AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA
PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

SOCIETÀ DI PROGETTO: APM TERMINALS VADO LIGURE S.p.A.

MAERSK

CLF GRANDI LAVORI FINCOSIT

PROGETTAZIONE:

TECHNITAL S.p.A.

IL RESPONSABILE:

Dott. Ing. Guido Fiorini

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATO N° :

MI0102-PV-G-G-R-002-00

TITOLO ELABORATO

ELABORATI GENERALI

GEOTECNICA

RELAZIONE GEOTECNICA E CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
Dicembre 2015	F. CANEPARO	F. CARNEVALE	G. FIORINI

REVISIONE N°	DATA	DESCRIZIONE
00	Dicembre 2015	EMISSIONE PER APPROVAZIONE

NOME FILE

MI0102-PV-G-G-R-002-00.docx

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETO DI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHE PARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE

AUTORITÀ PORTUALE DI SAVONA

PORTO DI VADO LIGURE

PROJECT FINANCING PER:

PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA, ESECUZIONE DEI LAVORI DELLA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE DEL PORTO DI VADO LIGURE E GESTIONE DELLA PARTE RELATIVA AL TERMINAL CONTENITORI

PERIZIA DI VARIANTE

ELABORATI GENERALI

RELAZIONE GEOTECNICA E CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

INDICE

1. PREMESSE 15
2. OGGETTO E SCOPO 20
3. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI 21
4. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO 23
5. CAMPAGNE DI INDAGINE DI RIFERIMENTO 24
5.1. Indagini antecedenti il Progetto (ante 2006) 27
5.1.1. Ampliamento Pontile Esso - SGI/SIPAC 1969 27
5.1.2. Pontile Fornicoke - Studio Celotti 1974 29
5.1.3. Prolungamento molo sopraflutti di Capo Vado - RC 1976 29
5.1.4. Molo Traghetti - RC 1980 30
5.2. Indagini per il Progetto della Piastra Multifunzionale 31
5.2.1. Indagine a base del Progetto Preliminare (Garassino 2006) 31
5.2.2. Indagine a base del Progetto Definitivo del 2008 33
5.2.3. Indagine Progetto Esecutivo - Campo prova area rilevato del 201135
5.1. Indagini per il Progetto della Nuova Diga Foranea 36
5.2. Sintesi delle informazioni ottenute con le varie campagne di indagine 40
6. ASSETTO STRATIGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO 42
6.1. Lineamenti stratigrafici generali dell'area di progetto 42
6.2. Stratigrafia media ricavata dalle indagini in situ 44
6.3. Sezioni stratigrafiche - Piastra 45
6.3.1. Sezioni longitudinali 47
6.3.2. Sezioni trasversali 48
6.4. Sezioni stratigrafiche – Diga Foranea 50
6.5. Idrogeologia 52
7. PROBLEMATICHE LEGATE ALLA CARATTERIZZAZIONE DELLO STRATO SUPERFICIALE A BASSA CONSISTENZA 55
7.1. Campionamenti dei limi nelle varie campagne di indagine 55
7.2. Problematiche legate al campionamento 56
7.3. Prova di sedimentazione 57
7.3.1. Descrizione delle prove di sedimentazione 57
7.3.2. Valutazione dei parametri di stato allo stato naturale 59
7.3.3. Effetto del campionamento 64
7.3.4. Ripercussioni progettuali dello scarso addensamento dei limi 68
8. RISULTATI DELLE INDAGINI IN SITU 69
8.1. Prove penetrometriche statiche CPTU/SCPTU 69
8.1.1. Interpretazione delle prove penetrometriche 69

