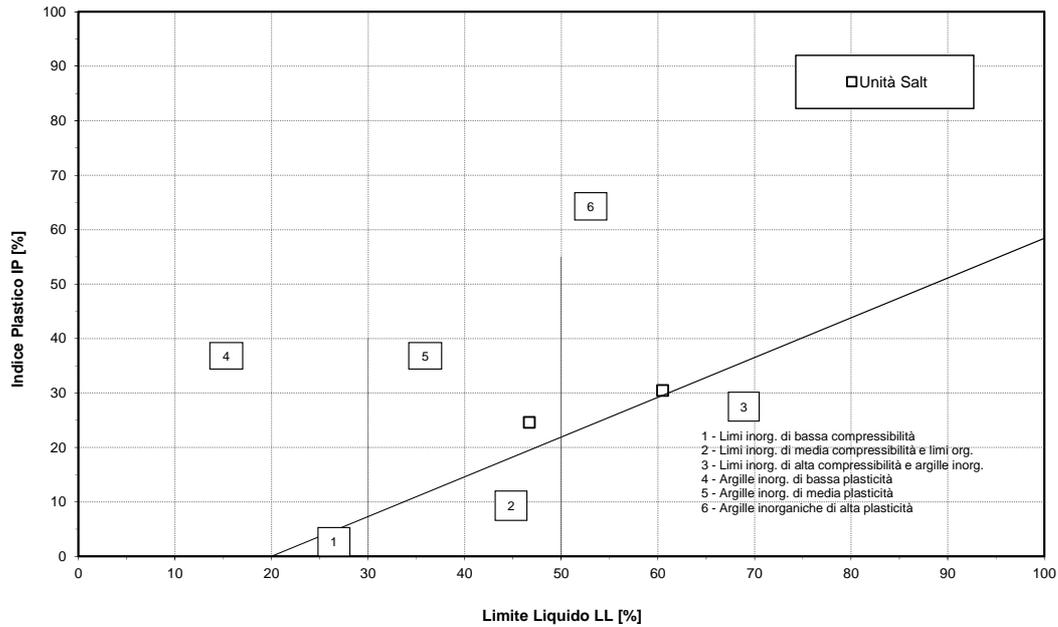
3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 95 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	---------------------------

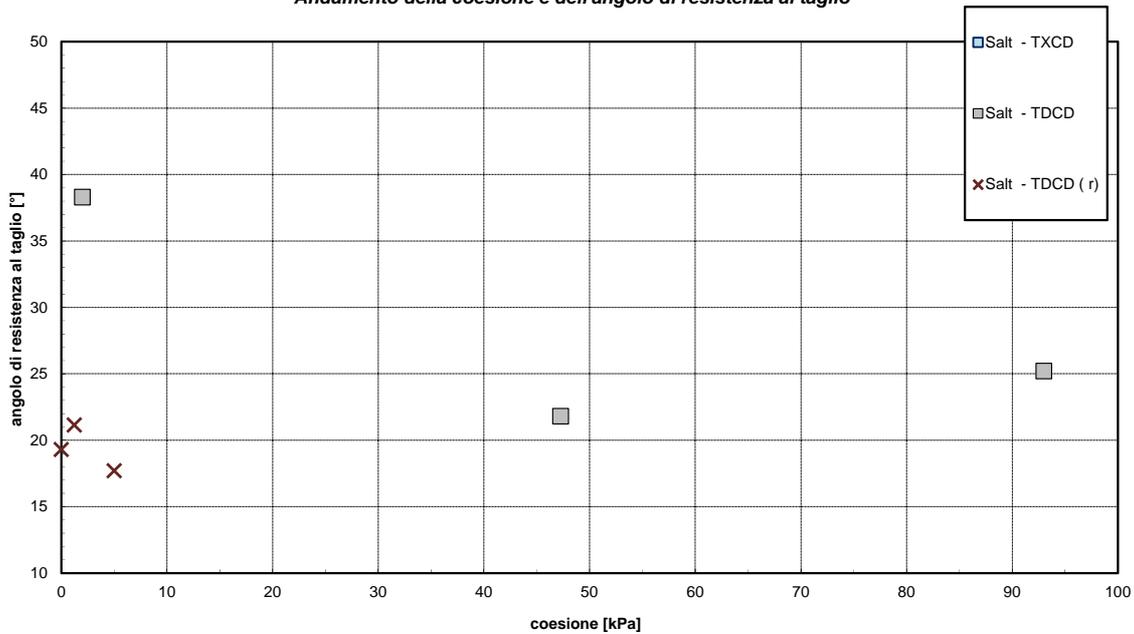
**Figura 44- Limiti di Atterberg – Unità Salt**

*Carta di Plasticità di Casagrande*



**Figura 45 – Carta di plasticità di Casagrande – Unità Salt**

*Andamento della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio*



**Figura 46- 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 96 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Andamento della coesione con la profondità**

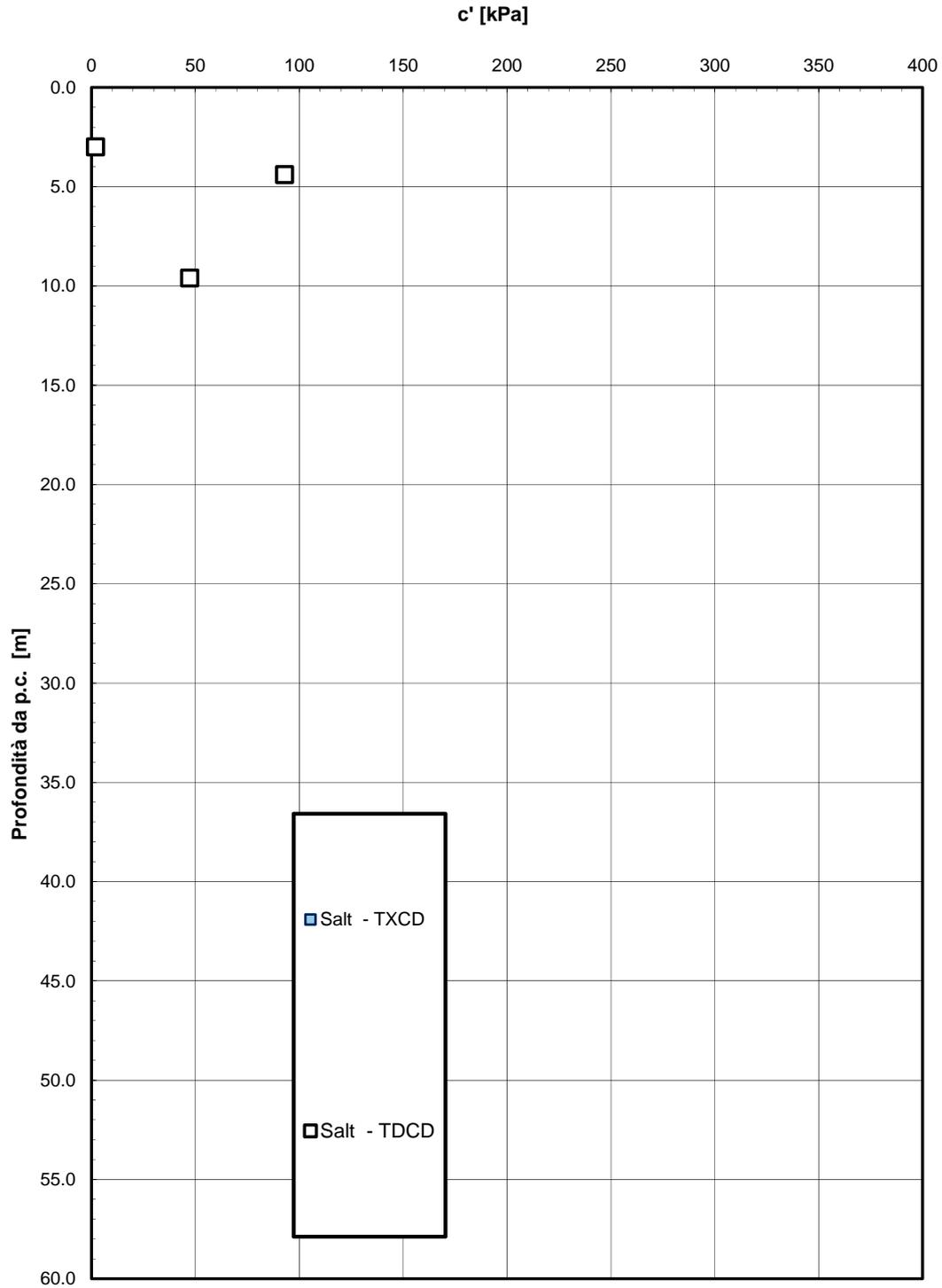


Figura 47 - Andamento della coesione con la profondità – Unità Salt (dal lotto 2)

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 97 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

**Andamento della resistenza al taglio con la profondità**

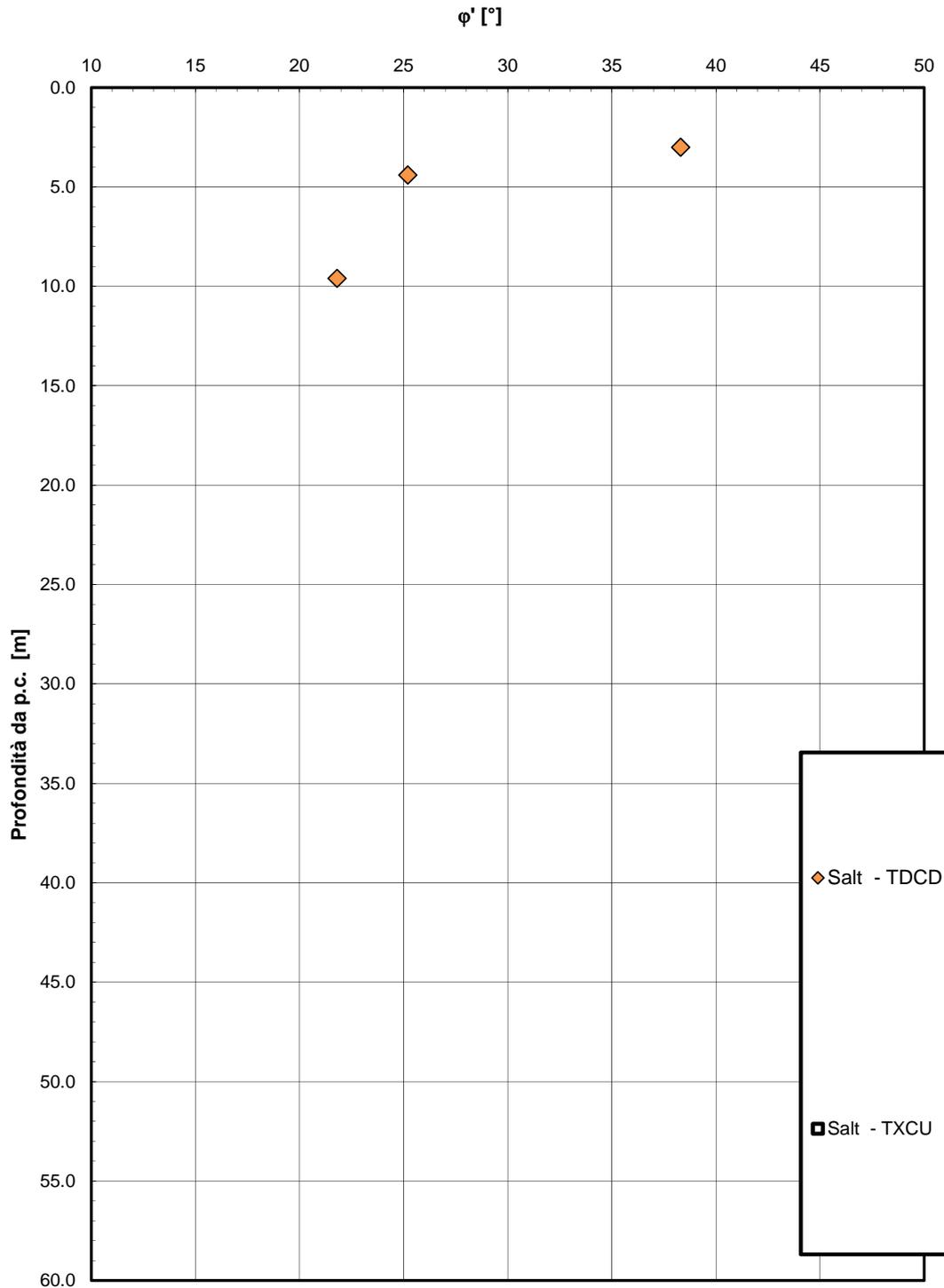


Figura 48 – Andamento della resistenza al taglio con la profondità – Unità Salt (dal lotto 2)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 98 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

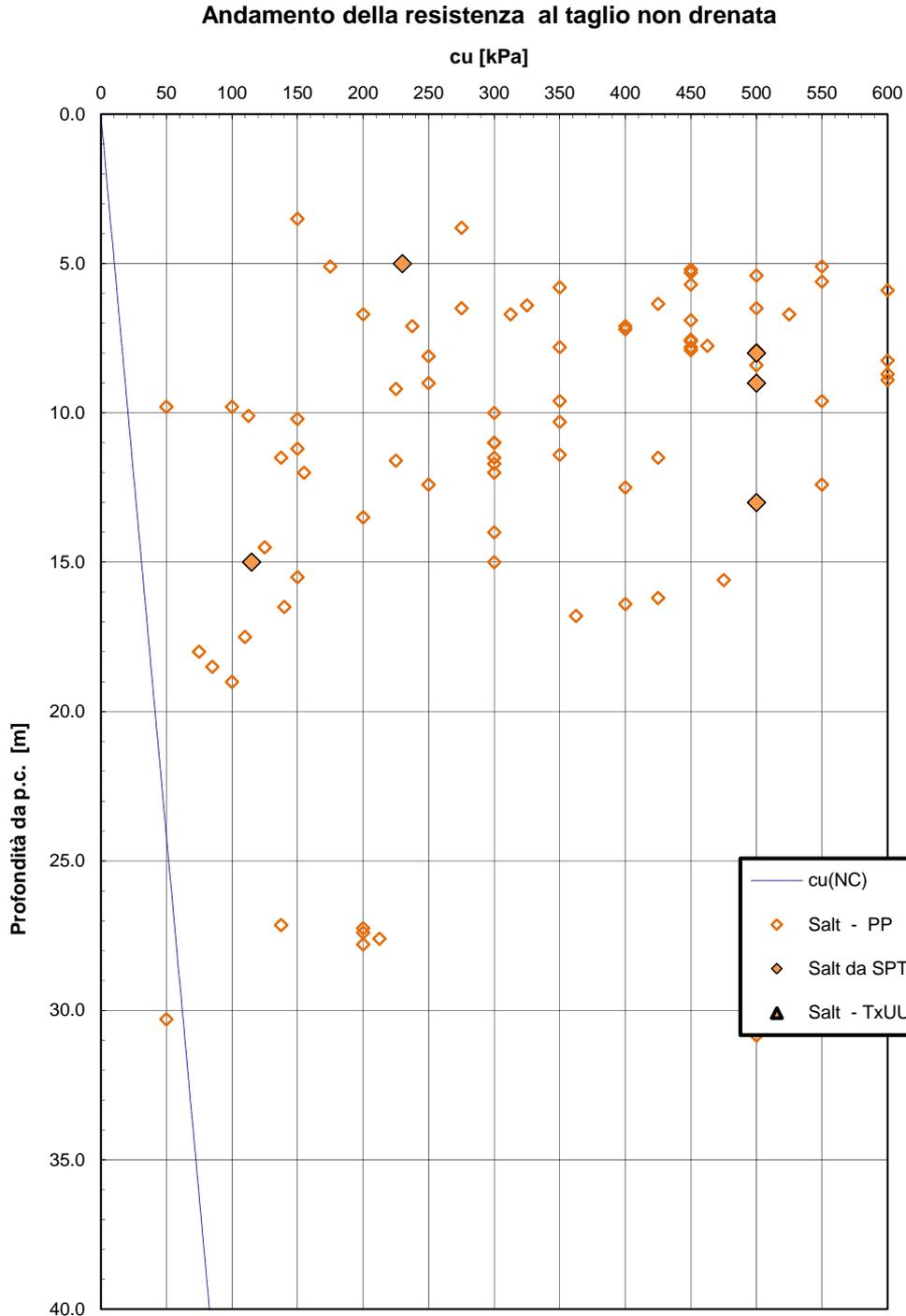


Figura 49- Resistenza al taglio non drenata - Unità Salt

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 99 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	---------------------------

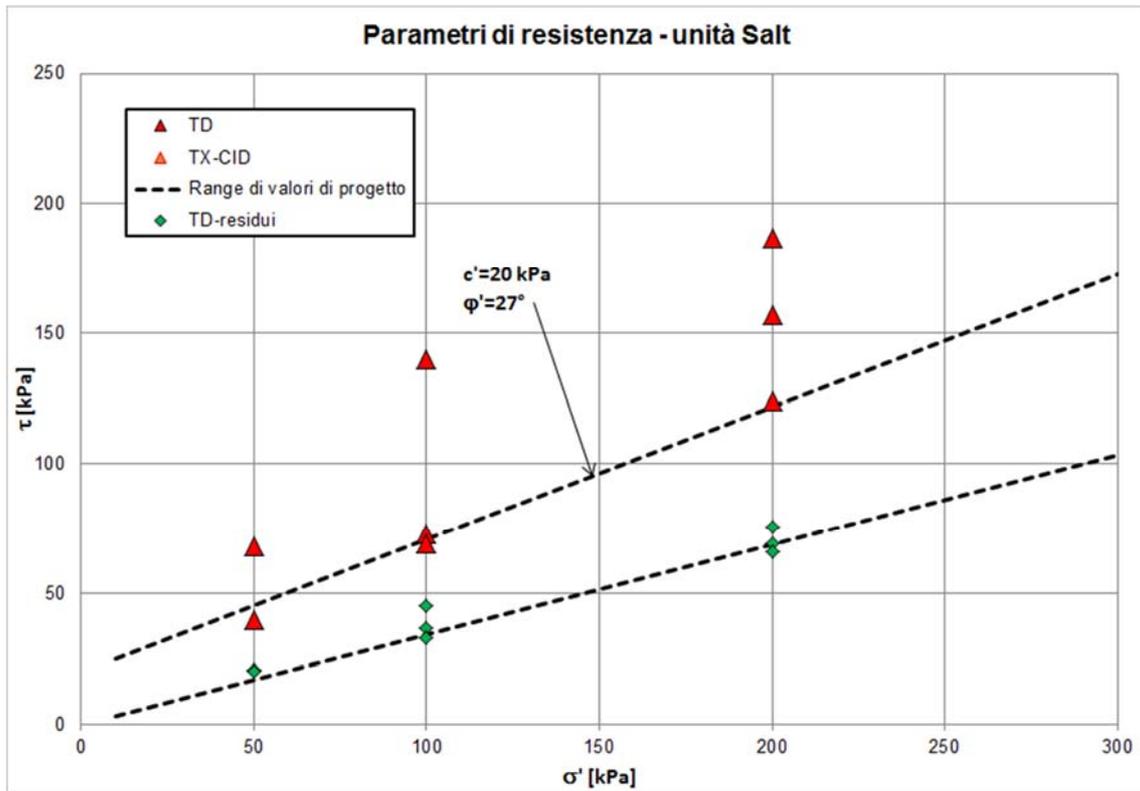


Figura 50 – Parametri di resistenza substrato alterato – unità Salt (dal lotto 2)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 100 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT

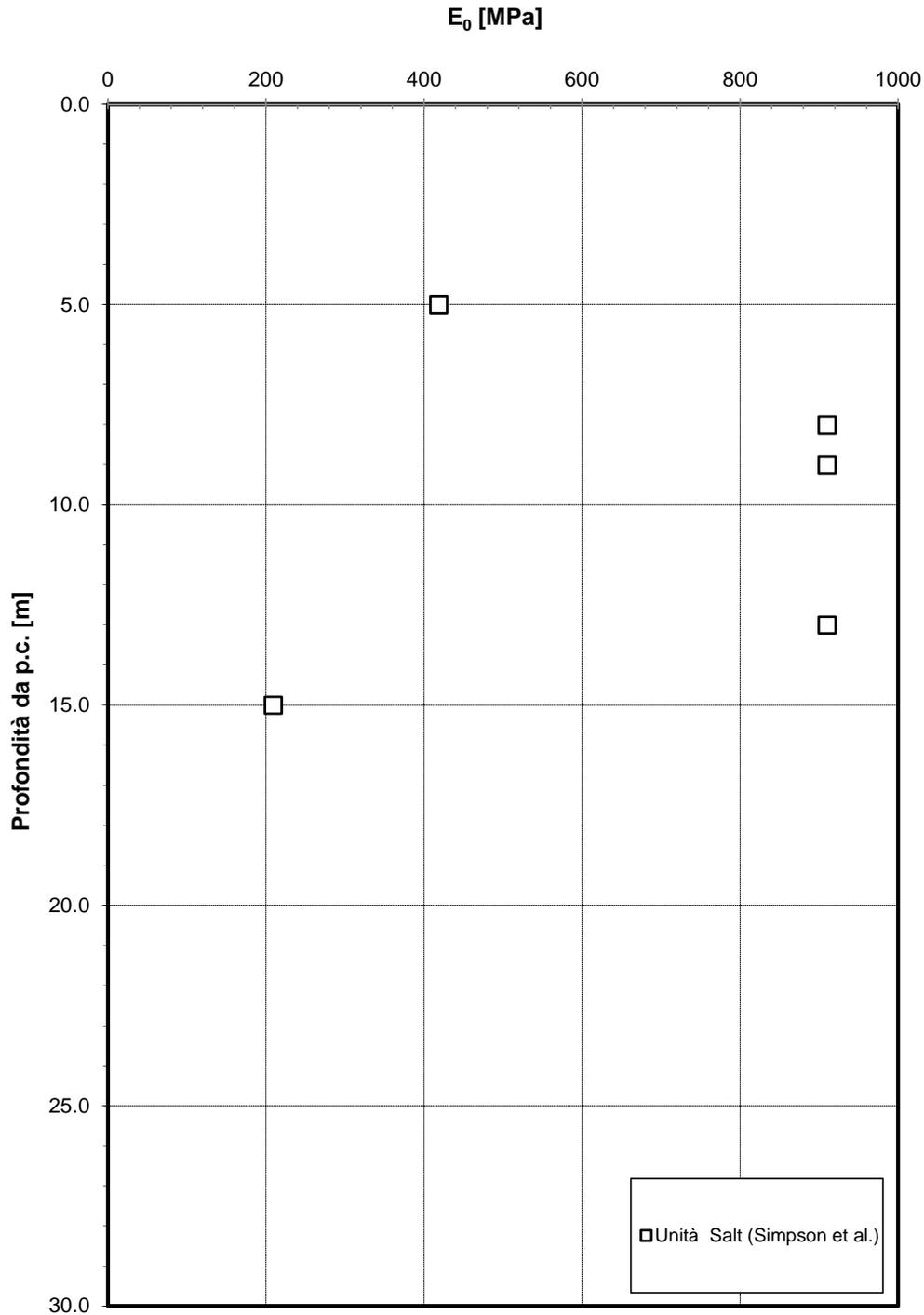


Figura 51- Modulo di deformazione elastico iniziale da prove SPT – Unità Salt

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 101 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