8.1.2. Risultati ottenuti dalle prove penetrometriche 74
8.2. Prove Penetrometriche Dinamiche 82
8.2.1. Interpretazioni prove penetrometriche dinamiche 82
8.2.2. Sabbia SL: risultati delle prove SPT 87
8.2.3. Ghiaia G: risultati delle prove SPT 87
8.3. Prove dilatometriche 90
8.4. Prove pressiometriche 90
9. RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE 92
9.1. Progetto Preliminare - Prove indagini Garassino 92
9.2. Progetto Definitivo - Prove eseguite sui campioni S18 S19 S20 e Vibrocore 92
9.3. Progetto Esecutivo - Prove eseguite sui campioni Carmacoring ed i15 i35 97
9.4. Limi e sabbie (L1, L2 ed SL) 101
9.4.1. Prove di classificazione 101
9.4.2. Definizione del profilo di preconsolidazione 113
9.4.3. Resistenza dei terreni di fondazione 123
9.4.4. Prove triassiali cicliche 143
9.4.5. Misura della velocità delle onde di taglio 146
9.4.6. Deformabilità dei terreni 149
9.4.7. Stima della permeabilità 159
9.5. Argilla di base 161
9.5.1. Classificazioni 162
9.5.2. Resistenza e compressibilità 164
9.6. Nuova diga foranea 166
10. TEORIA DELLO STATO CRITICO: APPLICAZIONE AL CASO IN ESAME 171
11. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE 176
12. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE 179

ELENCO FIGURE

Fig. 1-1- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Planimetria generale dell'opera 15
Fig. 1-2- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagini pregresse 17
Fig. 1-3- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagini eseguite per il progetto della Piastra 18
Fig. 5-1- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagini pregresse 25
Fig. 5-2- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagini per nuova diga foranea 25
Fig. 5-3- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagini eseguite per il progetto della Piastra 26
Fig. 5.4 - Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – Profilo sismico 38
Fig. 6-1- Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Planimetria con ubicazione sezioni stratigrafiche 46
Fig. 6.2 - Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – nuova diga foranea – Sezioni stratigrafiche 51
Fig. 6.3 - Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – Stratigrafia nuova diga foranea – Sezione longitudinale 52
Fig. 7-1 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Attrezzatura della prova di sedimentazione - Cilindro di prova ed inizio fase di posa del terreno 58
Fig. 7-2 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Curva H(t) misurata nella prova 1 60
Fig. 7-3 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Profilo indice dei vuoti, contenuto d'acqua e peso di volume con le tensioni efficaci ricavato dalla prova di sedimentazione 62
Fig. 7-4 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Profilo dell'indice dei vuoti, del contenuto d'acqua e del peso di volume con la profondità ricavati dalla prova di sedimentazione 63
Fig. 7-5 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Confronto del profilo dell'indice dei vuoti con la profondità ottenuto con la colonna di sedimentazione e quello dalle prove di laboratorio della campagna del 2008 65
Fig. 7-6 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Confronto del profilo dell'indice dei vuoti con la profondità ottenuto con la colonna di sedimentazione e quello dalle prove di laboratorio della campagna del 2011 67
Fig. 8-1 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Classificazione sulla carta di Robertson per il livello L1 CPTU 2006 75

Fig. 8-2 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Classificazione sulla carta di Robertson per il livello L2 CPTU 2006 76
Fig. 8-3 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Classificazione sulla carta di Robertson per il livello L1 CPTU 2011 76
Fig. 8-4 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Classificazione sulla carta di Robertson per il livello L2 CPTU 2011 77
Fig. 8-5 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Peso di volume e OCR da prove CPTU 79
Fig. 8-6 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Angolo di attrito e Cu da prove CPTU 80
Fig. 8-7 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Velocita' onde di taglio e Modulo elastico da prove CPTU 81
Fig. 8-8 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Interpretazioni prove penetrometriche dinamiche per la sabbia SL 88
Fig. 8-9 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Interpretazioni prove penetrometriche dinamiche per la ghiaia G 89
Fig. 8-10 - Vado Ligure - Nuova piastra Multifunzionale - Argilla compatta - Modulo pressiometrico E_m 91
Fig. 9-1- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione S18 S19 S20: Peso di volume - Contenuto d'acqua - Granulometria - Limiti di Atterberg 101
Fig. 9-2- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione Vibrocore: Granulometria - Limiti di Atterberg 102
Fig. 9-3 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione S18 S19 S20: Peso specifico dei grani e indice dei vuoti 102
Fig. 9-4 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento del contenuto fine con la profondità indagini progetto definitivo 103
Fig. 9-5 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Carta di plasticità indagini progetto definitivo 104
Fig. 9-6- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione SS110 SS112: Peso di volume - Contenuto d'acqua - Granulometria - Limiti di Atterberg 106
Fig. 9-7- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione i15 i35: Peso di volume - Contenuto d'acqua - Granulometria - Limiti di Atterberg 107
Fig. 9-8 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione SS110 SS112: Peso specifico dei grani e indice dei vuoti 108
Fig. 9-9 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di classificazione i15 i35: Peso specifico dei grani e indice dei vuoti 108