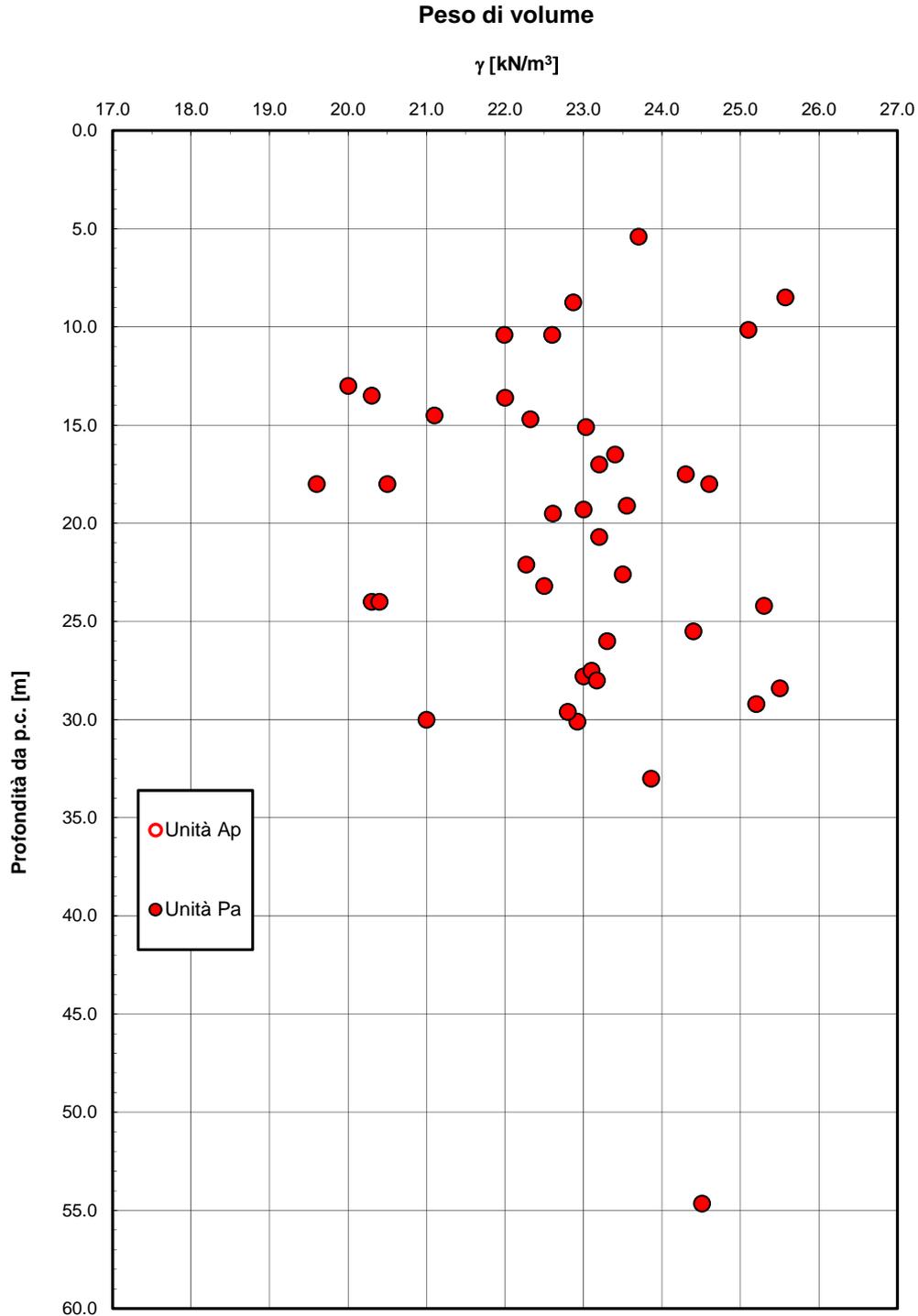


Figura 52 – Peso di volume naturale – Unità Ap e Pa

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 102 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Granulometria unità Pa

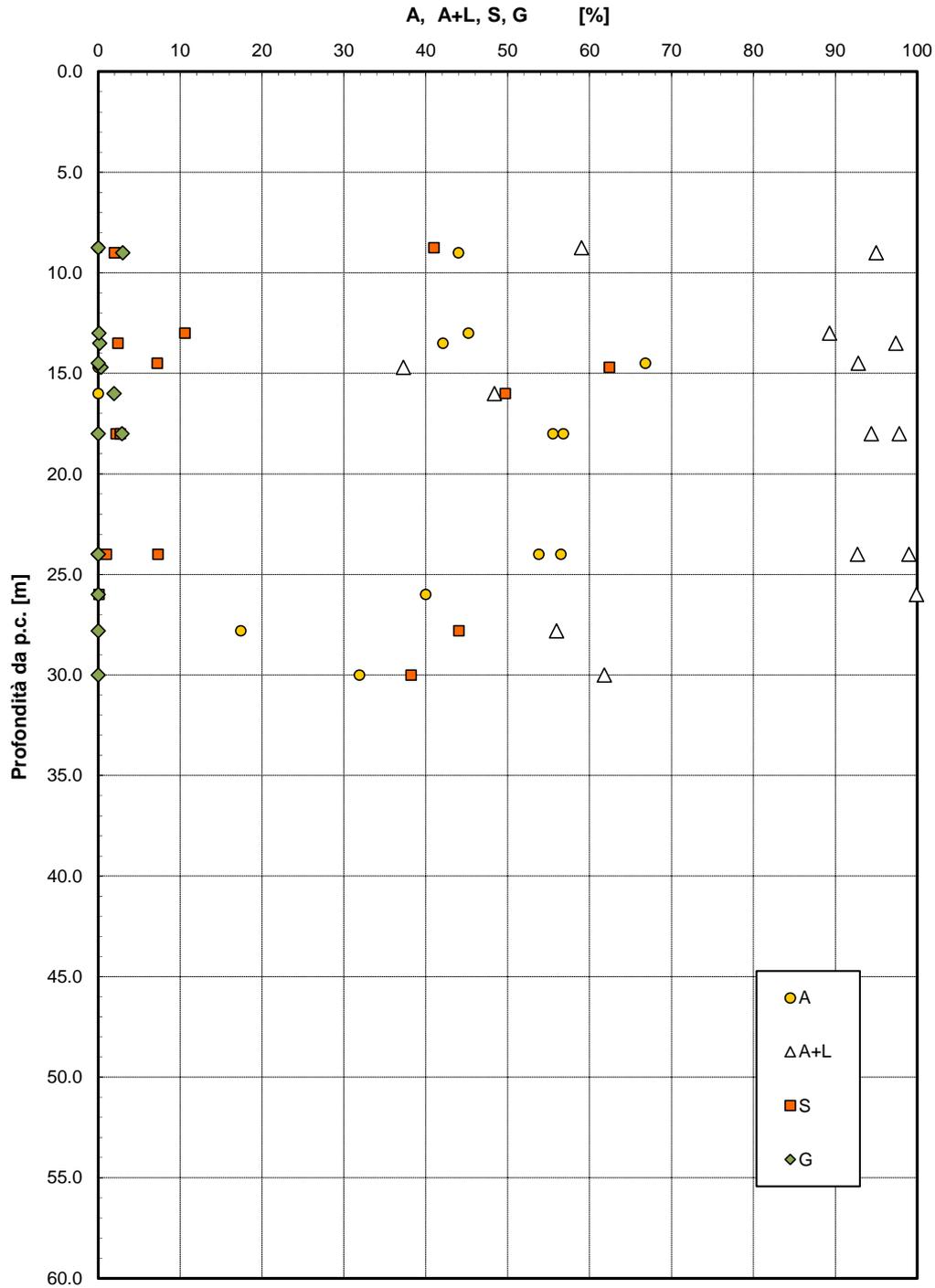


Figura 53 – Analisi granulometrica – Unità Pa

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 103 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Granulometria unità Ap

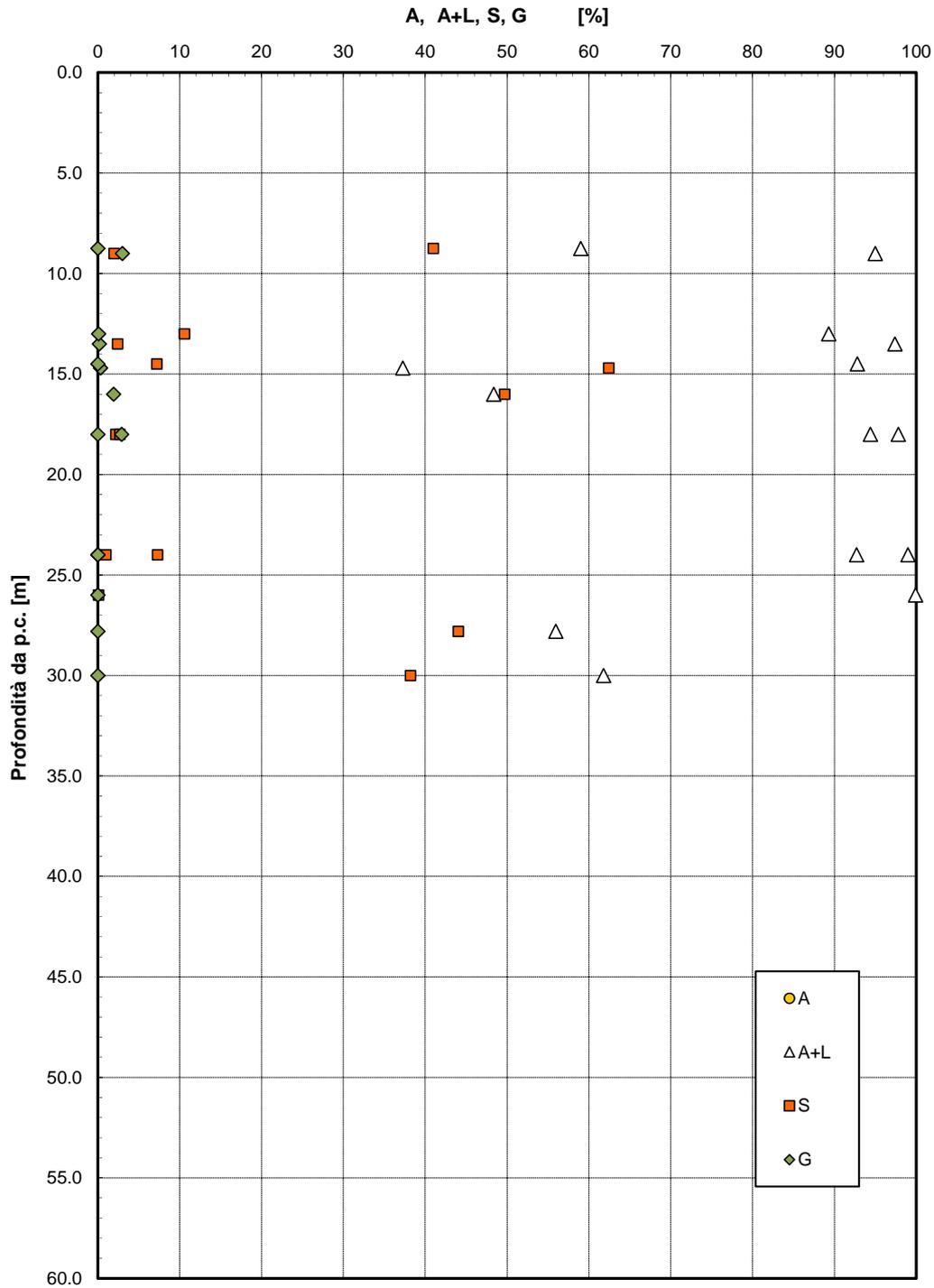


Figura 54- Analisi granulometrica - Unità Ap

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 104 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

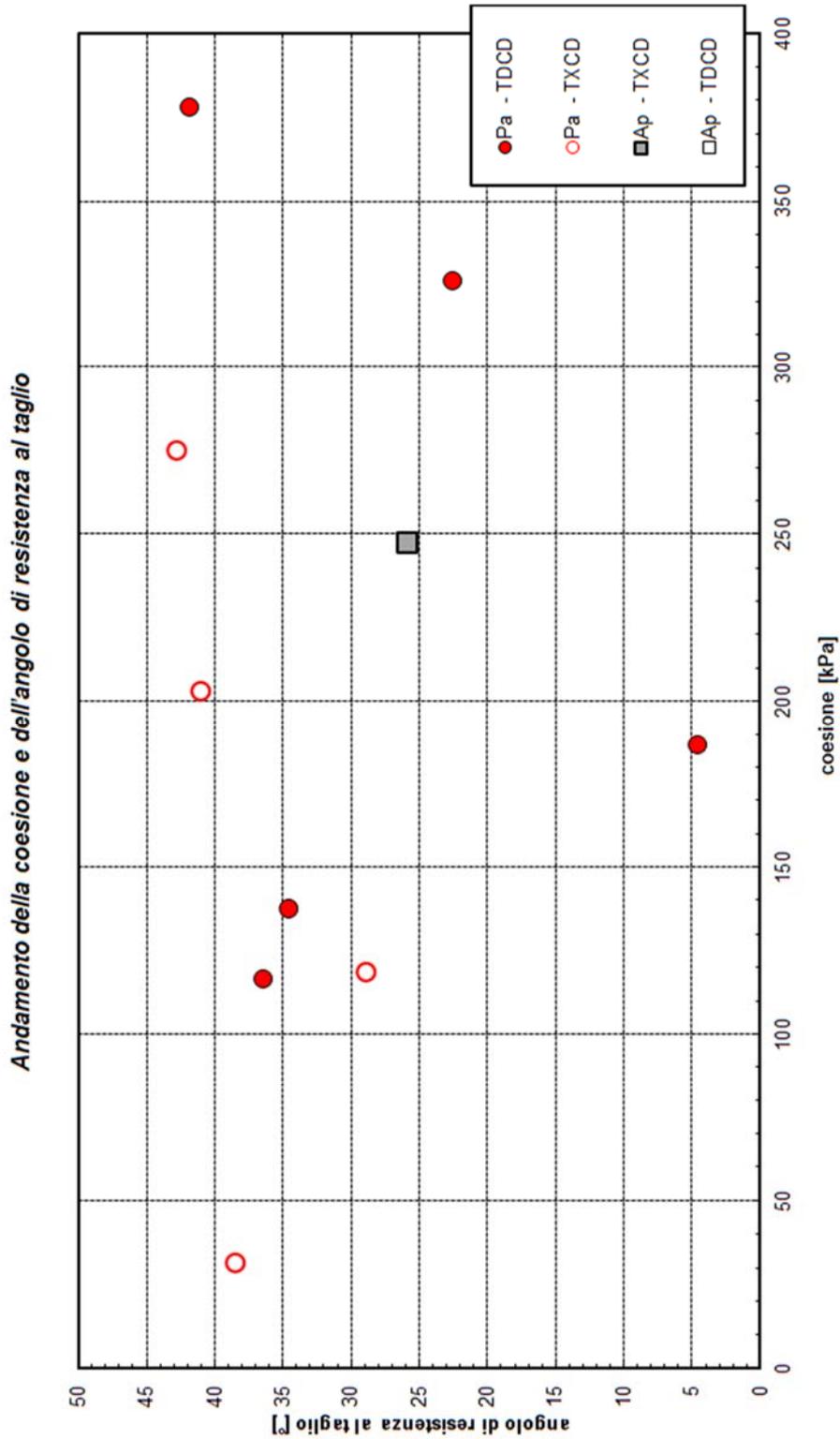


Figura 55 – Grafico correlazione c' e  $\phi'$  – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 105 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Andamento della coesione con la profondità

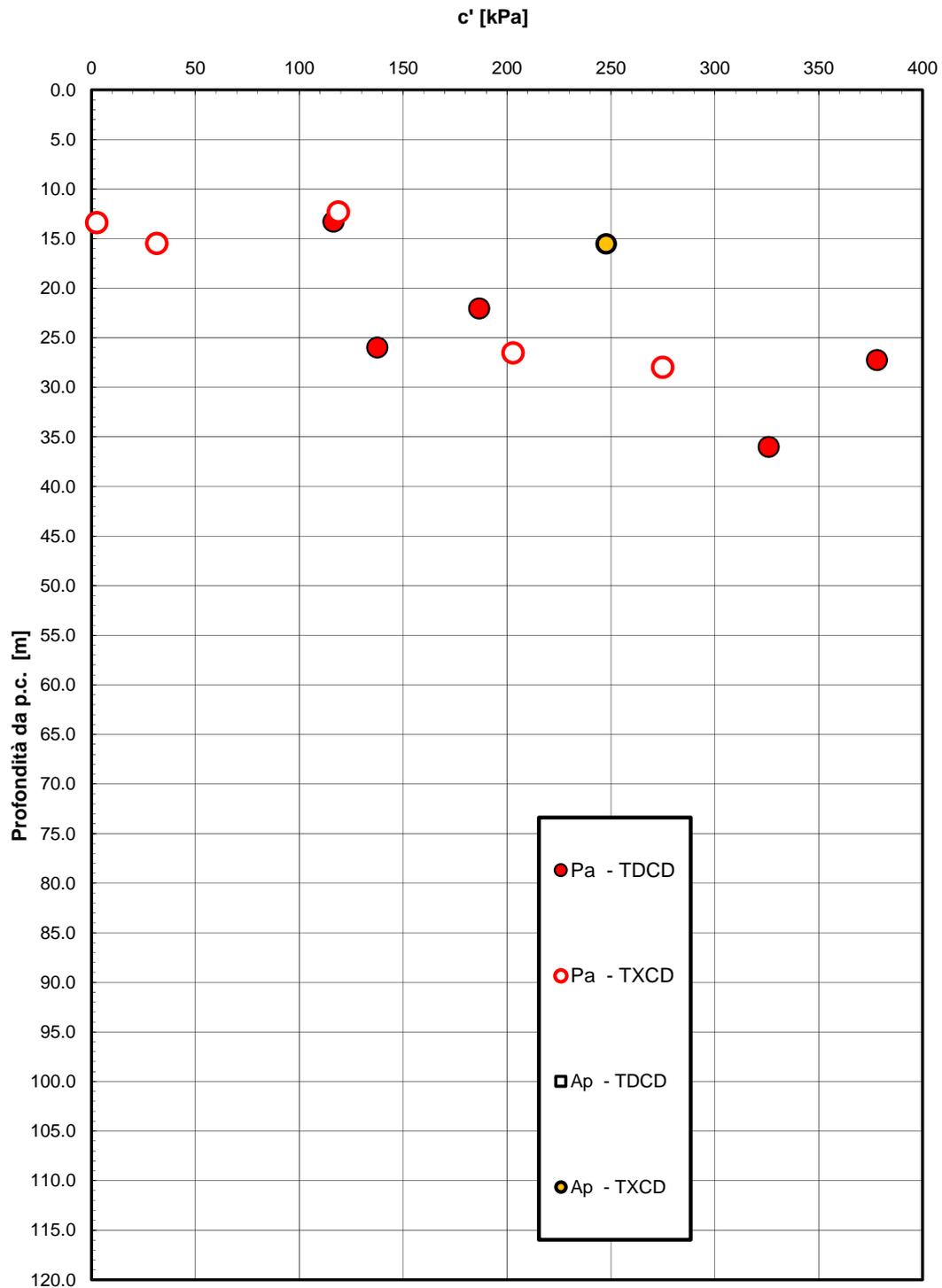


Figura 56 - Andamento della coesione con la profondità – Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 106 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Andamento della resistenza al taglio con la profondità**

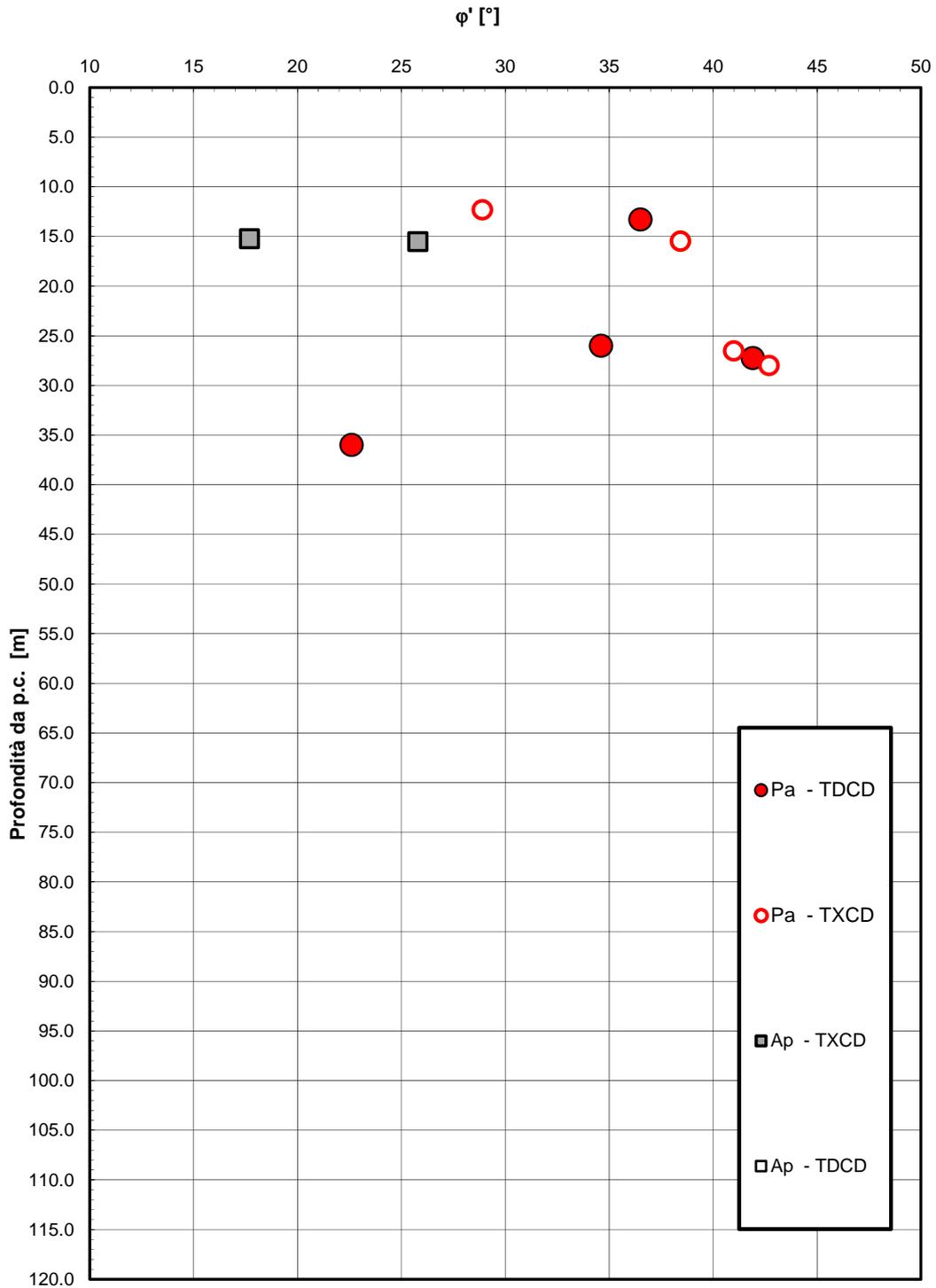


Figura 57 – Andamento dell'angolo di resistenza al taglio con la profondità – Unità Ap e Pa (dal lotto 2)

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 107 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

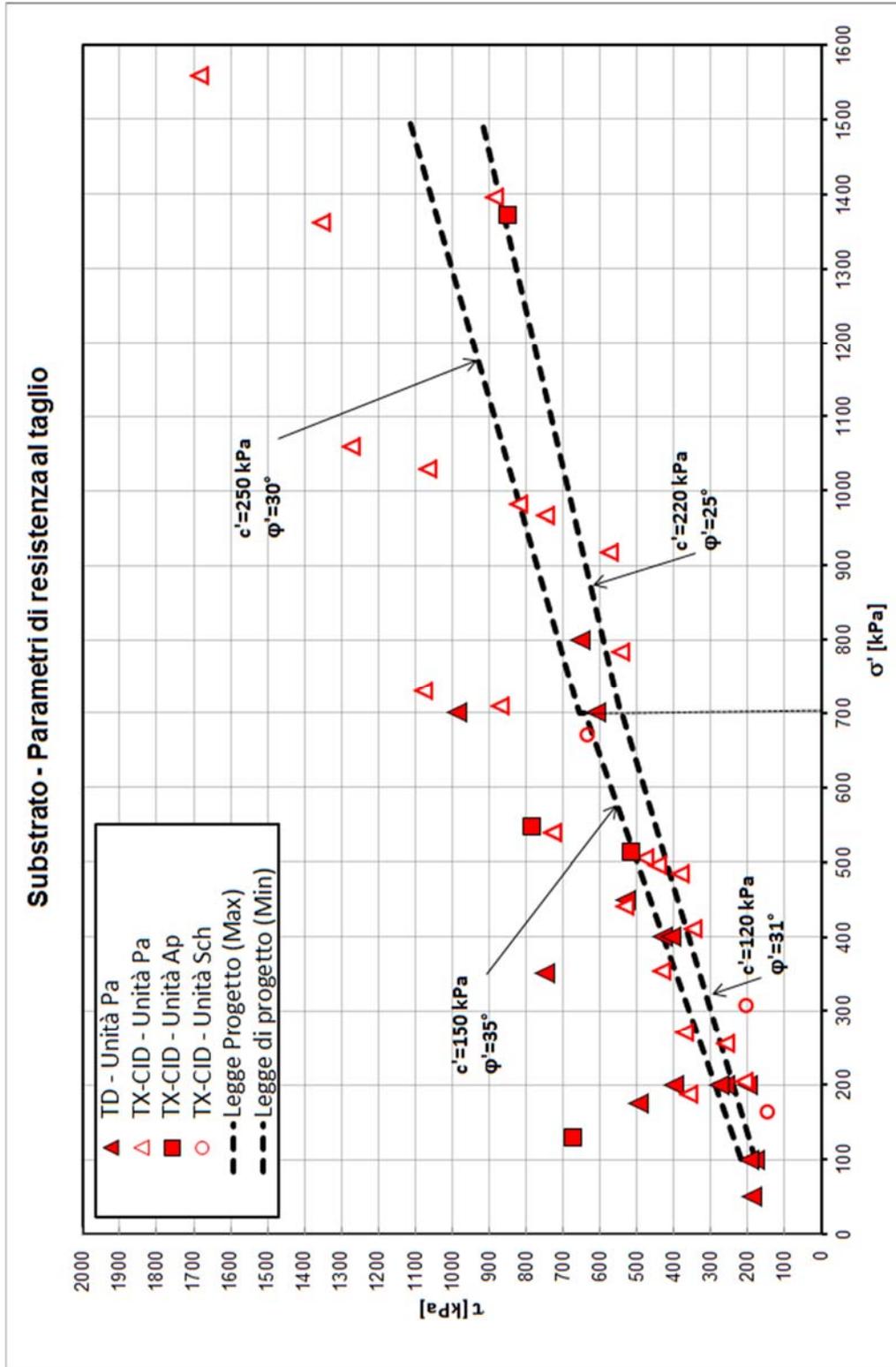


Figura 58 - Parametri di resistenza substrato pelitico arenaceo - Unità Pa e Ap (dal lotto 2)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 108 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Resistenza a compressione monoassiale**

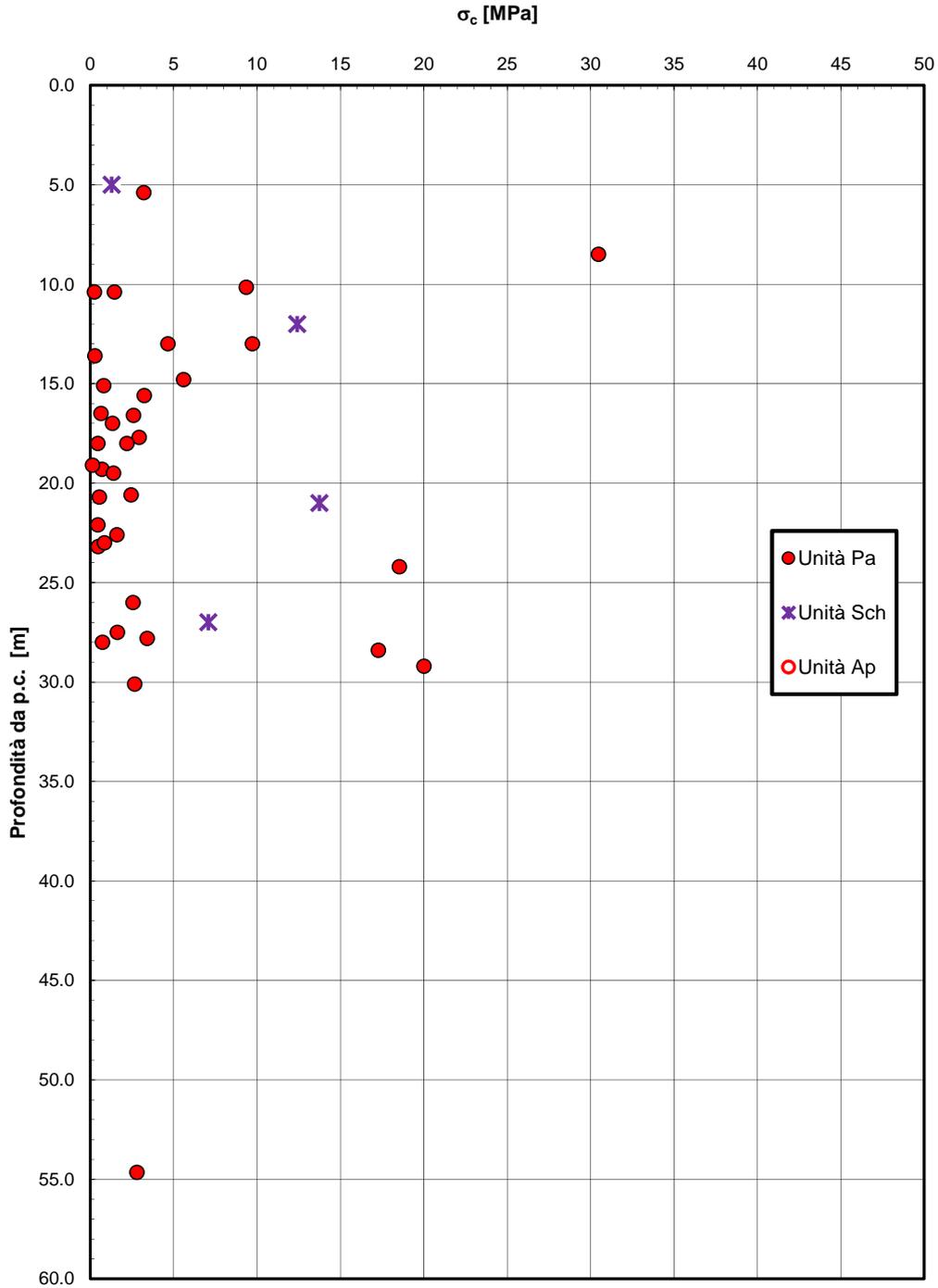


Figura 59 – Resistenza a compresione monoassiale – Unità Pa, Ap, Sch

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 109 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

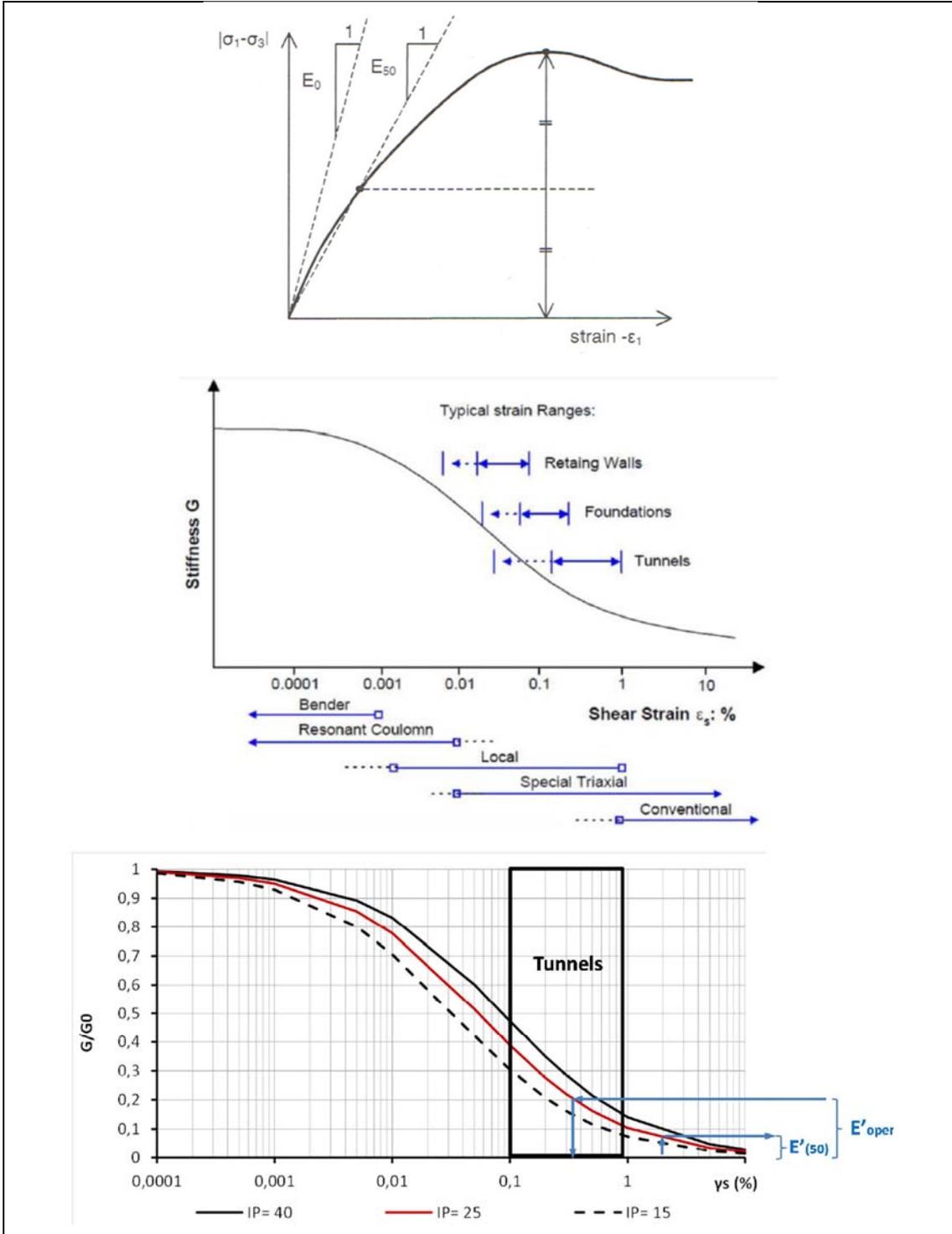


Figura 60 – Definizione di  $E_{50}$  e Curve di decadimento del modulo

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 110 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Modulo di deformazione elastico operativo - substrato**

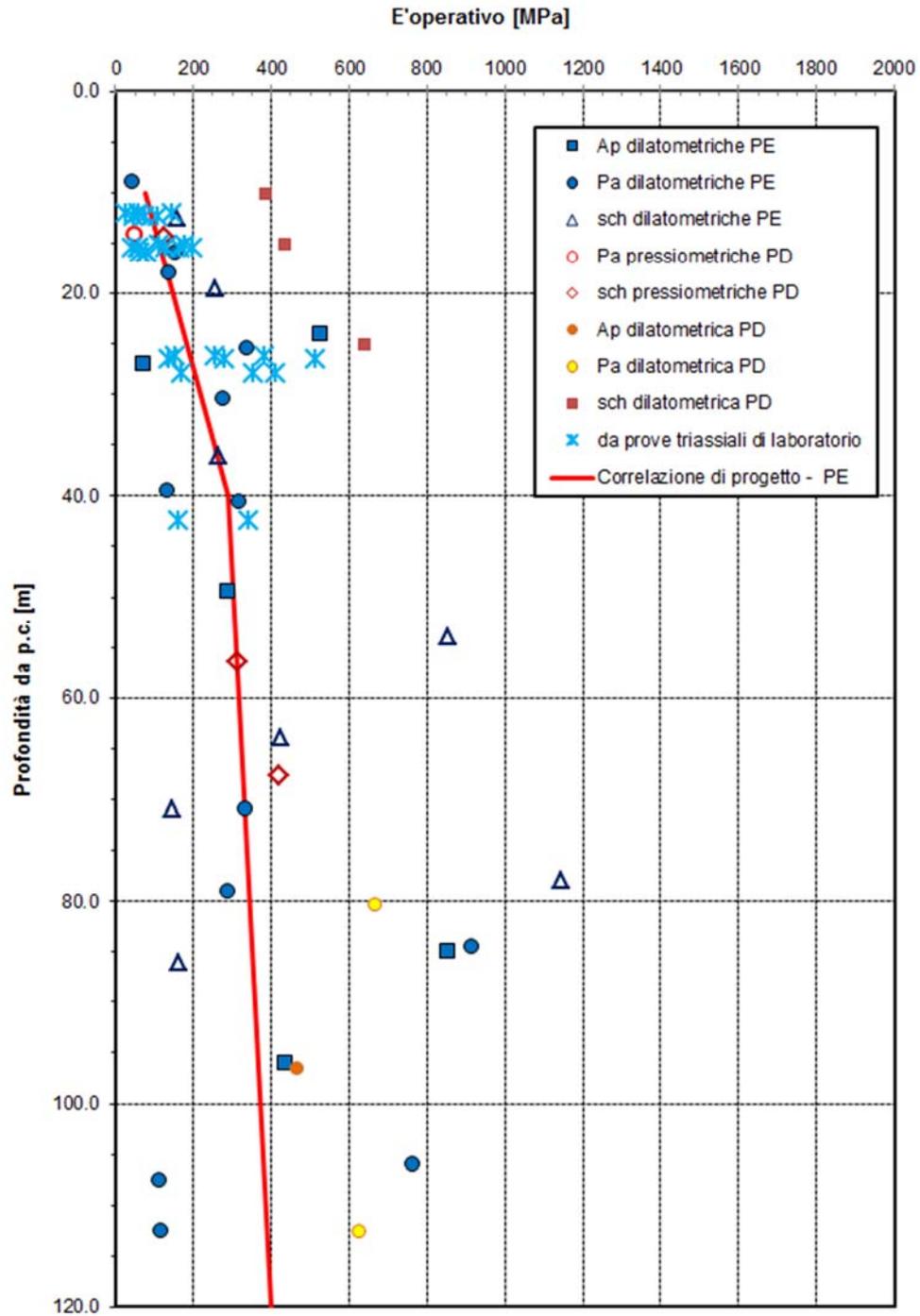


Figura 61 – Modulo di deformazione elastico operativo – Unità Pa, Ap, Sch (dal lotto 2)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 111 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Peso di volume

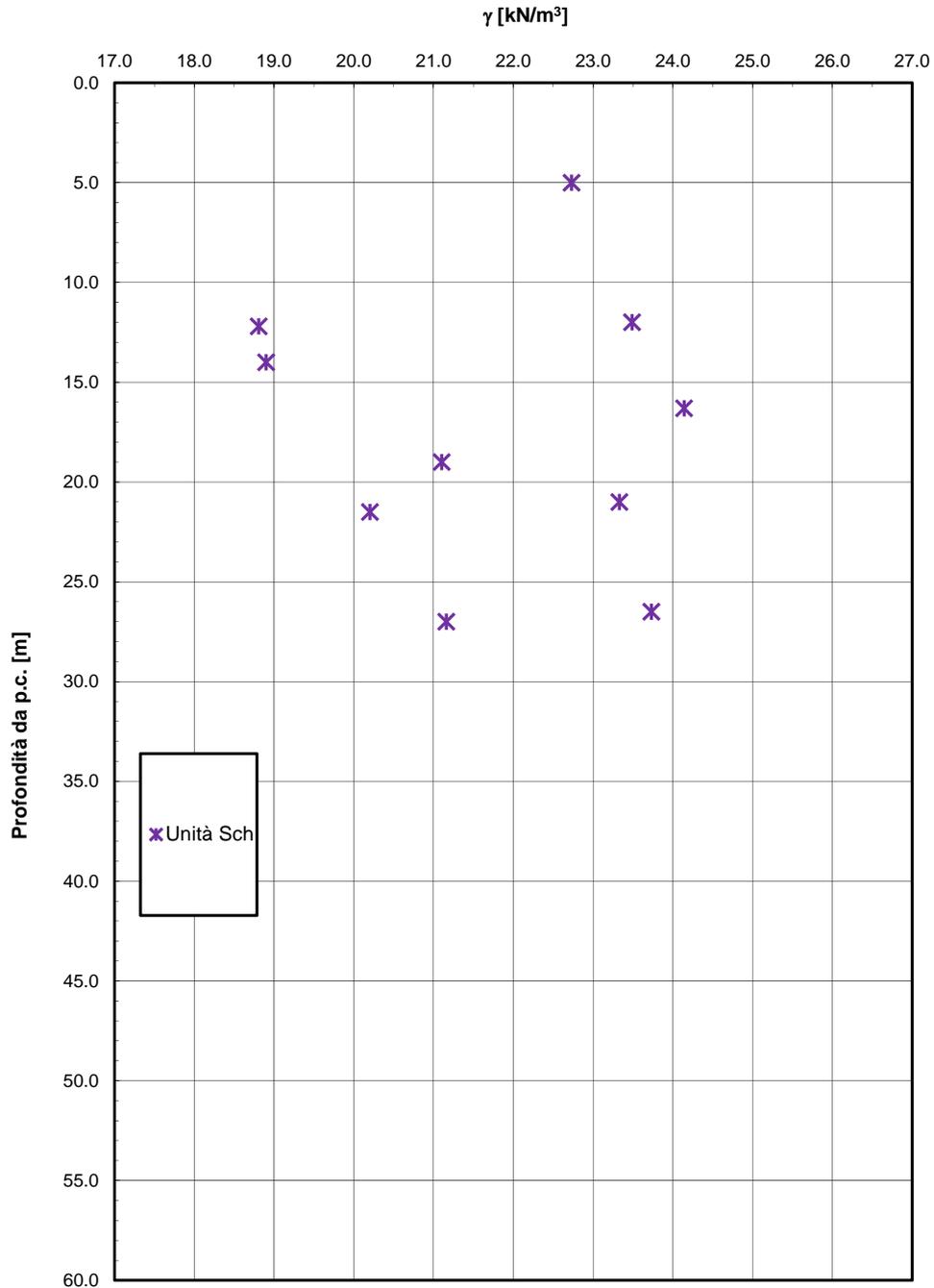


Figura 62 – Peso di volume naturale – Unità Sch

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 112 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