Fig. 9-10 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento del contenuto fine con la profondità dalle indagini del campo prova area rilevato 110
Fig. 9-11 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Carta di plasticità indagini campo prova area rilevato 111
Fig. 9-12 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Confronto tra i risultati delle due campagne di indagine 112
Fig. 9-13- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove edometriche e classificazioni S18 S19 S20 114
Fig. 9-14 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Prove edometriche: Tensione di preconsolidazione con la profondità - S18 S19 S20 115
Fig. 9-15- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove edometriche e classificazioni SS110 SS112 117
Fig. 9-16 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove edometriche e classificazioni i15 i35 118
Fig. 9-17 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Prove edometriche: Tensione di preconsolidazione con la profondità - SS110 SS112 119
Fig. 9-18 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Prove edometriche: Tensione di preconsolidazione con la profondità - i15 i35 119
Fig. 9-19 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Prove edometriche e triassiali: Tensione di preconsolidazione e OCR - SS110 SS112 121
Fig. 9-20 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Prove edometriche e triassiali: Tensione di preconsolidazione e OCR - i15 i35 122
Fig. 9-21- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento della tensione di preconsolidazione e dell'OCR con la profondità 123
Fig. 9-22 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - peso di volume, contenuto d'acqua e indice dei vuoti - S18 S19 S20 124
Fig. 9-23 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura S18 1.8 e 4.5 m 125
Fig. 9-24 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura S18 8.5 e 9.1 m 126
Fig. 9-25 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura S19 2.5 e 7 m 127
Fig. 9-26 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura S18 5.3 e 10 m 128
Fig. 9-27 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura S20 4.7m 129
Fig. 9-28 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - peso di volume, contenuto d'acqua e indice dei vuoti - SS110 SS112 130

Fig. 9-29 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - peso di volume, contenuto d'acqua e indice dei vuoti - i15 i35 131
Fig. 9-30 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS110 0.75 e 2.75 m 132
Fig. 9-31 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS110 6.75 e SS112 0.75 m 133
Fig. 9-32 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS112 1.75 e 4.25 m 134
Fig. 9-33 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS110 1.25 e 3.25 m 135
Fig. 9-34 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS110 5.05 e SS112 2.25 m 136
Fig. 9-35 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura SS112 3.25 e 5.75 m 137
Fig. 9-36 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura i15 5.8 m e i/35 13.3 m 138
Fig. 9-37 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura i35 2.8 m e i15 6.3 m 139
Fig. 9-38 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura i15 1.3 m e i35 1.3m 140
Fig. 9-39 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali - Inviluppo a rottura i15 13.25 m 141
Fig. 9-40 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Misura e stima delle Vs 147
Fig. 9-41 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Profilo di G_{max} con la profondità 150
Fig. 9-42 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Decadimento del modulo con la deformazione 151
Fig. 9-43 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento del modulo elastico E con la profondità 152
Fig. 9-44 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento del modulo elastico E con la profondità - confronto tra i valori da CPTU e i valori da Vs 153
Fig. 9-45 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di consolidazione in cella triassiale - bulk modulus con le tensioni - SS110 SS112 154
Fig. 9-46 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di consolidazione in cella triassiale -bulk modulus con le tensioni - i15 i35 154
Fig. 9-47 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Rapporto tra Cc e Cr dalle prove di laboratorio 156

Fig. 9-48 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali in condizioni k_0 - Campione 1 - piano di rottura 157
Fig. 9-49 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali in condizioni k_0 - Campione 2 - piano di compressione 158
Fig. 9-50 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove triassiali in condizioni k_0 - Campione 3 - piano di compressione 158
Fig. 9-51 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Andamento della permeabilità con la profondità 160
Fig. 9-52 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Misura del coefficiente di consolidazione dalle prove CPTU 161
Fig. 9-53 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Risultati prove di classificazione argilla pliocenica 163
Fig. 9-54 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Carta di plasticità argilla pliocenica 164
Fig. 9-55 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale -OCR e compressibilità argilla pliocenica 165
Fig. 9-56 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Resistenza argilla pliocenica 166
Fig. 9.57 - Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – Indagini diga foranea - Granulometria vibrocore 167
Fig. 9.58 - Vado Ligure – Nuova Nuova Piastra Multifunzionale – Indagini diga foranea – Granulometria S1 S2 168
Fig. 9.59 - Vado Ligure – Nuova Nuova Piastra Multifunzionale – Indagini diga foranea – Limiti Atterberg e contenuto d'acqua Vibrocore 168
Fig. 9.60 - Vado Ligure – Nuova Nuova Piastra Multifunzionale – Indagini diga foranea – Limiti Atterberg e contenuto d'acqua S1 S2 169
Fig. 9.61 - Vado Ligure – Nuova Nuova Piastra Multifunzionale – Indagini diga foranea – Peso specifico dei grani 170
Fig. 10-1 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Linee CSL ed SSL dalle prove triassiali 172
Fig. 10-2 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Piano di compressione risultati prove triassiali - NCL 174
Fig. 10-3 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Piano di compressione risultati prove triassiali - URL 175

ELENCO TABELLE

Tab. 5-1 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Sondaggi ampliamento pontile esso - Sintesi dei dati stratigrafici e della evidenza della pressione artesiana 28
Tab. 5-2 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Sondaggi pontile Fornicoke 29
Tab. 5-3 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Sondaggi prolungamento molo sopraflutti 30
Tab. 5-4 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Sondaggi molo traghetti 31
Tab. 5-5 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagine Studio Garassino - 2006 32
Tab. 5-6 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagine addizionale 2008 34
Tab. 5-7 - Vado Ligure - Nuova piastra multifunzionale - Indagine addizionale 2011 36
Tab. 5.8 - Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – Assetto stratigrafico – Sondaggi 2014 nuova diga foranea 39
Tab. 9-1 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto preliminare 93
Tab. 9-2- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto definitivo - verticale S18 94
Tab. 9-3- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto definitivo - Verticale S19 95
Tab. 9-4- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto definitivo - verticale S20 96
Tab. 9-5- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto definitivo - verticale Vibrocore 97
Tab. 9-6- Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto esecutivo - verticale SS110 97
Tab. 9-7 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto esecutivo - verticale SS112 98
Tab. 9-8 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto esecutivo - verticale i/15 99
Tab. 9-9 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Prove di laboratorio progetto esecutivo - verticale i/35 100
Tab. 9-10 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Indici di compressibilità S18 S19 S20 115
Tab. 9-11 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Indici di compressibilità SS110 SS112 120

Tab. 9-12 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Indici di compressibilità i15 i35 120
Tab. 9-13 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Angolo d'attrito dalle prove triassiali 142
Tab. 11-1 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale- Stratigrafia di progetto 177
Tab. 11-2 Vado Ligure – Nuova Piastra Multifunzionale – Stratigrafia media nuova diga foranea 177
Tab. 11-3 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - 178
Tab. 12-1 - Vado Ligure - Nuova Piastra Multifunzionale - Caratterizzazione Materiali da costruzione Progetto Esecutivo 180