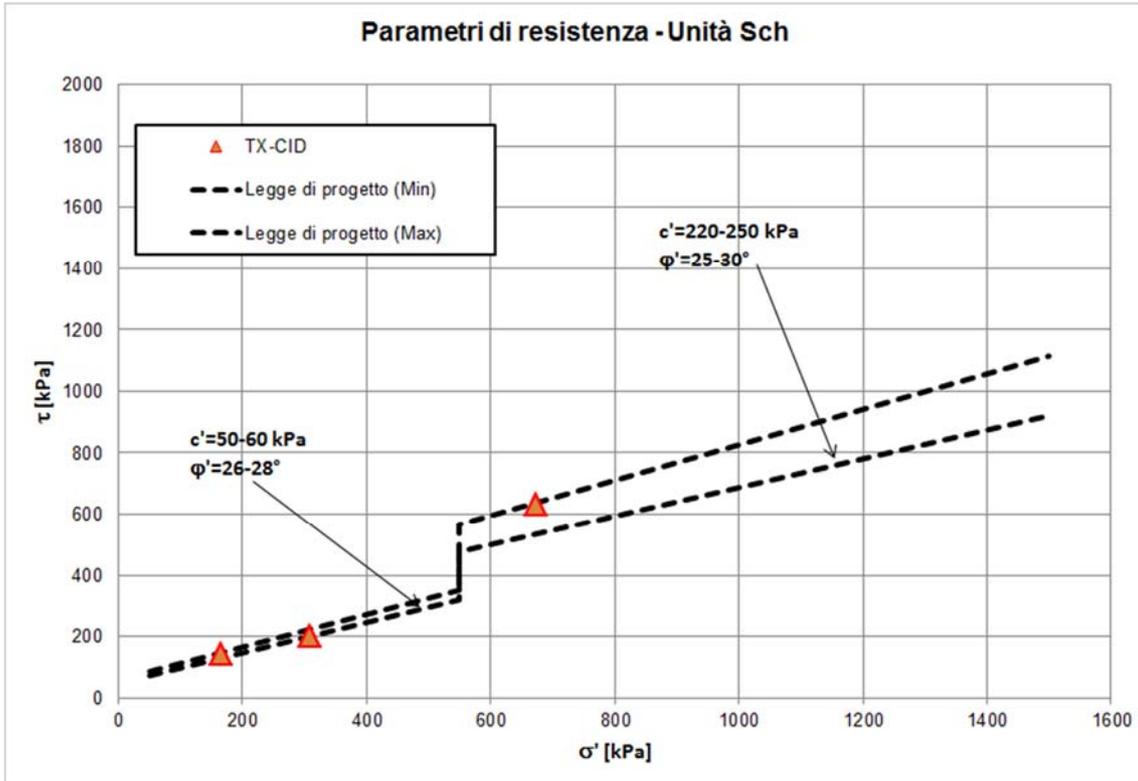


Figura 63 – Parametri di resistenza formazione Schlier- unità Sch (dal lotto 2)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 113 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### 5.13 FALDA

Nel profilo stratigrafico longitudinale è stato rappresentato il livello di falda massimo lungo il tracciato, desunto dalle letture piezometriche a disposizione. AL momento della stesura del presente elaborato, per le strumentazioni installate nella campagna del 2017, non si hanno ancora letture a disposizione.

I sondaggi (S31, S32, S33, S34, BH17 e BH18) e la penetrometria 24 individuano terreni a permeabilità alta e medio-alta e formazioni rocciose a permeabilità bassa. I dati piezometrici vengono riportati nella tabella a seguire:

Sondaggio n°	Tipo Piezometro	Profondità installazione (m)	Data	Livello falda (m da p.c.)
31	tubo aperto	35	02.12.02	13.41
31	tubo aperto	35	13.12.02	13.11
31	tubo aperto	35	11.01.03	10.45
31	tubo aperto	35	25.01.03	10.11
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
34	tubo aperto	30	13.12.02	7.86
34	tubo aperto	30	11.01.03	6.48
34	tubo aperto	30	25.01.03	6.43
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
BH12	tubo aperto	25	29.12.04	4.72

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 114 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Dal sondaggio 36 e dalla prova penetrometrica 25 si denotano terreni con alta permeabilità; inoltre risulta un livello di falda pari a 1.5m. A seguire si riportano i valori piezometrici del sondaggio 36.

Sondaggio n°	Tipo piezometro	Profondità installazione(m)	data	livello falda (m)
36	tubo aperto	30	25/11/2002	1.2
36	tubo aperto	30	30/11/2002	1.35
36	tubo aperto	30	13/12/02	0.96**
36	tubo aperto	30	11/1/2003	0.97
36	tubo aperto	30	25/1/2003	1.21

\*\* pozzetto con acqua, con tracce di esondabilità del fosso limitrofo.

Le prove penetrometriche effettuate (P26, P27, P28 e P29) mettono in risalto la presenza di materiali da permeabili a molto permeabili. La prova 28 individua il livello freatico a 6,2 m, mentre la 29 a 4,8 m. La penetrometria 29 indica il livello di falda ad una profondità di 4,8m.

Sondaggio n°	Tipo piezometro	Profondità installazione(m)	data	livello falda (m)
40	tubo aperto	30	18/11/2002	3.68
40	tubo aperto	30	22/11/2002	3.55
40	tubo aperto	30	28/11/2002	3.6
40	tubo aperto	30	2/12/2002	3.62
40	tubo aperto	30	13/12/2002	2.5
40	tubo aperto	30	11/1/2003	2.85
40	tubo aperto	30	25/1/2003	3.21
41	tubo aperto	30	2/12/2002	1.38
41	tubo aperto	30	13/12/2002	0.61**
41	tubo aperto	30	11/1/2003	0.73
41	tubo aperto	30	25/1/2003	0.74

\*\* pozzetto con acqua, con tracce di esondabilità del fosso limitrofo.

Seguono i valori di falda misurati in corrispondenza del sondaggio 53:

Sondaggio n°	Tipo piezometro	Profondità installazione(m)	data	livello falda (m)
53	tubo aperto	35	2/12/2002	8.82
53	tubo aperto	35	13/12/2002	4.44
53	tubo aperto	35	11/1/2003	4.37
53	tubo aperto	35	25/1/2003	6.64

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 115 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 6. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

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

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

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale  $F_0$ , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale  $T_c^*$ ;
- per diverse probabilità di superamento in 75 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 45 e 1462 anni, estremi inclusi.

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

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

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

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

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

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

Per il tracciato in progetto si assume:  $V_N=50$  anni e  $C_U=1.5$  (classe d'uso III).

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

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

dove  $S_S$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica.

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

### 6.1 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

La classificazione della categoria di sottosuolo viene eseguita sulla base di misure dirette

## 2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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

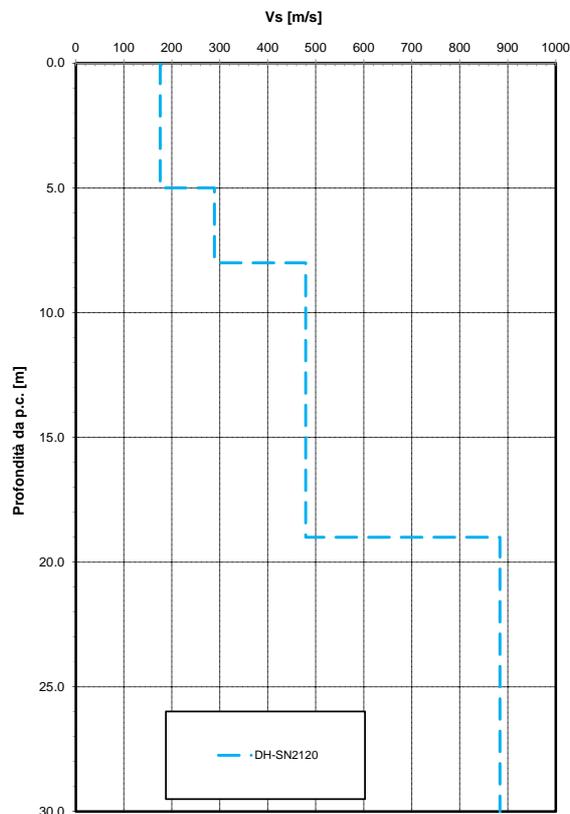
Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 116 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità  $V_{s,30}$ . Si può ricavare il parametro  $V_{s,30}$  mediante la relazione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Lungo il tracciato non sono disponibili indagini sismiche per la misura delle onde di taglio, comunque in base ai valori  $c_u$  e  $N_{spt}$  e dalla correlazione con la prova sismica Down-Hole eseguita sul precedente lotto 2 ( $V_{s,30} = 426.88$  m/s, cat C, vedasi grafico seguente) che ha le stesse formazioni geologico-geotecniche (quindi del tutto assimilabile per la caratterizzazione geotecnica) si possono trarre le stesse conclusioni per la categoria di sottosuolo C. La prova è stata eseguita in una zona con terreno eluvio-colluviale di spessore 10 m circa e poi substrato alterato fino a 13 m e a seguire substrato pelitico arenaceo (Formazione di Camerino). Gran parte del tracciato si sviluppa su coperture eluvio-colluviali o alluvionali con spessori simili (talvolta minori) che sovrastano il substrato pelitico/arenaceo di base rappresentato dalla formazione di Camerino o dalla formazione dello Schilier o pelitico gessosa/ solfifera. Quindi per le gallerie naturali si conferma la categoria di sottosuolo B; mentre altrove dove le coperture raggiungono spessori anche di 16 m di depositi alluvionali e/o eluvio colluviali coesivi si assume cautelativamente categoria di sottosuolo sismica tipo C.

Velocità delle onde di taglio da prova sismica DH



Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 117 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	--------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 6.2 AZIONI SISMICHE DI PROGETTO

Per il sito in esame, sulla base di quanto riportato nei capitoli precedenti, si ha:

- accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a  $a_{max} = 0.250$  g per zona con categoria tipo B.
- accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a  $a_{max} = 0.288$  g per zona con categoria tipo C.

Tabella 18 – Localizzazione sito

FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE:  LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE:  PROVINCIA:  COMUNE:

**Elaborazioni grafiche**

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

---

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

Sito esterno al reticolo

Interpolazione su 3 nodi

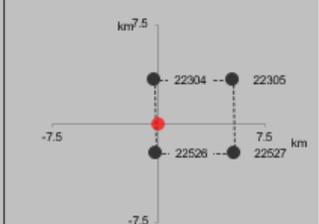
Interpolazione corretta

Interpolazione



La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

Nodi del reticolo intorno al sito



INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 118 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_N$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $C_U$   info

#### Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

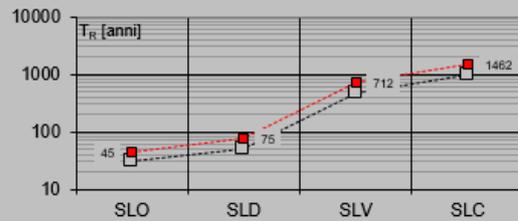
Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

Stati limite di esercizio - SLE	SLO - $P_{V_R} = 81\%$	<input type="text" value="45"/>
	SLD - $P_{V_R} = 63\%$	<input type="text" value="75"/>
Stati limite ultimi - SLU	SLV - $P_{V_R} = 10\%$	<input type="text" value="712"/>
	SLC - $P_{V_R} = 5\%$	<input type="text" value="1462"/>

#### Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

#### Strategia di progettazione



#### LEGENDA GRAFICO

- Strategia per costruzioni ordinarie
- .....■..... Strategia scelta

INTRO

FASE 1

**FASE 2**

FASE 3

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 119 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Tabella 19 – Parametri dello spettro di risposta orizzontale allo SLV – categoria sismica tipo B**

FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

**Stato Limite**  
 Stato Limite considerato SLV info

**Risposta sismica locale**  
 Categoria di sottosuolo B info       $S_s =$  1.190       $C_c =$  1.371 info  
 Categoria topografica T1 info       $h/H =$  0.000       $S_T =$  1.000 info  
(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

**Compon. orizzontale**  
 Spettro di progetto elastico (SLE)      Smorzamento  $\xi$  (%) 5       $\eta =$  1.000 info  
 Spettro di progetto inelastico (SLU)      Fattore  $q_0$  3      Regol. in altezza no info

**Compon. verticale**  
 Spettro di progetto      Fattore  $q$  1.5       $\eta =$  0.667 info

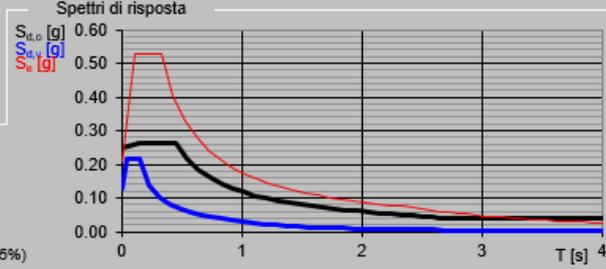
**Elaborazioni**  
 Grafici spettri di risposta ▶▶▶  
 Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

— Spettro di progetto - componente orizzontale

— Spettro di progetto - componente verticale

— Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1,  $\xi = 5\%$ )

**Spettri di risposta**



$S_{a,0}$  [g]  
 $S_{a,v}$  [g]  
 $S_e$  [g]

T [s]

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

### Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
$a_0$	0.208 g
$F_0$	2.534
$T_C$	0.333 s
$S_s$	1.190
$C_c$	1.371
$S_T$	1.000
$q$	2.400

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 120 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Tabella 20 – Parametri dello spettro di risposta orizzontale allo SLV – categoria sismica tipo C

### FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

**Stato Limite**  
 Stato Limite considerato **SLV** ▼ info

**Risposta sismica locale**

Categoria di sottosuolo <b>C</b> <span style="font-size: small;">▼ info</span>	S <sub>s</sub> = <input type="text" value="1.384"/>	C <sub>c</sub> = <input type="text" value="1.510"/> <span style="font-size: small;">▼ info</span>
Categoria topografica <b>T1</b> <span style="font-size: small;">▼ info</span>	h/H = <input type="text" value="0.000"/>	S <sub>T</sub> = <input type="text" value="1.000"/> <span style="font-size: small;">▼ info</span>

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

**Compon. orizzontale**

Spettro di progetto elastico (SLE)      Smorzamento  $\xi$  (%)        $\eta$  =  ▼ info

Spettro di progetto inelastico (SLU)      Fattore q<sub>0</sub>       Regol. in altezza **no** ▼ info

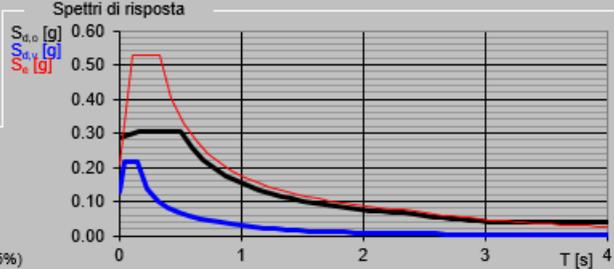
**Compon. verticale**  
 Spettro di progetto      Fattore q        $\eta$  =  ▼ info

**Elaborazioni**

Grafici spettri di risposta ▶▶▶

Parametri e punti spettri di risposta ▶▶▶

**Spettri di risposta**



— Spettro di progetto - componente orizzontale  
 — Spettro di progetto - componente verticale  
 — Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1,  $\xi$  = 5%)

INTRO	FASE 1	FASE 2	FASE 3
-------	--------	--------	--------

### Parametri indipendenti

<b>STATO LIMITE</b>	<b>SLV</b>
a <sub>0</sub>	0.208 g
F <sub>0</sub>	2.534
T <sub>c</sub>	0.333 s
S <sub>s</sub>	1.384
C <sub>c</sub>	1.510
S <sub>T</sub>	1.000
q	2.400

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 121 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### 6.3 LIQUEFAZIONE

Le NTC08 al paragrafo 7.11.3.4.2 affermano che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

- Eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field minori di 0.1 g;
- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in tabella seguente nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  e nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$  (vedasi figure seguenti).

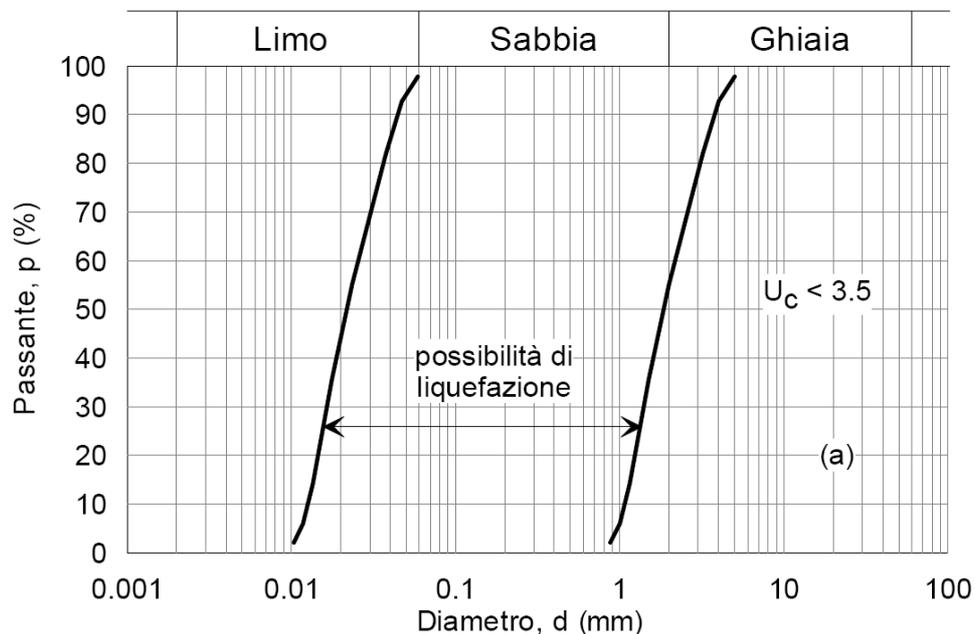
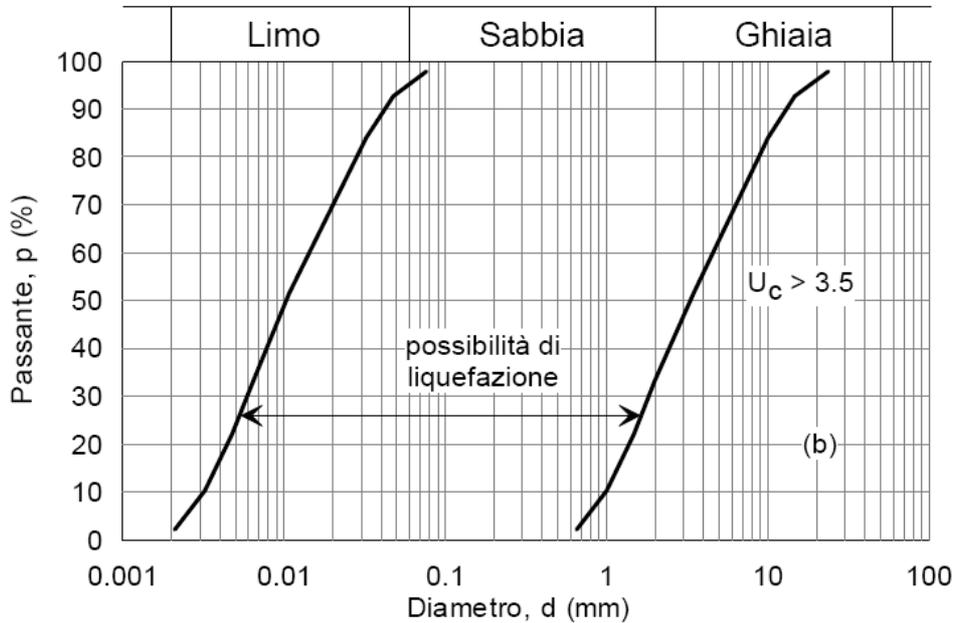


Figura 64 - Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c < 3.5$

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 122 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------



**Figura 65- Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c > 3.5$**

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

- l'evento sismico atteso è di magnitudo  $M$  pari a 6.37;
- le accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field sono 0.25 per le opere in categoria sottosuolo B e 0.288 per quelle in categoria C;
- la profondità della falda è variabile da p.c. fino a 10-15 m di profondità;
- non sono presenti strati/lenti di sabbie fini e/o sabbie limose con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} < 30$ .

Lungo il tracciato generalmente i terreni in fondazione sono costituiti depositi eluvio-colluviali coesivi o alluvioni incoerenti prevalentemente ghiaiose con spessori medi intorno ai 10 m fino ad un massimo di 20 m, che sovrastano il substrato pelitico arenaceo della formazione di Camerino e della formazione dello Schilier. Data la natura o prevalentemente coesiva e consistente dei depositi fini e prevalentemente grossolana delle alluvioni incoerenti, è possibile escludere a priori il rischio di potenziale liquefazione dei terreni.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 123 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 7. METODOLOGIE DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE PALI

Nel presente paragrafo si riportano le metodologie di calcolo della capacità portante per i pali trivellati di grande diametro previsti in progetto e per i pali dei muri andatori.

### 7.1 ANALISI AGLI STATI LIMITE

Le verifiche di capacità portante dei pali vengono svolte secondo la metodologia degli stati limite ultimi, in accordo alla normativa vigente (DM 14/01/2008. "Norme tecniche per le costruzioni"). La verifica della capacità portante dei pali è soddisfatta se:

$$F_{cd} < R_{cd}$$

essendo

$$R_{cd} = R_k / \gamma_R$$

dove:

$F_{cd}$  = carico assiale di compressione di progetto;

$R_{cd}$  = capacità portante di progetto nei confronti dei carichi assiali;

$R_k$  = valore caratteristico della capacità portante limite del palo.

In particolare le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vengono condotte con riferimento ad almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

Combinazione 1: A1 + M1 + R1

Combinazione 2: A2 + M1 + R2

Approccio 2:

Combinazione 1: A1 + M1 + R3

tenendo conto dei coefficienti parziali di riferimento normativo.

La resistenza di progetto a compressione  $R_{c,d}$  è calcolata applicando al valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  i coefficienti parziali  $\gamma_R$  riportati in tabella seguente, relativi alla condizione di pali trivellati. Il valore caratteristico della resistenza  $R_{c,k}$  a compressione è ottenuto applicando i fattori di correlazione  $\xi_3$  e  $\xi_4$  (vedasi tabella seguente) alle resistenze di calcolo  $R_{c,d}$ ; tali fattori sono funzione del numero di verticali d'indagine rappresentative.

Per ogni opera verrà assunto un coefficiente  $\xi_3$  in funzione delle verticali di indagine eseguite. Nella tabella si riassumono i fattori di sicurezza assunti per ciascuna opera d'arte principale.

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 124 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Ponte/viadotto	n. verticali indagini di riferimento	$\xi_3$	FSB = $\xi_3 \gamma_b$	FSL = $\xi_3 \gamma_s$
Viadotto Pagliano	2	1.65	2.2	1.9
Ponte Faranghe	2	1.65	2.2	1.9
Viadotto Esino	3	1.60	2.16	1.8
Ponte Fratte	2	1.65	2.2	1.9
Ponte Mistriano	2	1.65	2.2	1.9
Cavalcavia CV04	2	1.65	2.2	1.9

In condizioni sismiche le verifiche di capacità portante dei pali agli stati limite ultimi (SLU) vanno condotte con riferimento all'Approccio 2 (A1+M1+R3), tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nella successiva tabella e ponendo i coefficienti parziali sulle azioni tutti pari all'unità.

**Tabella 21 - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche**

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
		(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Base	$\gamma_R$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale (*)	$\gamma_t$	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25	1,0	1,6	1,25

(\*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t,cal})_{media}}{\xi_3}, \frac{(R_{t,cal})_{min}}{\xi_4} \right\}$$

**Tabella 22 - Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine**

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
$\xi_4$	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 125 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 7.2 METODOLOGIA DI CALCOLO CAPACITÀ PORTANTE AI CARICHI VERTICALI

La portata di progetto di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) "Qd" può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_{ll} / FSL + Q_{bl} / FSB - W'p$$

dove:

$Q_{ll}$  = portata laterale limite,

$Q_{bl}$  = portata di base limite,

$W'p$  = peso efficace del palo (al netto del peso del terreno asportato),

FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale ( $=\xi_3 \cdot \gamma_s$ ).

FSB = fattore di sicurezza per la portata di base ( $=\xi_3 \cdot \gamma_b$ ).

### 7.2.1 Portata laterale

La portata laterale limite viene valutata con la seguente relazione:

$$Q_{ll} = \pi \cdot D \cdot \sum_i (\tau_i \cdot h_i)$$

dove:

D = diametro palo,

$\tau_i$  = tensione di adesione laterale limite nello strato i-esimo,

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo.

### Depositi incoerenti

Per i depositi incoerenti, la tensione tangenziale ultima lungo il fusto del palo, in accordo ad esempio a Burland [1973], Reese & O'Neill [1988], Chen & Kulhawy [1994], O'Neill & Hassan [1994], può essere valutata con riferimento alla seguente espressione:

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'_v \leq \tau_{l,max}$$

dove:

$\sigma'_v$  = tensione verticale efficace litostatica,

$\tau_{l,max}$  = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 150 kPa per terreni incoerenti).

$\beta$  = coefficiente empirico che viene valutato pari a  $\beta = k \cdot \tan \phi$ , essendo

k = coefficiente di pressione laterale = 0.7 (a compressione) 0.5 (a trazione);

$\phi$  = angolo di resistenza al taglio.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 126 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### Depositi coesivi

Per i terreni coesivi alluvionali (unità Ala), la tensione tangenziale può essere valutata con la seguente espressione:

$$\tau_i = \alpha \cdot c_u \leq \tau_{l,max}$$

Dove:

$c_u$  = resistenza al taglio in condizioni non drenate

$\alpha$  = parametro empirico assunto come da AGI:

$$\alpha = 0.90 \quad \text{per } c_u \leq 25 \text{ kPa};$$

$$\alpha = 0.80 \quad \text{per } 25 \leq c_u \leq 50 \text{ kPa};$$

$$\alpha = 0.60 \quad \text{per } 50 \leq c_u \leq 75 \text{ kPa};$$

$$\alpha = 0.40 \quad \text{per } c_u \geq 75 \text{ kPa}.$$

$\tau_{l,max}$  = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 100 kPa per i depositi alluvionali coesivi).

Per le argille limose consistenti di alterazione del substrato (unità Salt) la tensione tangenziale può essere valutata con la correlazione di Burland (1993):

$$\tau_i = \beta \cdot \sigma'_v \leq \tau_{l,max}$$

Dove

$$\beta = 0.1 + 0.4 \cdot c_u / \sigma'_v \quad (\text{con } \beta > 0.23, \text{ AGI dicembre 1984}).$$

$c_u$  = resistenza al taglio in condizioni non drenate

$\tau_{l,max}$  = valore massimo dell'adesione laterale limite palo-terreno (pari a 120 kPa per terreni coesivi di alterazione del substrato - unità Salt).

### Substrato pelitico arenaceo

Per il substrato pelitico arenaceo di base (unità Pa/Ap – Formazione di Camerino, unità Sch – Formazione dello Schlier) la portata laterale viene definita in funzione della resistenza a compressione monoassiale media dell'ammasso, in accordo alla seguente relazione (Horvath, 1978; Rosenberg & Journeaux, 1976; Williams & Pells, 1981):

$$\tau_{s,lim} = \alpha \cdot \beta \cdot \sigma_c$$

essendo:

$\alpha \cdot$  = coefficiente empirico ricavabile da figura seguente;

$\beta \cdot$  = coefficiente empirico ricavabile da figura seguente;

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 127 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$\sigma_c$  = resistenza a compressione semplice della roccia intatta

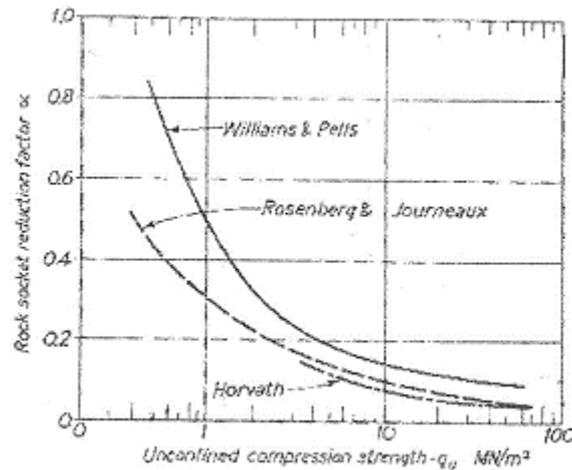
Inoltre i valori del parametro J della figura seguente possono essere ricavati dalla seguente tabella.

In particolare per i depositi del substrato, alle profondità di riferimento dei sondaggi dei ponti/viadotti in esame, si è valutata una resistenza a compressione media di 1 MPa per unità Pa/Ap e 0.6 per unità Sch. Quindi si assume:

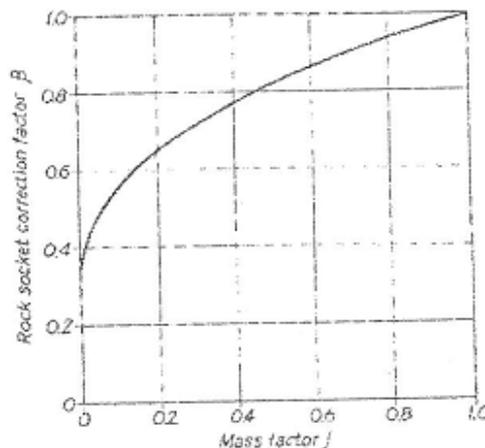
unità Pa/Ap:  $\tau_i = 150$  kPa per  $z < 15$  m,  $\tau_i = 170$  kPa per  $z > 15$  m

unità Sch:  $\tau_i = 130$  kPa per  $z < 15$  m,  $\tau_i = 150$  kPa per  $z > 15$  m

(dove z è la profondità da p.c.). Comunque è stato sempre considerato uno spessore minimo di 3 m con i parametri minimi.



**Figura 66 - Fattore di riduzione  $\alpha$  per la valutazione della resistenza di attrito laterale limite di pali trivellati in roccia (Tomlinson, 1994)**



**Figura 67 - Fattore di riduzione  $\beta$  per la valutazione della resistenza di attrito laterale limite di pali trivellati in roccia (Tomlinson 1994, Williams & Pells 1981)**

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 128 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Tabella 23 – Criteri per la valutazione del parametro J (Tomlinson 1994 e Hobbs 1975)**

RQD (%)	Frequenza delle discontinuità per metro	Fattore J
0÷25	15	0.2
25÷50	15÷8	0.2
50÷75	8÷5	0.2÷0.5
75÷90	5÷1	0.5÷0.8
90÷100	1	0.8÷1

Nel caso in esame per le formazioni del substrato si assume  $J=0.2$ , da cui  $\beta$  pari a 0.65.

I valori massimi di portata laterale limite in roccia sono stati tarati anche sulla base di indicazioni di letteratura (vedasi Wilson 1976 per argilliti con valori di resistenza a compressione confrontabile con quella dei depositi in esame).

### 7.2.2 Portata di base

Per la valutazione della portata di base limite sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$Q_{bl} = A_p \cdot q_{bl}$$

dove:

$A_p$  = area della base del palo,

$q_{bl}$  = portata limite specifica di base.

### Depositi incoerenti

La pressione di base del palo associabile a cedimenti pari al 10% del diametro del palo, in accordo ad esempio a Gwizdala [1984], Reese & O'Neill [1988] e Matsui [1993], può essere valutata con riferimento alla seguente espressione:

$$\left(q_{ub}\right)_{\frac{s}{D}=0.1} = \left(N_{SPT}\right)_m \cdot \alpha_N \leq q_{ub\max} \text{ kPa}$$

essendo:

$\alpha_N$  = coefficiente empirico riportato nella seguente tabella;

$q_{ub\max}$  = pressione ultima di base massima consigliabile, vedasi seguente tabella;

$(NSPT)_m$  = valore di NSPT medio su un tratto pari a  $1.5 \cdot D$  al di sopra e al di sotto della base del palo.

**Tabella 24 - Valori di  $\alpha_N$  e di  $q_{ub\max}$  secondo Gwizdala [1984]**

	$\alpha_N$ (-)	$q_{ub\max}$ (KPa)
GHIAIE	150	7500

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 129 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

SABBIE	120	5800
SABBIE LIMOSE	85	4300

Nei depositi ghiaiosi in esame la portata di base è assunta cautelativamente pari a 4000 kPa.

**Depositi coesivi**

La portata di base limite nei terreni coesivi (unità Ala, unità Ecla, unità Salt) viene valutata con la seguente relazione:

$$q_b = 9 \cdot c_u + \sigma_v \quad [\text{kPa}]$$

dove:

$c_u$  = resistenza al taglio non drenata [kPa];

$\sigma_v$  = tensione totale verticale.

**Substrato pelitico arenaceo**

Per il substrato pelitico arenaceo di base (unità Pa/Ap – Formazione di Camerino, unità Sch – Formazione dello Schlier) la portata laterale viene definita in funzione della resistenza a compressione monoassiale media dell'ammasso, in accordo alla seguente relazione:

$$q_b = 2 \cdot N_\phi \cdot \sigma_c \quad (\text{Tomlinson, 1994})$$

dove:

$N_\phi$  := coefficiente dato da  $N_\phi := [\tan(45+\phi/2)]^2$

$\phi$  = angolo di resistenza al taglio del deposito

$\sigma_c$  = resistenza a compressione semplice della roccia intatta.

In particolare per i depositi del substrato, alle profondità di riferimento dei sondaggi dei ponti/viadotti in esame, si è valutata una resistenza a compressione media di 1 MPa per unità Pa/Ap e 0.6 per unità Sch.

Per i depositi in esame si assume:

unità Pa/Ap:  $q_b = 4000$  kPa per  $z < 15$  m,  $q_b = 5000$  kPa per  $z > 15$  m

unità Sch:  $q_b = 3000$  kPa per  $z < 15$  m,  $q_b = 4000$  kPa per  $z > 15$  m

(dove  $z$  è la profondità da p.c.).

**Note:**

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 130 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

La lunghezza del palo dovrà essere almeno pari a 10 volte il diametro del palo.

Il carico di progetto sul palo dovrà essere compatibile con le caratteristiche resistenti della sezione del palo.

Si verificherà inoltre che la risposta del palo in esercizio sia di tipo "elastico"; verificando un adeguato coefficiente di sicurezza sulla portata ultima per attrito laterale ( $Q_{ll}$  / FSL, con  $FS \geq 1.2$  per condizioni di carico SLE).

**7.2.3 Determinazione della resistenza di progetto a trazione**

La portata a trazione di progetto di un palo trivellato (eseguito con completa asportazione del terreno) "Qd" può essere espressa dalla seguente relazione:

$$Q_d = Q_{LL} / FSL + W'_P$$

dove:

$Q_{LL}$  = portata laterale limite (da determinarsi in conformità a quanto già descritto nel precedente paragrafo),

$W'_P$  = peso efficace del palo (alleggerito se sotto falda),

FSL = fattore di sicurezza per la portata laterale ( $= \gamma_R \cdot \xi_3$ ).

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 131 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 8. PALIFICATE DI FONDAZIONE

### 8.1 COMPORTAMENTO DEL PALO SOGGETTO AI CARICHI ORIZZONTALI – MODULO DI REAZIONE ORIZZONTALE DEL TERRENO

Lo studio dell'interazione tra palo soggetto ai carichi orizzontali ed il terreno viene effettuato ricorrendo alla teoria di Matlock e Reese che si basa sul noto modello di suolo alla Winkler (elastico-lienare), caratterizzato da un modulo di reazione orizzontale del terreno (EMR) definito come il rapporto fra la reazione del terreno per unità di lunghezza del palo ( $p$ ) ed il corrispondente spostamento orizzontale ( $y$ ):

$$E_{MR} = p / y \quad [FL^{-2}]$$

Si osservi che, definito  $K_w$  [FL<sup>-3</sup>] il coefficiente di sottofondo di Winkler, per un palo di diametro  $D$  si ha:

$$E_{MR} = K_w \cdot D$$

L'andamento del modulo di reazione orizzontale con la profondità è funzione principalmente del tipo di terreno.

Per i terreni incoerenti si assume in genere una legge di variazione lineare caratterizzata dai seguenti parametri:

$$E_{MR} = E_{MR,0} + k_h \cdot z \quad [FL^{-2}]$$

dove:

$E_{MR,0}$  = valore del modulo di reazione a testa palo;

$k_h$  = gradiente del modulo di reazione del terreno funzione principalmente della  $D_r$ ;

$z$  = profondità a partire dalla sommità del palo.

Nella seguente figura si riportano i valori di riferimento del gradiente  $k_h$  corrispondente a valori secanti del modulo EMR per pali isolati con basse deformazioni ( $y \leq 0.005 \cdot D$ ).

Per i terreni coesivi si assume in genere una legge del tipo:

$$E_{MR} = \xi \cdot c_u, \text{ con } \xi = 350,$$

corrispondenti a valori secanti del modulo EMR per pali isolati con basse deformazioni ( $y \leq 0.005 \cdot D$ ).

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 132 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Andamento del gradiente del modulo di reazione orizzontale - Terreni incoerenti sotto falda

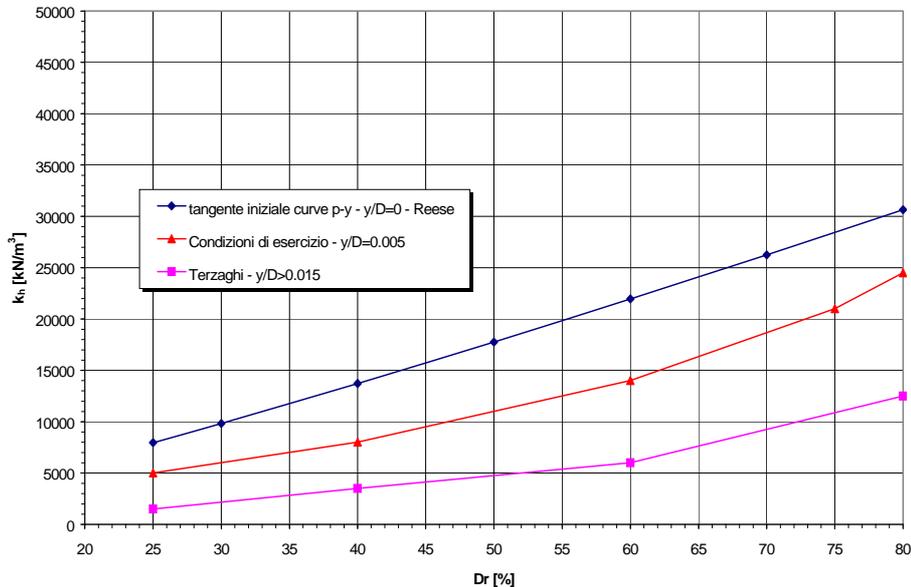


Figura 68

Per le fondazioni dei viadotti/ponti in esame si considera:

$\xi = 350$  in terreni coesivi;

$kh = 8000 \text{ kN/m}^3$  in terreni incoerenti.

## 8.2 MOMENTO ADIMENSIONALE LUNGO IL PALO

Nel caso in esame, considerando l'andamento del modulo di reazione orizzontale palo-terreno ( $E_{MR}$ , definito al precedente paragrafo), si ricorre al metodo degli elementi finiti (Matlock e Reese, 1956), adimensionalizzando la soluzione come segue:

$$M_0 = \alpha_m \cdot H_0$$

$$M(z) = M_0 \cdot M_{ad}(z)$$

essendo:

$H_0$  = azione tagliante in testa palo [F];

$M_0$  = azione flettente, conseguente ad  $H_0$ , in testa al palo;

$\alpha_m$  = rapporto momento taglio in testa palo nell'ipotesi di rotazione impedita [L];

$M_{ad}$  = momento flettente adimensionale lungo il fusto del palo.

Nella relazione di calcolo delle fondazioni delle opere si riporta il valore del parametro



## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 133 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$\alpha_m$  per ogni opera per i diversi diametro e lunghezze pali.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GEO000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 134 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 9. VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI

### 9.1 PREMESSA

I rilevati in progetto sono previsti con pendenza delle scarpate 2 (verticale) / 3 (orizzontale) con berma intermedia di larghezza 1.0 m per altezze rilevato maggiori di 5.0 m.

### 9.2 CRITERI DI VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI

Si riportano nel seguito le metodologie ed i criteri di calcolo del cedimento.

L'analisi del cedimento è stata effettuata utilizzando il programma CED sviluppato dall'ing. Guiducci per l'analisi delle tensioni indotte nel sottosuolo dai carichi applicati in superficie.

Con il programma di calcolo è possibile analizzare cedimenti di rilevati illimitati sia di rilevati semi-illimitati (quali ad esempio i rilevati stradali dei cavalcavia ferroviari ed i rilevati di approccio alle spalle dei viadotti di linea).

Nel caso di rilevati semi-illimitati il cedimento viene valutato in condizione di area di carico semi – infinita; quindi si può individuare l'andamento del cedimento in asse rilevato in direzione longitudinale (tenendo eventualmente anche conto della pendenza longitudinale del rilevato), al fine di determinare la posizione (rispetto alla spalla) della sezione con cedimento massimo.

Nel caso particolare sono stati valutati cedimenti di rilevati di linea e quindi illimitati ed il calcolo è stato effettuato in corrispondenza dell'asse del rilevato (cedimento massimo).

#### 9.2.1 Determinazione della zona compressibile Hc

Viene definita convenzionalmente zona compressibile (Hc) la profondità oltre la quale l'incremento delle tensioni verticali ( $\delta\sigma_z$ ) risulti inferiore a  $(0.10) \cdot (\sigma'_{vo})$  (essendo  $\sigma'_{vo}$  la tensione verticale efficace litostatica) e il contributo al cedimento può essere considerato trascurabile.