BIBLIOGRAFIA

1. Chen J.W. and Juang C.H. (1996), Determination of drained friction angle of sands from CPT, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122 (5), 374-381.
2. CIRIA (1995), Report 143 - 1995: The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use, London UK.
3. Coop M.R., Atkinson J.H., (1993), The mechanics of cemented carbonate sands, Géotechnique, 43, No.1, 53-67.
4. De Mello V., The Standard Penetration Test, Fourth Panamerican Conference
5. Décourt L., General report/Discussion session 2: SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments in in-situ testing - Part 2: The standard penetration test, state-of-the-art report.
6. Finn Liam W.D., Siddharthan R., Martin G.R., (1983), Response of seafloor to ocean waves, Journal of Geotechnical Engineering, 109, No.4, 556-572.
7. Hegazy, Y.A. and Mayne, P.W. (1995), Statistical Correlations Between Vs and CPT Data for Different Soil Types, Proceedings, Cone Penetration Testing (CPT'95), Vol. 2, Linköping, Swedish Geotechnical Society, pp. 173-178.
8. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990), Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design, Report EL-6800/1493-6, Electric Power Research Institute.
9. Landon M.M., DeGroot D.J., Sheahan T.C., (2007), Non-destructive quality assessment of a soft clay using shear wave velocity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133, No. 4, 424-432.
10. Madsen O.S., (1978), Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, 28, No. 4, 377-393.
11. Martins F.B., Bressani L. A., Coop M.R. and Bica V. D., (2001), Some aspects of the compressibility behaviour of a clave sand, Canadian Geotechnical Journal, 38, 1177-1186.
12. Mayne P.W. and Campanella R.G. (2005), Versatile site characterization by seismic piezocone, Proceedings, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 2, Osaka, Millpress, Rotterdam, The Netherlands, 721-724.

13. Mayne P.W. Peuchen J. Bouwmeester D. (2010), Soil unit weight estimation from CPTs, Proceedings, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA.
14. Robertson P.K. (2009), Interpretation of cone penetration tests - a unified approach, Canadian Geotechnical Journal, 46, 1337-1355.
15. Robertson P.K. Cabal K.L. (2010), Estimating soil unit weight from CPT, Proceedings, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA.
16. Schmertmann J.H., Measurement of in situ shear strength, Session III, In situ measurement of shear strength.
17. Skempton, A.W. (1986), Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation, Géotechnique 36, No 3, 425-447.
18. Stroud, M.A. (1989), The Standard Penetration Test - Its application and interpretation, Proc. ICE Conf. on Penetration Testing in the UK, Birmingham, Thomas Telford, London.
19. Tanzini, M. (2002), L'indagine geotecnica - Caratterizzazione geotecnica delle terre e delle rocce attraverso prove in sito e di laboratorio, Dario Flaccovio Editore, pagg. 167-190.
20. Yang S.L., Sandven R and Grande L., (2006), Steady-state lines of sand-silt mixtures, Canadian Geotechnical Journal, 43, 1213-1219.
21. Yu-feng Gao, Yang Shen, Jian Zhang, Bing Li, (2010), Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of silt, China Ocean Engineering, Vol. 25, No.1, 31-44.

ELENCO SIMBOLI

γ	=	peso di volume	kN/m^3
w_n	=	contenuto naturale di acqua	%
LL	=	limite liquido	%
LP	=	limite plastico	%
IP	=	indice plastico	%
e_0	=	indice dei vuoti in sito	-
ϕ’	=	angolo di attrito, in sforzi efficaci	(°)
E	=	modulo elastico in carico vergine	MPa
Er	=	modulo elastico in scarico/ricarico	MPa
M	=	modulo di deformazione edometrico	MPa
c_v	=	coefficiente di consolidazione	m^2/s
k	=	coefficiente di permeabilità	m/s
NC	=	normalconsolidato	
OC	=	sovraconsolidato	
OCR	=	grado di sovraconsolidazione	

1. PREMESSE

La presente relazione riguarda gli aspetti geotecnici relativi alla realizzazione della nuova Piastra Multifunzionale del Porto di Vado Ligure.

Le opere previste in tale intervento comprendono, vedasi Fig. 1-1:

- Nuovo Terminal Containers, con realizzazione di una banchina con relativi piazzali operativi per una superficie di circa 200.000 m^2;
- Nuovo Terminal Rinfuse, con realizzazione delle opere di banchina;
- Nuovo Terminal Prodotti Petroliferi, con realizzazione delle opere di banchina;
- Nuovo accosto provvisorio Petroli.



FIG. 1-1- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PLANIMETRIA GENERALE DELL'OPERA

In particolare il Terminal Rinfuse ed il Terminal Prodotti Petroliferi sostituiranno le strutture esistenti, ossia il Pontile Petrolig, il Pontile Esso e il Pontile Fornicoke, che saranno demoliti in quanto interferenti con la Piastra in progetto.