##### **Terreni sabbiosi**

Il cedimento dei rilevati poggianti su terreni sabbiosi può essere determinato ricorrendo alla teoria dell'elasticità ed alla seguente espressione:

essendo:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu' \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_i'}$$

$s_t$  = cedimento totale

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile (Hc)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 135 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$E_i'$  = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo

$\nu$  = rapporto di Poisson = 0.3

Il comportamento dei terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie) risulta macroscopicamente diverso da quello dei terreni a grana fine (limi e argille), in virtù della marcata differenza esistente tra i valori del coefficiente di permeabilità. Avendo infatti elevata permeabilità essi si comportano come un sistema aperto con libero flusso dell'acqua e l'eventuale sovrappressione dell'acqua interstiziale, generata da una qualunque causa che ne disturbi l'equilibrio originario, si dissipa in tempi estremamente brevi. Ne consegue che, ai fini pratici, si può trascurare il moto di filtrazione transitorio e fare riferimento direttamente alle condizioni di equilibrio finale.

Il decorso del cedimento nel tempo può essere pertanto considerato rapido, praticamente contemporaneo alla costruzione dell'opera.

### ***Terreni argillosi e/o stratificati***

Nel presente paragrafo vengono illustrati i criteri utilizzati per la valutazione dei cedimenti di rilevati in terreni costituiti prevalentemente da materiali argillosi saturi e in terreni stratificati, ovvero costituiti da materiali argillosi intercalati da lenti sabbiose.

L'analisi relativa ai cedimenti viene sviluppata con riferimento ai seguenti aspetti principali:

- descrizione dei diversi tipi di cedimento (immediato, di consolidazione primaria, secondario);
- descrizione delle ipotesi di lavoro;
- determinazione teorica dell'entità dei diversi tipi di cedimento;
- determinazione teorica dell'andamento nel tempo dei cedimenti di consolidazione primaria e secondaria, assenza o presenza di dreni verticali.

### **9.2.2 Tipi di cedimento**

L'applicazione di un carico di dimensioni finite su un deposito costituito da materiali argillosi saturi comporta un processo deformativo nel terreno che tradizionalmente viene schematizzato come illustrato nella Figura 69 (vedasi ad esempio Perloff [1975]):

a) Data la bassa permeabilità ( $k$ ) del terreno, la fase di carico avviene in condizioni non drenate con generazione di sovrappressioni interstiziali ( $u$ ); i materiali argillosi si deformano allora a volume costante ed il cedimento che ne consegue è indicato come cedimento immediato.

b) Il trasferimento del carico dall'acqua allo scheletro solido comporta ulteriori cedimenti, la cui velocità nel tempo è legata principalmente alle caratteristiche di

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 136 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

permeabilità dell'argilla e alle condizioni di drenaggio. Il processo è noto come consolidazione primaria ed il cedimento conseguente a tale processo è indicato come cedimento di consolidazione primaria.

c) Ultimato il processo di consolidazione primaria, anche quando le sovrappressioni nell'acqua risultano nulle, continuano a svilupparsi nel tempo assestamenti dovuti a fenomeni di natura plastico-viscosa che avvengono in condizioni drenate; il cedimento conseguente è noto come cedimento secondario.

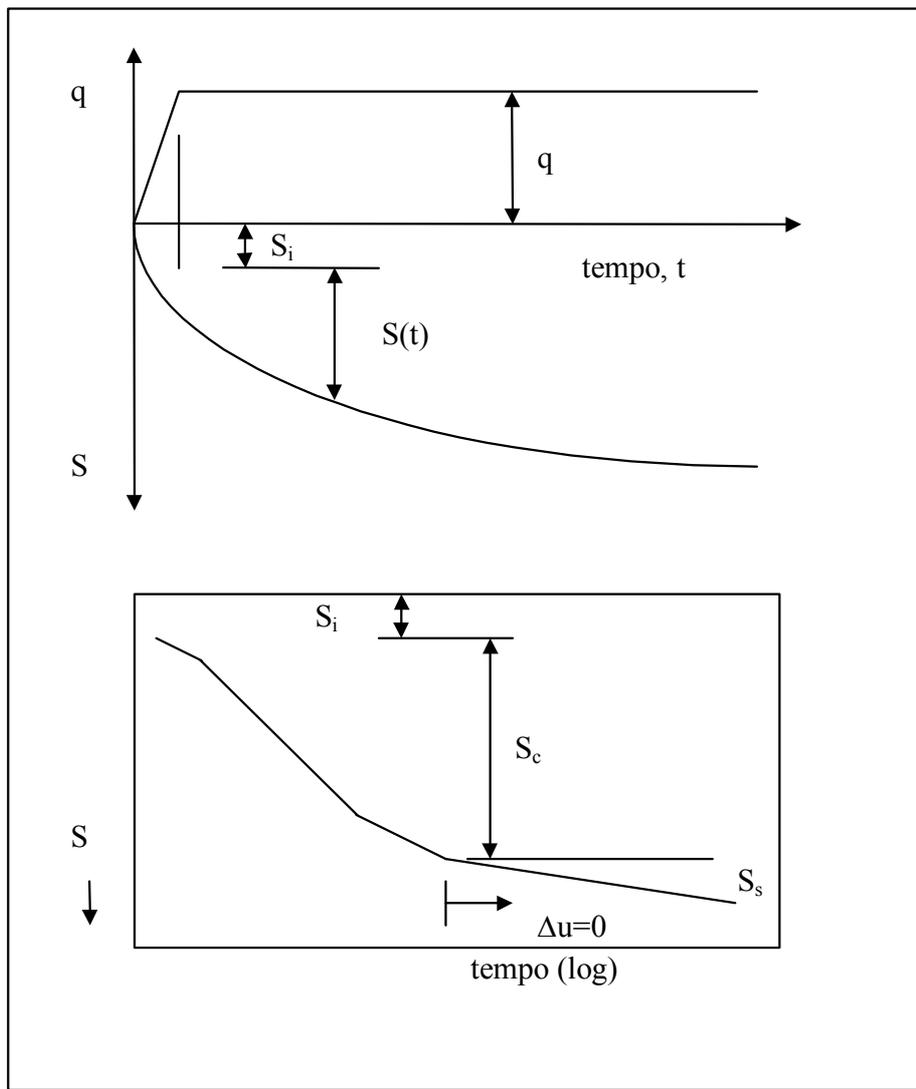


Figura 69 – Cedimenti totali, immediati e di consolidazione

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 137 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### 9.2.3 Valutazione teorica dei vari tipi di cedimento

#### Cedimento immediato

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato in argille viene stimato con la seguente espressione:

$$s_i = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu_u \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_{ui}}$$

essendo:

$s_i$  = cedimento immediato

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ )

$E_{ui}$  = modulo di deformazione non drenato dello strato i-esimo

$\nu_u$  = rapporto di Poisson = 0.5

#### Cedimento totale (immediato e di consolidazione primaria)

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato e di consolidazione primaria nei terreni coesivi viene stimato con la seguente espressione (in analogia a quanto già indicato per i depositi incoerenti):

essendo:

$$s_t = \sum_{i=1}^n \frac{(\Delta\sigma_z - \nu' \cdot (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y)) \cdot h_i}{E_i'}$$

$s_t$  = cedimento immediato e di consolidazione primaria

$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$  = tensioni indotte dal carico

$h_i$  = altezza dello strato i-esimo

$n$  = numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile ( $H_c$ )

$E_i'$  = modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo

$\nu$  = rapporto di Poisson = 0.3

Per definizione il cedimento di consolidazione primaria è dato dalla differenza tra  $s_t$  e  $s_i$ .

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 138 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### 9.2.4 Determinazione teorica dell'andamento nel tempo dei cedimenti

#### Cedimenti di consolidazione primaria

L'analisi del processo di consolidazione consiste nella previsione del decorso nel tempo della dissipazione della sovrappressione interstiziale e quindi del cedimento.

Si tratta di un problema molto complesso del quale esistono in letteratura delle soluzioni relative a schemi semplificati che possono comunque fornire indicazioni per i problemi pratici.

La prima soluzione al problema monodimensionale è stata ottenuta da Terzaghi (1923) nell'ambito delle seguenti ipotesi:

- terreno omogeneo e completamente saturo, con legge sforzi-deformazione di tipo lineare;
- i parametri di compressibilità e di permeabilità sono costanti durante il processo di consolidazione;
- incompressibilità dell'acqua e dello scheletro solido del terreno;
- deformazioni piccole e comportamento del terreno non viscoso;
- il carico è supposto applicato istantaneamente;
- validità della legge di Darcy.

L'equazione differenziale che regola il fenomeno in regime transitorio è:

$$c_v \frac{d^2u}{dz^2} = \frac{du}{dt}$$

dove:

$c_v$  = coefficiente di consolidazione verticale;

$u$  = sovrappressione interstiziale:  $u(z,t)$ ;

$z$  = dimensione (verticale);

$t$  = tempo;

$d$  = simbolo per derivata parziale.

La soluzione dell'equazione dipende dalle condizioni iniziali:

- distribuzione delle sovrappressioni interstiziali all'atto dell'applicazione del carico;
- condizioni di drenaggio al contorno.

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 139 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

La soluzione è generalmente espressa in termini del parametro adimensionale "grado di consolidazione"  $U_v$  definito dal rapporto fra la sovrappressione dissipata e quella iniziale:

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 140 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$$U_v(z,t) = \frac{u_0 - u(z,t)}{u_0} = 1 - \frac{u(z,t)}{u_0} = \frac{s_c(t)}{s_c}$$

dove:

 $u_0$  = sovrappressione iniziale;

 $u(z,t)$  = sovrappressione durante il transitorio;

 $s_c(t)$  = cedimento (per consolidazione) nel generico istante  $t$ ;

 $s_c$  = cedimento al termine del processo.

Una funzione che approssima la soluzione dell'equazione differenziale è stata proposta da Sivaram e Swamee - 1977 (vedasi "Geotecnica" di R. Lancellotta).

$$U_v = (4 \cdot T_v / \pi)^{0.5} / [1 + (4 \cdot T_v / \pi)^{2.8}]^{0.179}$$

dove:

 $T_v = c_v \cdot t / L_v^2$  fattore di tempo adimensionale

 $c_v = k_v \cdot E_d / \gamma_w$  coefficiente di consolidazione verticale

 $k_v$  = coefficiente di permeabilità verticale

 $E_d$  = modulo di compressibilità edometrica

 $\gamma_w$  = peso di volume dell'acqua

 $t$  = istante di tempo generico

 $L_v$  = massimo percorso di drenaggio.

### Cedimento secondario

Il cedimento secondario nei terreni coesivi è convenzionalmente calcolato facendo riferimento alla seguente equazione:

$$s_s = \sum_1^n \log \left( \frac{t}{t_{100,i}} \right) \cdot c_{\alpha i} \cdot h_i$$

essendo:

 $s_s$  = cedimento secondario;

 $t$  = tempo generico a partire dall'applicazione del carico;

 $t_{100,i}$  = tempo necessario all'esaurimento della consolidazione primaria nello strato argilloso  $i$ -esimo, separato da altri strati argillosi da lenti sabbiose continue;

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 141 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$h_i$  = altezza dello strato argilloso  $i$ -esimo separato da altri strati argillosi da lenti sabbiose continue;

$n$  = numero di strati argillosi separati tra loro da lenti sabbiose continue;

$\alpha_i$  = coefficiente di consolidazione secondaria nello strato  $i$ -esimo misurato da prove edometriche di laboratorio.

Nell'impiego della relazione sono implicate le seguenti ipotesi:

- monodimensionalità del problema;
- il cedimento secondario inizia dopo l'esaurimento del cedimento di consolidazione primaria;
- il valore di  $\alpha$  è costante durante l'evolversi del cedimento secondario;
- il valore di  $\alpha$  è indipendente dal valore dello spessore dello strato  $i$ -esimo  $h_i$ , anche se tale spessore influenza l'entità del  $t_{100}$ ;
- il valore di  $\alpha$  è indipendente dal rapporto  $\Delta\sigma_z/\sigma'_{vo}$ .

Nel caso di profili caratterizzati da più strati argillosi separati da lenti sabbiose non continue, il calcolo del cedimento secondario viene eseguito con riferimento al monostrato e ad un coefficiente di consolidazione secondaria medio pesato tra quelli relativi ai singoli strati.

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 142 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 9.3 ANALISI DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI

### 9.3.1 Sezioni di calcolo e parametri geotecnici

Nel seguito vengono riportate le analisi svolte per il calcolo dei cedimenti dei rilevati di massima altezza per le sezioni ritenute più significative sia in relazione alla successione stratigrafica, che alla geometria dei rilevati (altezza, larghezza sommitale).

In particolare sono state analizzate le seguenti sezioni:

- a) sezione con larghezza sommitale  $B=13.7$  m, altezza media  $H=7.5$  m in terreni alluvionali coesivi (unità Ala) con spessore 14 m e falda a p.c.; rappresentativa come altezza massima in condizioni stratigrafiche peggiori;
- b) sezione con altezza  $H=9.0$  m e larghezza sommitale  $B=13.7$  m in terreni alluvionali incoerenti; rappresentativa per l'altezza massima;
- c) sezione di rilevato in affiancamento all'asse di progetto e quindi larghezza sommitale  $B=30$  m ed altezza media 12 m: rappresentativa per le dimensioni maggiori di rilevato sia in altezza, che in larghezza.

L'analisi dei cedimenti dei rilevati è stata svolta in accordo alle metodologie di calcolo precedentemente esposte, con il programma di calcolo CED (G. Guiducci) considerando l'ipotesi di rilevato illimitato. Nella valutazione dei cedimenti e quindi nella determinazione dello spessore compressibile, si sono considerati i contributi degli strati in corrispondenza dei quali l'incremento della tensione verticale risulta maggiore o uguale a 0.1 volte la tensione geostatica efficace.

La stratigrafia ed i parametri geotecnici di progetto delle formazioni sono state dedotte sulla base delle indagini più vicine (elencate nella seguente tabella).

Il modulo di deformazione elastico operativo per il calcolo dei cedimenti dei rilevati ( $E'$ ) è stato valutato dal modulo di deformazione elastico iniziale ( $E_0$ ), in particolare si è assunto  $E' = E_0/10$ . Per il valore del modulo di deformazione elastico iniziale ( $E_0$ ) è stato considerato l'andamento con la profondità sulla base dei risultati delle prove in sito SPT, CPT e sismiche Down-Hole, in accordo a quanto precedentemente esposto nella caratterizzazione geotecnica generale delle singole unità.

Per la stima dei cedimenti immediati è stato valutato anche il modulo di deformazione in condizioni non drenate ( $E_u$ ). Il valore è stato valutato in accordo a quanto indicato nella relazione geotecnica generale, è stato stimato con la correlazione di Duncan & Buchigani (1976):  $E_u = k \cdot c_u$ , dove  $c_u$  è la resistenza al taglio non drenata e  $k$  è stato assunto pari a 450 per i depositi coesivi in esame.

In tabella seguente si riportano le stratigrafie ed i parametri di calcolo per le sezioni analizzate.

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 143 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Tabella 25 – stratigrafia e parametri geotecnici – sezioni di calcolo**

Sezione– H = 7.5 m, B=13.7 m				
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	Eu [MPa]
0.0÷5.0	Ala	19.0	12	33.75
5.0÷14.0	Ala	19.0	7÷10	22.5
14.0÷15.0	Salt	20.0	45	135
15.0÷40.0	Pa/Ap	23.0	106÷250	-
40.0÷100.0	Pa/Ap	23.0	250÷330	-
Falda: a p.c.				

Sezione– H = 9.0 m, B=13.7 m				
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	Eu [MPa]
0.0÷4.5	Ag	19.0	25	-
4.5÷6.0	Ala	19.0	8	22.5
6.0÷7.0	Ag	19.0	35	-
7.0÷9.0	Salt	20.0	45	135
9.0÷40.0	Pa/Ap	23.0	106÷250	-
40.0÷100.0	Pa/Ap	23.0	250÷330	-
Falda: a 4.5 m di profondità da p.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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 144 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Sezione H = 12.0 m, B=30.0 m				
Profondità da p.c.[m]	Unità geotecnica	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [MPa]	Eu [MPa]
0.0÷7.0	Ecla	19.0	20	45
7.0÷9.0	Salt	20.0	60	135
9.0÷40.0	Pa/Ap	23.0	106÷250	-
40.0÷100.0	Pa/Ap	23.0	250÷330	-
Falda: a 2.0 m di profondità da p.c.				

E' stato valutato anche il decorso dei cedimenti nel tempo.

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria verticale ( $c_v$ ) è stimato da correlazioni empiriche in funzione del limite liquido  $S_i$  è assunto per le alluvioni coesive un valore di  $c_v = 3E^{-07}$  m<sup>2</sup>/s.

Per quanto riguarda il coefficiente di consolidazione secondaria ( $c_\alpha$ ), con la correlazione proposta nel manuale NAVFAC-DM 7.1. (1971), che correla il coefficiente di consolidazione secondaria al contenuto naturale di acqua ( $W_n$ ), si stima un valore di  $c_\alpha = 0.0025$  ( $W_n = 25\%$ ).

Il percorso di filtrazione per la valutazione del decorso dei cedimenti nel tempo della sez. 212 è stato assunto pari allo spessore compressibile.

### 9.3.2 Risultati

Nella seguente tabella si riassumono i risultati dei calcoli eseguiti, in Appendice C sono riportati i tabulati di calcolo completi.

**Tabella 26 - Cedimenti dei rilevati**

Sezione di calcolo	Altezza rilevato (m)	Larghezza sommitale [m]	Cedimento totale in asse (mm)	Cedimento immediato in asse (mm)	Cedimento consolidazione in asse (mm)
Sez. A -	7.5	13.7	177.5	39.5	138.0
Sez B	9.0	13.7	84.3	29.5	54.8
Sez C	12.0	30.0	118.5	38.4	80.1

Il cedimento totale massimo stimato in asse rilevato è di circa 18 cm e si ha in corrispondenza del rilevato di approccio alla spalla del viadotto Fratte in terreni coesivi

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 145 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

alluvionali con spessore massimo 14 m. In corrispondenza di tale sezione il cedimento immediato stimato è 4 cm e quindi circa 14 cm di consolidazione. E' stato valutato il decorso dei cedimenti nel tempo, rappresentato in figura seguente da cui si evince che:

- a  $t = 3$  mesi il cedimento complessivo (immediato+consolidazione) scontato è di 45 mm, di cui 5.5 mm di consolidazione;
- a  $t = 1$  anno il cedimento complessivo è di 49 mm, di cui 9.5 mm di consolidazione;
- a  $t = 10$  anni il cedimento complessivo è di 71 mm, di cui 31.5 mm di consolidazione;
- a  $t = 50$  anni (vita nominale opera) il cedimento complessivo scontato è di 99.5 mm, di cui 60 mm di consolidazione;
- a  $t = 75$  anni (vita di riferimento) il cedimento complessivo scontato è di 123 mm, di cui 83 mm di consolidazione.

Quindi per la sezione di rilevato 212 A al km 4+240 (rappresentativa della situazione stratigrafica peggiore con terreno coesivo alluvionale compressibile per uno spessore di 14 m, unità Ala) il decorso dei cedimenti nel tempo è comunque molto lento. Ipotizzando cautelativamente la messa in esercizio dopo 1 anno dalla costruzione il cedimento complessivo scontato è di 5 cm; dopo 50 anni (vita nominale opera) il cedimento complessivo scontato è di 9.95 cm, di cui 5 cm già scontati prima della messa in esercizio. Quindi il cedimento residuo di consolidazione, riferito all'arco di vita utile dell'opera, è 4.95 cm, inferiore al limite di capitolato (< 5 cm). Si può concludere che i cedimenti sono compatibili con la funzionalità della struttura.

Per le altre sezioni calcolate, rappresentative delle condizioni generali lungo il tracciato, i rilevati sono situati su modesti spessori di terreni alluvionali incoerenti (Ag) e coltri eluvio-colluviali che poggiano su substrato pelitico arenaceo consistente e poco compressibile. Per queste sezioni i cedimenti totali massimi stimati sono dell'ordine di 8-12 cm in asse rilevato. Comunque la gran parte di questi cedimenti si svilupperanno entro i tempi di costruzione del rilevato e saranno sicuramente compatibili con la funzionalità della struttura.

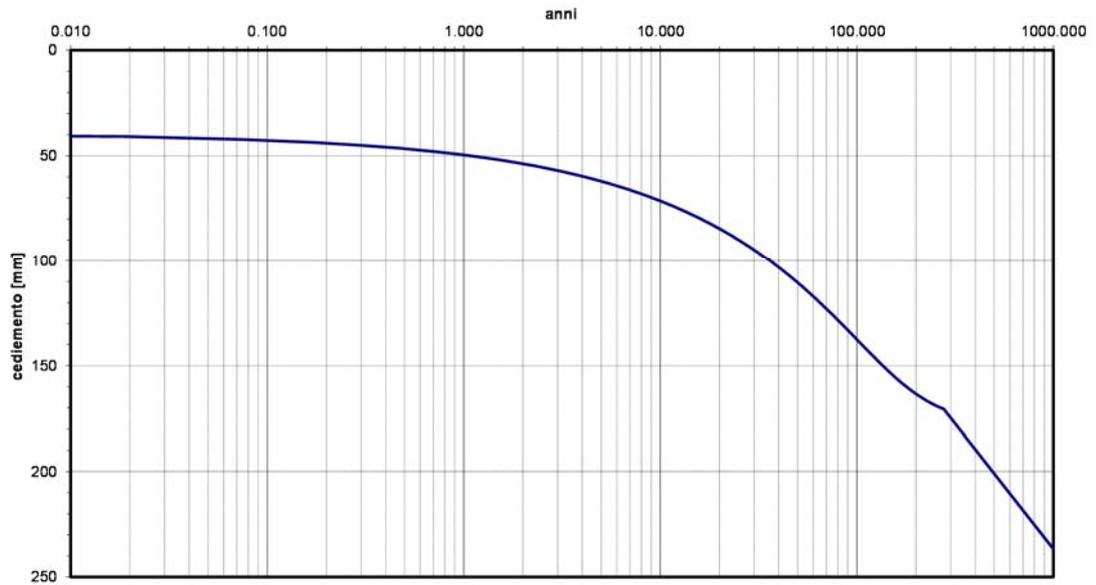
## 2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 146 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

**Quadrilatero lotto 2 - sez 212A km 4+240 - Rilevato H=7.5 m  
Decorso del cedimento nel tempo**



**Figura 70. Decorso dei cedimenti nel tempo**

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 147 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 10. ANALISI DI STABILITA' DELLE SCARPATE

### 10.1 METODOLOGIE DI CALCOLO

Le verifiche di stabilità per le scarpate definitive sono state svolte sia in condizioni statiche che sismiche in accordo a quanto previsto da normativa vigente.

L'esame delle condizioni di stabilità è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite. Per la valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità globale si è impiegato un codice di calcolo denominato PCSTASBL5M, in cui la ricerca delle superfici critiche viene svolta attraverso la generazione automatica di un elevato numero di superfici di potenziale scivolamento. Sono state cautelativamente considerate ipotesi di deformazione piana. In particolare, in questa sede si fa riferimento al metodo di Bishop che prevede superfici di scorrimento circolari nei terreni.

Nelle analisi sono state ovviamente tralasciate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea una analisi convenzionale all'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie S e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa superficie:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{\text{disp}}}{\int_S \tau_{\text{mob}}}$$

In accordo alla normativa vigente per rilevati in materiali sciolti e fronti di scavo, le analisi di stabilità vengono condotte secondo la combinazione (A2+M2+R2).

Secondo la normativa quindi i parametri di resistenza del terreno devono essere abbattuti a mezzo dei coefficienti parziali di seguito riportati.

$\gamma_{\phi'}$ = 1.25	coefficiente parziale per l'angolo di resistenza al taglio
$\gamma_{c'}$ = 1.25	coefficiente parziale per la coesione drenata
$\gamma_{cU'}$ = 1.40	coefficiente parziale per la resistenza al taglio non drenata

L'analisi viene quindi condotta con i seguenti parametri geotecnici di calcolo:

$\tan(\phi'_k) = \tan(\phi'_k) / \gamma_{\phi'}$	angolo di resistenza al taglio
$c'_k = c'_k / \gamma_{c'}$	coesione drenata
$c_{Uk} = c_{Uk} / \gamma_{cU'}$	la resistenza al taglio non drenata

Il coefficiente di sicurezza minimo per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo è pari ad 1.1 ( $\gamma_R$ ).

Pertanto il fattore di sicurezza alla stabilità da verificare  $FS \geq 1.1$ .

In accordo alla normativa vigente l'analisi sismica allo stato limite ultimo (SLU sismico) viene condotta considerando i parametri del terreno abbattuti con i coefficienti parziali precedentemente riportati ed il coefficiente di sicurezza dovrà risultare  $\geq 1.1$ .

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 148 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

### 10.1.1 Carichi

Le analisi di stabilità dei rilevati stradali sono state svolte con i carichi accidentali pari a 20 kPa in condizioni statiche, amplificato con coefficiente parziale  $\gamma_F = 1.30$  per le azioni (tabella 6.2.1 di normativa) e 6 kPa in condizioni sismiche (è stato utilizzato un coefficiente di combinazione di normativa pari a 0.30).

### 10.1.2 Azioni sismiche per analisi di stabilità

In generale, il metodo pseudo-statico modella l'azione sismica considerando in luogo delle azioni dinamiche azioni statiche equivalenti ovvero forze statiche orizzontali  $f_h$  e verticali  $f_v$  per unità di volume, d'intensità pari al prodotto fra il peso specifico del corpo  $\gamma$  sottoposto all'azione dinamica ed un coefficiente sismico:

$$f_h = \gamma \cdot k_h \quad \text{forza orizzontale per unità di volume}$$

$$f_v = \gamma \cdot k_v \quad \text{forza verticale per unità di volume}$$

dove:

$$\gamma = \text{peso specifico del volume considerato.}$$

In accordo alla normativa vigente per le analisi in esame, la componente orizzontale ( $a_h$ ) dell'accelerazione può essere legata all'accelerazione massima attraverso la seguente relazione:

$$k_h = \beta_s \times a_{max} / g$$

$$k_v = \pm k_h / 2$$

dove:

$k_h$  = coefficiente sismico in direzione orizzontale;

$k_v$  = coefficiente sismico in direzione verticale;

$\beta_s = 0.28$ , coefficiente di riduzione che dipende dall'accelerazione massima e dalla categoria di suolo).

Per il tracciato in esame si distingue:

per categoria sottosuolo B:

$$k_h = \beta_s \times a_{max} / g = 0.28 \cdot 0.25 = 0.07$$

$$k_v = \pm k_h / 2 = \pm 0.035$$

per categoria sottosuolo D:

$$k_h = \beta_s \times a_{max} / g = 0.28 \cdot 0.288 = 0.08$$

$$k_v = \pm k_h / 2 = \pm 0.04$$

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 149 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 10.2 SEZIONI DI CALCOLO

Nel presente capitolo si riportano le analisi di stabilità di rilevati e trincee del tracciato stradale in progetto. Le analisi di stabilità globale opera-versante e quelle delle scarpate di scavo provvisorie per la realizzazione di GA e imbocchi di GN saranno trattati nelle apposite relazioni delle opere.

L'analisi di stabilità per le scarpate di rilevati è stata condotta cautelativamente per le sezioni di cui è stato valutato precedentemente il cedimento:

- sezione A rappresentativa per la massima altezza in presenza di stratigrafia peggiore - con categoria sottosuolo tipo C;
- sezione B di altezza H=9.0 m su terreno alluvionale incoerente ghiaioso;
- sezione C di altezza H = 12.0 m su terreno eluvio colluviale.

Le trincee definitive sono previste:

- con pendenza 2 (verticale) / 3 (orizzontale) e berma di larghezza 1 m con altezze di scavo maggiori di 5 m in terreni alluvionali ed eluvio colluviali;
- con pendenza 2 (verticale) / 1 (orizzontale) e berma di larghezza 1 m con altezze di scavo maggiori di 5 m nelle formazioni del substrato pelitico/arenaceo.

Sono state analizzate le seguenti sezioni:

- sezione D: altezza massima con terreno di alterazione del substrato e pendenza 2 (verticale) / 1 (orizzontale);
- sezione E: scarpata a pendenza 2 (verticale) / 3 (orizzontale) con altezza di scavo 6.5 m in terreno eluvio-colluviale e pendio debolmente inclinato.

Nelle verifiche di stabilità delle trincee cautelativamente il livello di falda è stato posto a fondo scavo, anche se rilevato a profondità maggiori.

Sono stati considerati i seguenti parametri geotecnici:

### Unità R – riporto antropico del rilevato

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\varphi' = 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata

### Unità Ecla - Depositi eluvio colluviali limoso argillosi

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\varphi' = 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$c_u = 100 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate

### Unità Ala - Depositi alluvionali limoso argillosi

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$\varphi' = 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c' = 0 \text{ kPa}$	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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 150 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

$c_u = 75 \text{ kPa}$  resistenza al taglio in condizioni non drenate

**Unità Ag - Depositi alluvionali ghiaioso-sabbiosi**

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

$\varphi' = 38^\circ$  angolo di resistenza al taglio

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

**Unità Salt – Substrato alterato argilloso limoso**

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

$\varphi' = 27^\circ$  angolo di resistenza al taglio

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

$c_u = 300 \text{ kPa}$  resistenza al taglio in condizioni non drenate

**Unità Pa – Substrato pelitico arenaceo / Unità Ap – substrato arenaceo pelitico**

$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$  peso di volume naturale

$\varphi' = 31^\circ$  angolo di resistenza al taglio

$c' = 120 \text{ kPa}$  coesione drenata

**10.3 RISULTATI**

Nelle seguenti figure sono mostrati i risultati delle verifiche di stabilità delle scarpate sia in condizioni statiche che sismiche SLU (per l'analisi sismica è riportata la verifica con  $\pm k_v$  che ha fornito il valore minimo del coefficiente di sicurezza).

I fattori di sicurezza minimi ottenuti dalle verifiche sono sempre maggiori di quanto previsto da normativa ( $FS > 1.10$ ); quindi le verifiche di stabilità sono sempre soddisfatte.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 151 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------

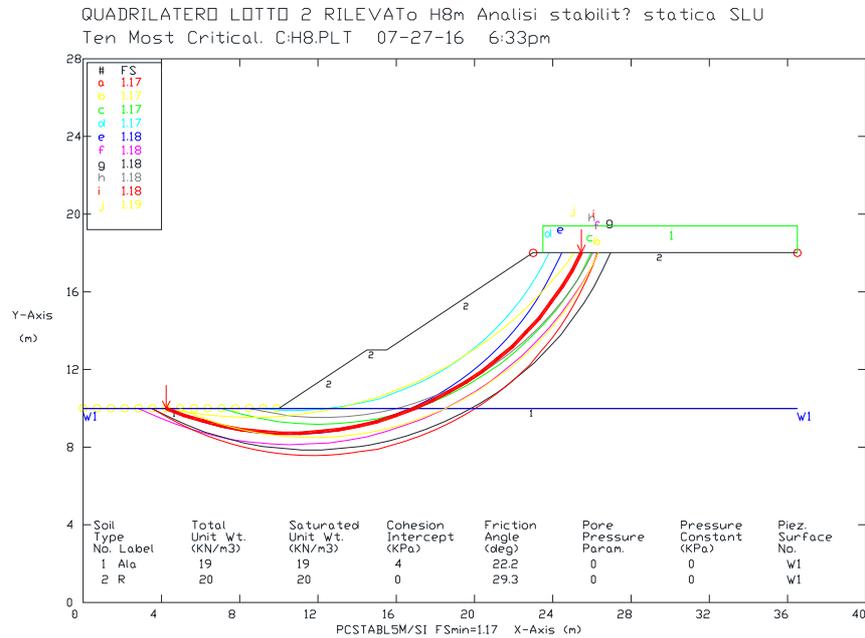


Figura 71. Sez A - Analisi statica SLU

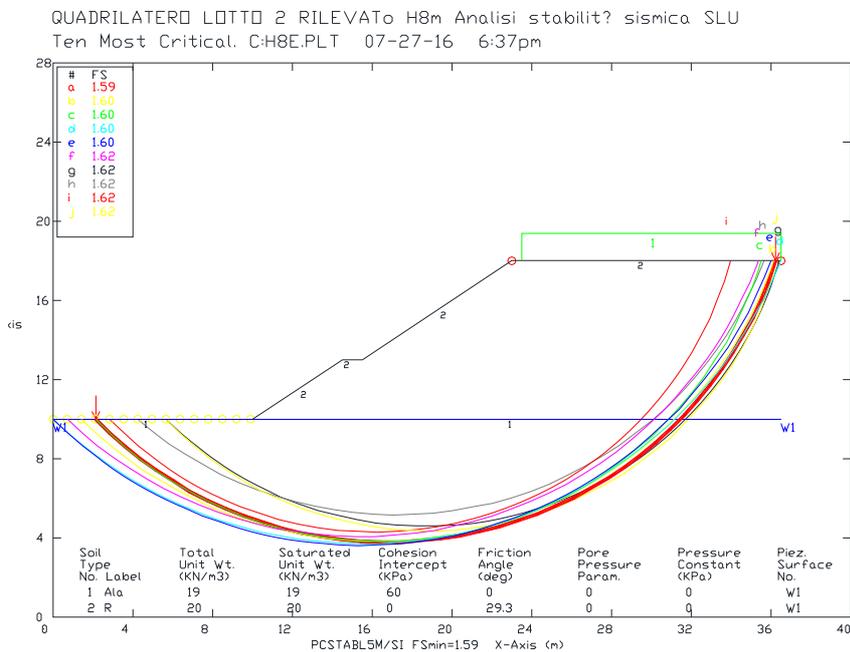


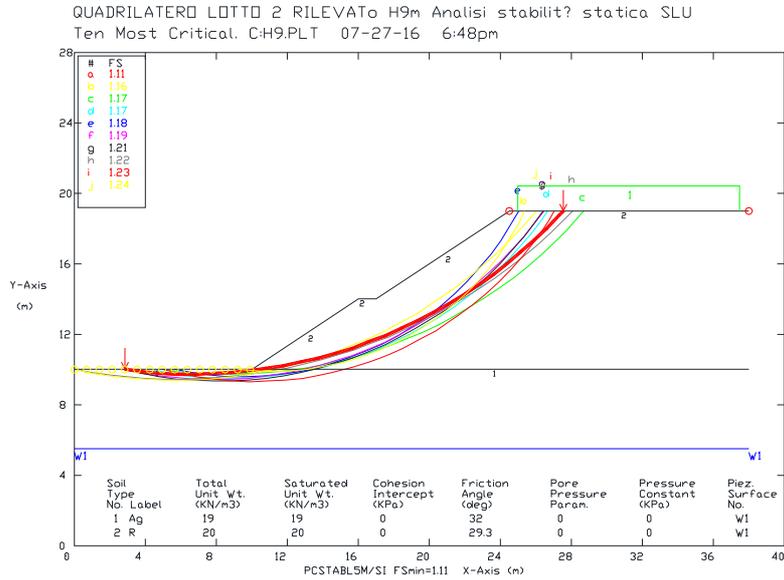
Figura 72. Sez A - Analisi sismica SLU

## 2.1.2 PEDEMONTANA DELLE MARCHE

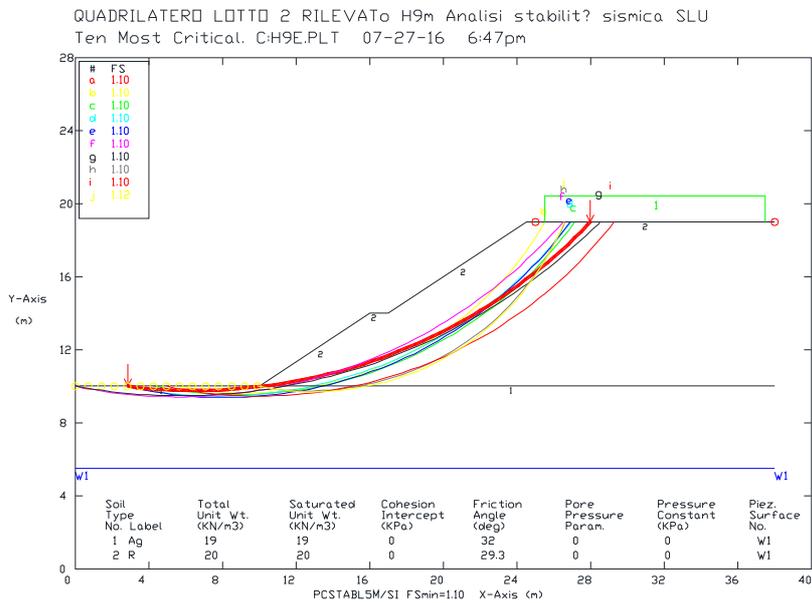
3° stralcio funzionale (Castelraimondo nord - Castelraimondo sud)

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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 152 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------



**Figura 73. Sez B - Analisi statica SLU**



**Figura 74. Sez B - Analisi sismica SLU**

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 153 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------

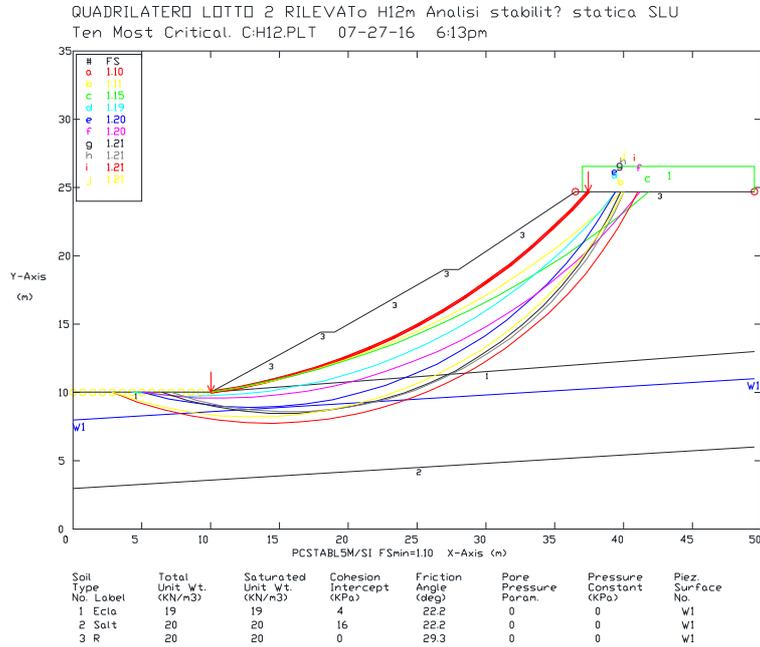


Figura 75. Rilevato C - Analisi statica SLU

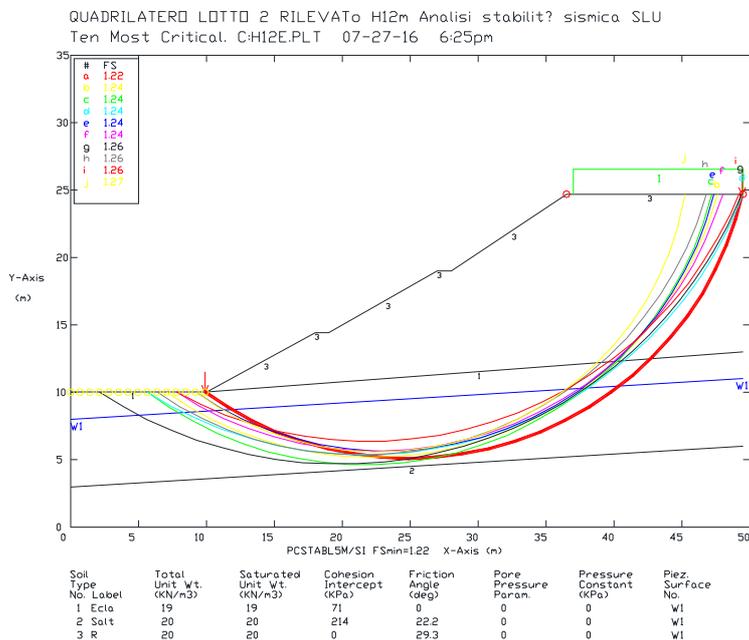


Figura 76. Rilevato C - Analisi sismica SLU

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 154 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------

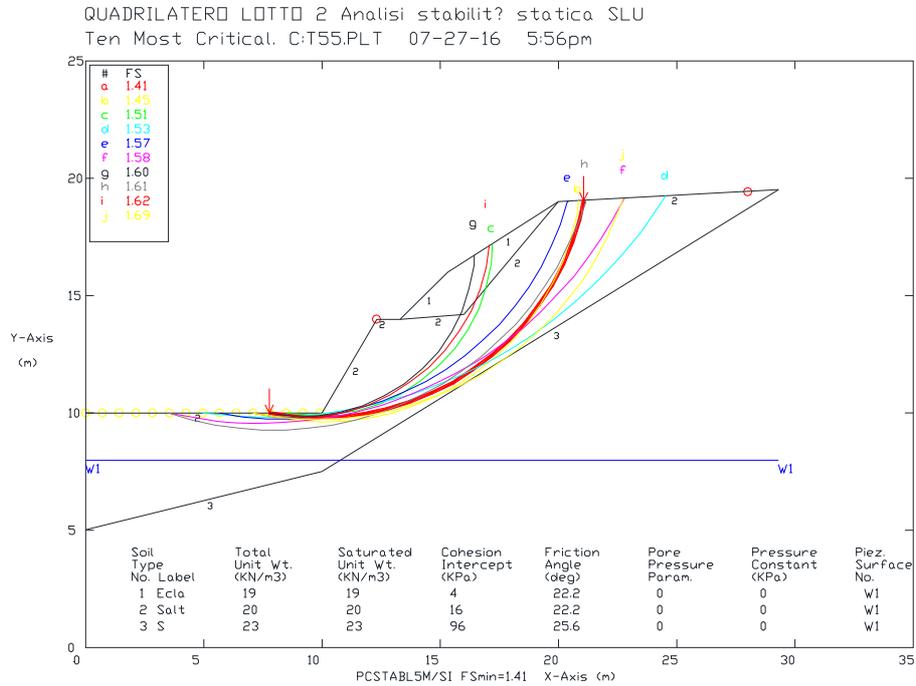


Figura 77. Trincea definitiva sez D - Analisi statica SLU

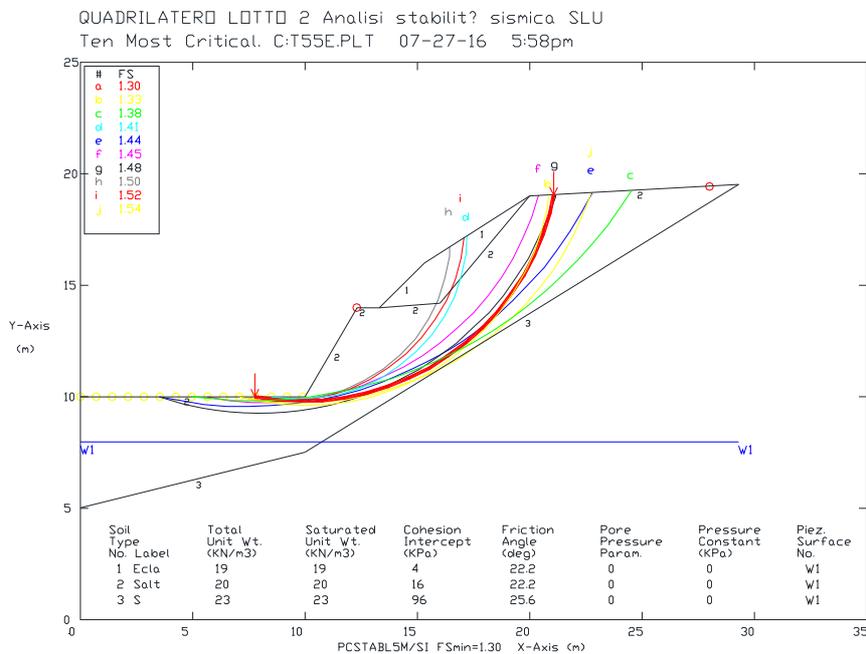


Figura 78. Trincea definitiva sez D - Analisi sismica SLU

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 155 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	-----------------	----------------	-----------	-------------------------------