La piattaforma sarà composta da un riempimento in terra conterminato in parte da cassoni ed in parte, sul lato sud, da una protezione a scogliera nonché, lungo il lato nord, da una cassa di colmata per la raccolta dei materiali dragati. In talune aree è infatti previsto un dragaggio alle quote indicate dall'Autorità Portuale per l'accosto delle navi, nonché una protezione dei fondali contro l'azione delle eliche delle navi stesse.

Il progetto inoltre prevede la realizzazione della nuova diga foranea.

A fronte delle problematiche connesse alla progettazione geotecnica dei sopra indicati interventi, per la definizione della stratigrafia e delle caratteristiche geologico-geotecniche dei terreni di fondazione della piastra multifunzionale, si è fatto ricorso a una cospicua mole di informazioni d'archivio quali, vedasi Fig. 1-2:

- indagini geognostiche pregresse realizzate in prossimità dell'area della Piastra e concernenti interventi di prolungamento/ampliamento dei pontili Esso e Fornicoke;
- interventi per il prolungamento del molo frangiflutti a Capo Vado e per la realizzazione della banchina Traghetti;
- cedimenti misurati sui cassoni e sovrastrutture del molo sopraflutti e della banchina traghetti;
- documentazione di carattere geologico/idrogeologico acquisita presso il Comune di Vado, mirata ad arricchire le informazioni relative alla natura dei terreni presenti nell'entroterra di Vado.



FIG. 1-2- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINI PREGRESSE

Accanto a tali informazioni sono poi state svolte diverse indagini geognostiche durante l'iter progettuale della Piastra stessa, vedasi Fig. 1-3:

- indagine geognostica per il Progetto Preliminare, effettuata dallo Studio Garassino del 2006;
- indagine addizionale per il Progetto Definitivo del 2008;
- indagine per il Progetto Esecutivo nell'ambito del Campo prova area rilevato del 2011;

Nell'ambito invece della Nuova Diga Foranea sono inoltre state eseguite delle nuova indagini nel Settembre/Ottobre 2014.