QUADRILATERO LOTTO 2 - trincea Analisi stabilit? statica SLU  
Ten Most Critical. C:TR371E.PLT 07-27-16 4:38pm

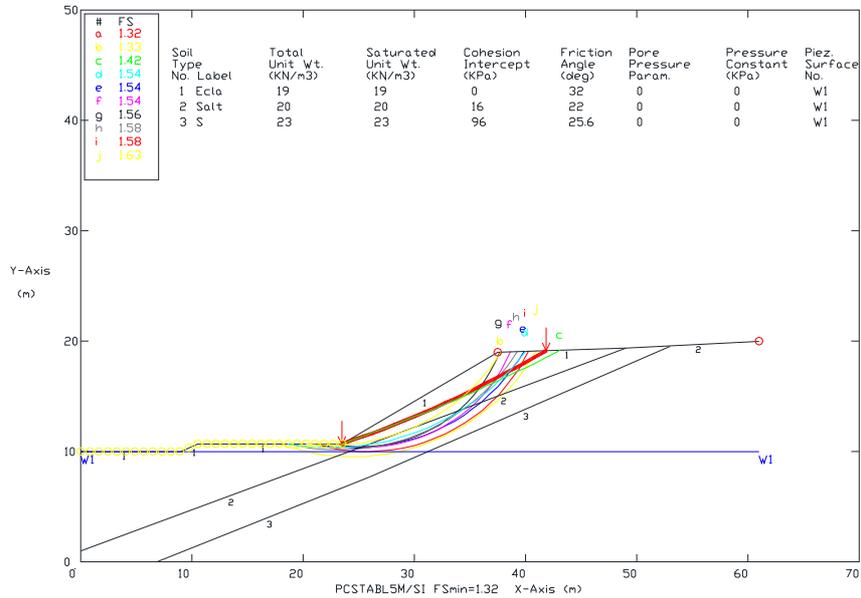


Figura 79. Trincea definitiva sez E - Analisi statica SLU

QUADRILATERO LOTTO 2 - trincea Analisi stabilit? sismica SLU  
Ten Most Critical. C:TR371E.PLT 07-27-16 4:40pm

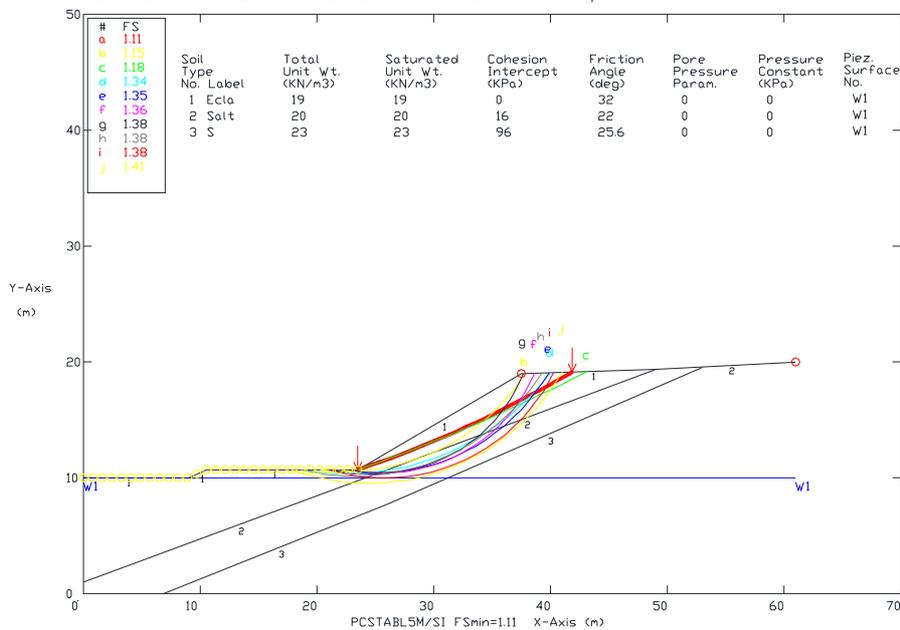


Figura 80. Trincea definitiva sez E - Analisi sismica SLU

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 156 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 11. RIUTILIZZO DEI TERRENI DA SCAVO

Secondo la recente normativa in materia ambientale, le terre e le rocce provenienti da attività di scavo (TRS) non sono classificate come rifiuti e pertanto, a seguito di determinate verifiche condotte in seno al piano di gestione e riutilizzo delle TRS, possono essere reimpiegate quali materiali da costruzione per rilevati, trincee, riempimenti.

I requisiti fisico-meccanici dei terreni richiesti per la costruzione delle varie tipologie di opere in terra sono forniti dalla classificazione HRB-AASHTO (CNR-UNI 10006), in conformità della quale sono stati identificati alcuni campioni di terreno prelevati dalle cassette dei sondaggi/pozzetti esplorativi. In questo modo si può valutare la possibilità del reimpiego, da un punto di vista geotecnico, dei terreni appartenenti alle singole unità geotecniche quale materiale da costruzione e la destinazione più appropriata.

Nell'area interessata dall'intervento, il primo strato superficiale, al di sotto della coltre vegetale (di spessore 0.2÷0.3 m), è costituito generalmente da terreni di coltre eluvio-colluviali e da depositi alluvionali, prevalentemente coesivi.

Il substrato dell'area, che interesserà in maniera sistematica lo scavo delle gallerie e principali trincee è prevalentemente pelitico e pelitico-arenaceo (formazione di Camerino e Schlier in subordine).

Al momento della stesura del presente elaborato non sono ancora disponibili i risultati delle prove di laboratorio, comunque si richiamano i risultati delle numerose indagini eseguite sul precedente lotto 2, che presenta gli stessi terreni. Dalle prove di laboratorio del lotto 2 (analisi granulometriche e limiti di Atterberg) eseguite sui campioni prelevati nei pozzetti esplorativi e sui campioni dei sondaggi nei tratti in trincea e/o in galleria nelle quote previste di scavo, i terreni sono prevalentemente classificabili (CNR UNI 10006) come A7-6 (circa il 63%) e A6 (circa il 31%), solo un 6% come A1-b (vedasi figura seguente). Quindi gran parte del terreno proveniente dagli scavi potrà essere riutilizzato mediante trattamento a calce. La maggior parte degli scavi interesserà sia l'unità eluvio colluviale prettamente coesiva argilloso limosa (unità Ecla), sia le alluvioni coesive (Ala), sia il substrato pelitico-arenaceo (unità S); quest'ultima unità con particolare riferimento agli scavi delle gallerie.

Il terreno classificabile A1-b è rappresentato dall'unità alluvionale grossolana (Ag) e quindi è riutilizzabile tal quale; è presente solo localmente in corrispondenza degli scavalchi del fiume Esino e del Rio Mistriano. Nelle zone dove è presente tale unità, non si prevedono grossi scavi (quindi scarso apporto di materiale), se non quelli per la realizzazione delle fondazioni delle spalle/pile dei ponti/viadotti di scavalco dei suddetti fiumi.

Quindi il maggior apporto di materiale verrà dagli scavi delle gallerie e si tratterà di terreno classificabile come A6, A7-6, il cui riutilizzo potrà avvenire mediante un idoneo trattamento a calce.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 157 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

	NUMERO CAMPIONI - CLASSIFICAZIONE CNR UNI 10006												
	A1		A2				A3	A4	A5	A6	A7		A8
	A1-a	A1-b	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7					A7-5	A7-6	
Ecla/Salt									10		18		
Ag		2											
Ala											2		

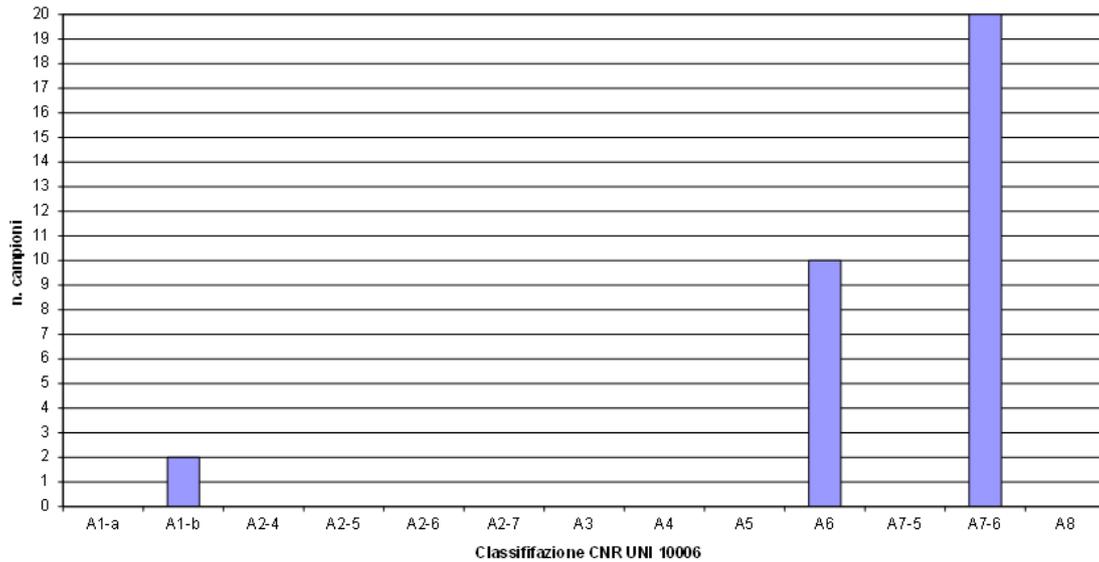


Figura 81 – classificazione terre

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 158 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 12. PIANO DI POSA

Sulla base dei risultati delle indagini geotecniche in sito (sondaggi e pozzetti esplorativi) è stato possibile individuare lo spessore di coltre vegetale, mentre le prove di carico su piastra, i cui risultati sono mostrati in Tabella 11, paragrafo 4.5, hanno consentito di valutare rispondenza richiesta dal Capitolato per quanto riguarda i piani di posa dei rilevati stradali.

Nella campagna geognostica del 2017 sono stati eseguiti 10 pozzetti esplorativi, su cui sono stati prelevati campioni rimaneggiati ed eseguite prove di carico su piastra e 19 sondaggi per la tratta all'aperto. Da tale campagna si è evinto che in superficie affiora prevalentemente terreno argilloso limoso debolmente sabbioso, come si evince dalla classificazione A6 e A7-6.

Dalle prove di carico su piastra si sono ottenuti valori del modulo di deformazione compresi fra 3 e 8 MPa al primo ciclo di carico e tra 20 e 130 MPa al secondo ciclo di carico. Tali valori possono già fornire una indicazione sulla non idoneità dei materiali presenti quale piano di posa, anche in relazione alla non attitudine di tali terreni ad essere compattati in posto, al loro comportamento instabile e rammollente in relazione ai cicli stagionali.

Per quanto sopra è stato previsto un trattamento a calce dei piani di posa dei rilevati per uno spessore variabile lungo il tracciato a seconda dello spessore di coltre vegetale da asportare, che consente di raggiungere i requisiti minimi prestazionali richiesti dal Capitolato.

Tale scelta progettuale è quella maggiormente idonea per i seguenti motivi:

- la bonifica tradizionale con asportazione e sostituzione di materiale avrebbe richiesto approvvigionamento di idonei da cava, peggiorando il bilancio materie e i relativi oneri.
- per la formazione dei rilevati è previsto anche il reimpiego dei materiali di scavo opportunamente trattati a calce, per migliorare il bilancio materie complessivo. Pertanto il riempimento del volume asportato nell'ipotesi di bonifica tradizionale, può avvenire con terreno di scavo mescolato con calce, e quindi risulta più opportuno prevedere la bonifica con trattamento in sito a calce del piano di posa

L'idoneità dei materiali al trattamento a calce è stata verificata nel lotto 2 dove sono state eseguite apposite prove di laboratorio; poiché i terreni da trattare sono analoghi (stesse formazioni geologico-geotecniche), i risultati ottenuti per il lotto 2 possono essere estrapolati anche per questa tratta. Comunque sono attualmente in corso analoghe prove di laboratorio anche sui campioni di terreno prelevati nei pozzetti/sondaggi di questo lotto, al fine di verificare specificatamente anche i terreni di questo sito.

Ove presenti, i terreni incoerenti grossolani hanno fatto misurare valori del modulo di deformazione decisamente superiori (dal lotto 2: Md tra 10 e 19 MPa per l'unità Ag), sicuramente idonei ad essere utilizzati tal quali previa semplice compattazione dinamica in posto.

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 159 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Nella seguente tabella si riassumono gli spessori di scotico + bonifica previsti per i rilevati in progetto. Lungo il tracciato i pozzetti hanno evidenziato sempre uno spessore di vegetale di 0.30 cm, mentre nei sondaggi lo spessore di vegetale vaia da 0.10 a 0.40 m, solo localmente si ha un massimo di 0.9-1.0 m ma in zone dove sono previsti viadotti. Quindi sostanzialmente sono stati previste due tipologie di intervento (come indicato nella seguente tabella):

- scotico 0.20 m + bonifica 0.30 m mediante trattamento a calce in posto, da applicare nei tratti in cui lo spessore di vegetale è al massimo 0.20 m;
- scotico 0.20 m + bonifica 0.20 m con sostituzione di terreno + bonifica 0.30 m mediante trattamento a calce in posto, da applicare nei tratti in cui lo spessore di vegetale è da 0.20 m a 0.40 m.

**Tabella 27. Spessori scotico+bonifica -rilevati**

Progressiva inizio	Progressiva fine	scotico [m]	bonifica [m]
0+000	1+530	0.20	0.3 (trattamento in sito)
1+740	2+292	0.20	0.20 (sostituzione) + 0.30 (trattamento in sito)
2+492	3+940	0.20	0.3 (trattamento in sito)
5+359	9+010	0.20	0.20 (sostituzione) + 0.30 (trattamento in sito)
9+110	9+452	0.20	0.3 (trattamento in sito)
9+501	11+080	0.20	0.20 (sostituzione) + 0.30 (trattamento in sito)
11+720	12+260	0.20	0.3 (trattamento in sito)

Opera L0703	Tratto 213	Settore E	CEE 02	WBS GE0000	Id. doc. REL	N. prog. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 160 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

## 13. TRATTAMENTO A CALCE

Per il progetto in esame si prevede quindi il trattamento a calce dei terreni provenienti dagli scavi (principalmente forniti dallo scavo delle gallerie) per il loro rieimpiego.

Il trattamento di stabilizzazione consiste nel miscelare al terreno una certa percentuale di calce, definita tramite prove di laboratorio e verifica mediante campo prova, al fine di avere una miscela terreno-acqua-calce, idonea ai requisiti progettuali. Sono state programmate ed eseguite una serie di prove sperimentali di laboratorio, volte alla verifica dell'idoneità dei terreni da stabilizzare a calce ed allo studio preliminare delle miscele in laboratorio.

Il programma di laboratorio di seguito esposto è attualmente in corso.

Allo studio delle miscele dovrà seguire la realizzazione di un campo prova, per la verifica in scala reale dei dati sperimentali ottenuti in laboratorio e per la verifica delle tecnologie possedute dall'impresa incaricata (attrezzature e metodologie operative). Il progetto e la realizzazione di tale campo prova viene rimandato alla successiva fase di cantierizzazione, in accordo con la D.L. ed i progettisti.

### 13.1 STUDIO MISCELE IN LABORATORIO

#### 13.1.1 Preparazione dei campioni

Si prevedono due gruppi di terreno omogeneo su cui eseguire lo studio delle miscele:

- Gruppo 1 (piano di posa dei rilevati): il materiale dovrà essere prelevato immediatamente sotto la coltre vegetale (indicativamente tra 0.2-0.8 m dal p.c.).
- Gruppo 2 (corpo dei rilevati): il materiale sarà costituito dal terreno di scavo delle gallerie e quindi dal substrato pelitico-arenaceo: andrà preparato un gruppo con miscela media omogenea tra frazione pelitica ed arenacea, con materiale che potrà essere prelevato direttamente dalle cassette dei numerosi sondaggi eseguiti.

Per quanto concerne il materiale del gruppo 2 (proveniente dai sondaggi eseguiti in zona galleria naturale), il terreno dovrà essere frantumato ed opportunamente miscelato in modo da avere una miscela omogenea nella facies pelitica/arenacea e quindi mediamente rappresentativa dell'ammasso.

#### 13.1.2 Programma prove di laboratorio

Per garantire l'efficacia del trattamento a calce di una terra è importante l'elevato contenuto di fine ed il limitato contenuto di sostanza organica e solfati; infatti la presenza di sostanza organica e/o solfati limitano lo sviluppo delle reazioni chimiche che portano ad un aumento della resistenza meccanica e del modulo di deformazione.

Da capitolato ci sono prescrizioni per quanto riguarda il contenuto di sostanza organica e di solfati. In particolare le terre impiegate dovranno presentare un contenuto di sostanza organica inferiore al 2% ed un contenuto di solfati inferiore all'1%.

La D.L. potrà derogare a queste limitazioni sul contenuto in sostanza organica e di solfati,

**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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 161 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

se opportune campagne di sperimentazione, siano tali da indicare che percentuali più elevate garantiscano comunque i requisiti di resistenza richiesti.

Al fine di verificare preliminarmente l'idoneità al trattamento del terreno in sito, si eseguiranno quindi le seguenti prove di laboratorio.

**Tabella 28. Prove di caratterizzazione della terra ai fini del trattamento**

Prova di laboratorio	Norma di riferimento	Valori di riferimento
Analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione	CNR BU n.36	
Limiti di Atterberg (LL e LP)	UNI CEN ISO/TS 17892-12	IP = LL - LP > 10%
Sostanze organiche	ASTM D 2974 - C	< 2.0 %
Solfati	BS 1377	< 1.0 %
Consumo iniziale di calce (CIC)	ASTM C977-92	>1.0 %

Sui due gruppi omogenei di terreno da testare verranno individuate tre miscele sperimentali, da studiare in laboratorio al fine di individuare il dosaggio ottimale di calce.

Il parametro CIC, in particolare, è una utile guida alla valutazione del dosaggio minimo di calce che si dovrà indicativamente applicare. Tale valore corrisponde infatti alla quantità di calce necessaria per innescare la completa reazione terra/calce. Le miscele sono così definite:

- La prima miscela verrà confezionata con una percentuale di calce pari al CIC ed in ogni caso  $\geq 1.5\%$ .
- La seconda miscela pari alla percentuale della prima incrementata di  $+0.5\%$ .
- La terza miscela pari alla percentuale della seconda incrementata di  $+0.5\%$ .

Le percentuali sono sempre riferite al peso di terreno secco.

Le prove da eseguire in laboratorio sono elencate nella seguente tabella.

Per valutare correttamente i benefici del trattamento, oltre che sulle tre miscele individuate, dette prove verranno eseguite anche sul terreno naturale; quindi per ciascuno dei due gruppi omogenei di terreno da testare verranno preparate 4 miscele (di cui la prima con contenuto nullo in calce e le altre tre con contenuto in calce come sopra specificato).

**Tabella 29. Prove di laboratorio sulle miscele sperimentali**

Prova di laboratorio	Norma di riferimento	Valori di riferimento
Proctor Modificata ( $\gamma_d, \max$ e $w_{opt}$ )	UNI EN 13286-2	-
Limiti di Atterberg (LL e LP) a 12 ore e 14 gg di maturaz.	UNI CEN ISO/TS 17892-12	-
Indice di portanza immediato (IPI)	UNI EN 13286-47	$\geq 10$
CBR 7gg maturazione 4 gg di immersione (post-saturazione)		$\geq 30 \div 60 (**)$
Rigonfiamento 7gg maturazione +4gg immersione (post-saturazione)	UNI EN 13286-49	< $1 \div 1.5\%$ rigonfiamento lineare (**)

## 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. 02	Rev. A	Pag. di Pag. 162 di 162
----------------	---------------	--------------	-----------	---------------	--------------------	----------------	-----------	-------------------------------

Compressione 7gg maturazione (*)	UNI EN 13286-41	≥ 0.5 MPa
Compressione 28gg maturazione (*)		≥ 1.0 MPa
Prova TD 7gg maturazione (*)	UNI EN 17892-10	-
Prova TD 28gg maturazione (*)		
(*) Su almeno 3 provini confezionati con AASTHO mod. con le caratteristiche dell'ottimo.		
(**) in funzione dell'altezza del rilevato come indicato da Capitolato.		

Alla luce delle risultanze della sperimentazione in laboratorio, verrà redatta un apposita relazione interpretativa, con la presentazione e l'elaborazione dei risultati ottenuti. Verrà quindi proposta la miscela ottimale che dovrà essere testata nel campo prova, in vera grandezza.

Esula dalla presente, la realizzazione del campo prova in vera grandezza che verrà programmato nelle successive fasi e sottoposto alla D.L. per approvazione.