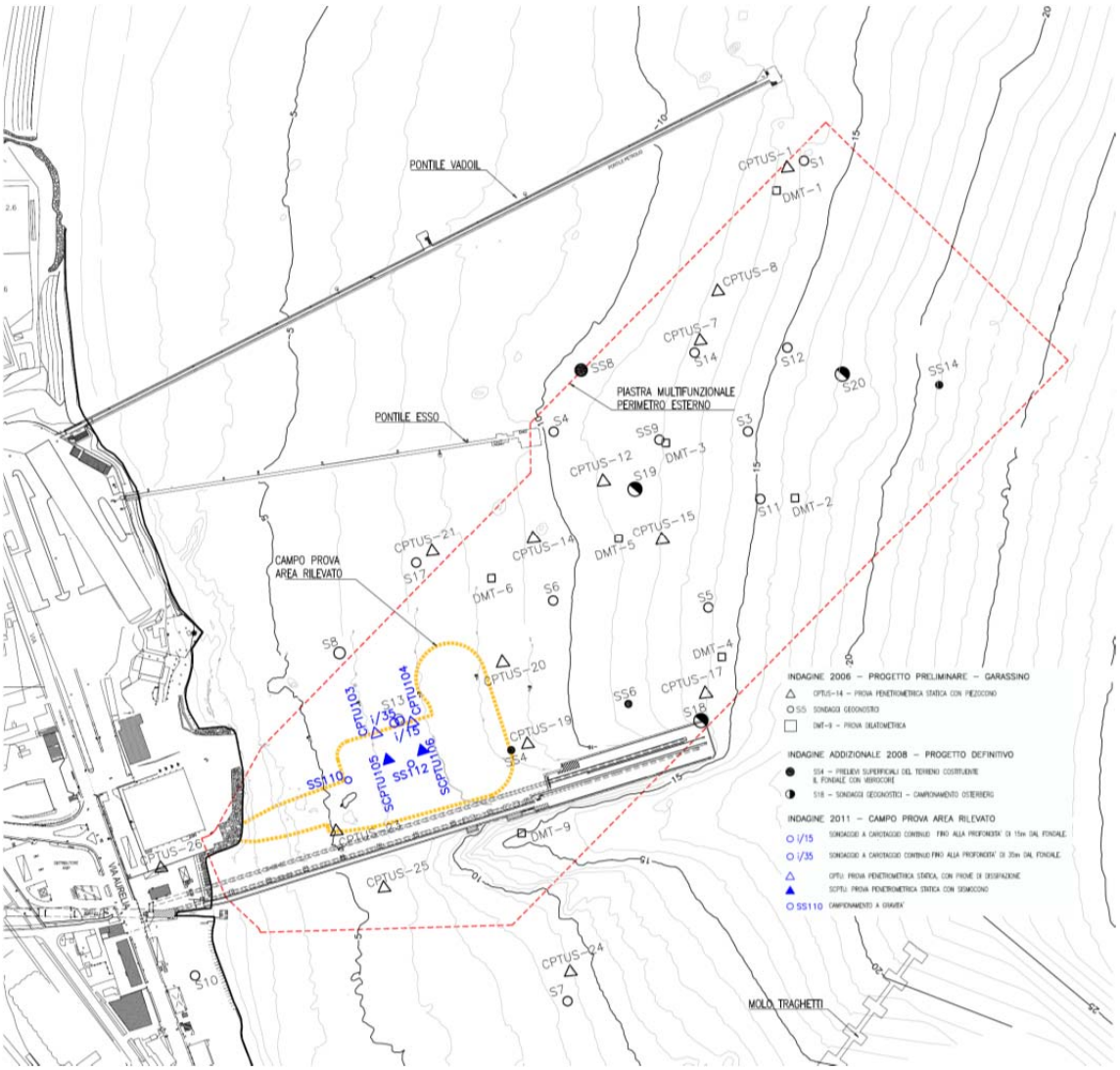


FIG. 1-3- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINI ESEGUITE PER IL PROGETTO DELLA PIASTRA

Le maggiori problematiche geotecniche sono legate alla presenza sul fondale di uno strato di limo tenero che ricopre l'intera area su cui sorgeranno le opere con uno spessore tra 8 e 10 m. Per meglio comprendere le caratteristiche geotecniche di tale strato sono state eseguite indagini geognostiche integrative, sia in fase di Progetto Definitivo che di

Progetto Esecutivo, mirate allo studio di dettaglio di tale terreno, prelevando campioni indisturbati, sui quali sono state eseguite prove di laboratorio finalizzate alla definizione del suo comportamento geotecnico, sia durante la costruzione che durante la vita utile delle opere da realizzare.

2. OGGETTO E SCOPO

Oggetto della presente relazione sono i terreni di fondazione della Piastra Multifunzionale.

Scopo è la caratterizzazione geotecnica degli stessi ai fini del dimensionamento delle fondazioni e della modalità costruttive da adottare per la realizzazione delle opere.

3. CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

La stratigrafia dei terreni di fondazione della Piastra Multifunzionale mostra un'alternanza di diversi strati a granulometria man mano crescente con la profondità.
La loro successione e caratterizzazione si è basata su numerose campagne di indagine, eseguite sia per il progetto della Piastra, sia per la costruzione di opere nelle immediate vicinanze. Le diverse campagne hanno compreso sia sondaggi con prelievo di campioni per successive prove di laboratorio, che prove in situ, tra cui SPT, CPTU, DMT.
E' stato quindi possibile individuare la presenza sul fondale di circa 9 m di materiale limoso, con scarsa consistenza, la cui caratterizzazione nell'ambito di tutto l'iter progettuale è risultata piuttosto problematica a causa della difficoltà riscontrata nel prelievo di campioni indisturbati. Ad oggi comunque la sua caratterizzazione è stata del tutto definita; in particolare si sono distinti due diversi strati, denominati L1 ed L2, di cui il primo risulta sovraconsolidato a seguito dell'azione ciclica delle onde. Questi strati mostrano una compressibilità molto elevata, pur manifestando una buona resistenza in termini di angoli di attrito e per questo motivo risultano essere gli strati più significativi per quel che riguarda la stabilità ed i cedimenti delle strutture. I loro tempi di consolidazione risultano tuttavia piuttosto rapidi e comunque compatibili con i tempi costruttivi dell'opera.
Al di sotto di tali strati, presenti in spessore circa costante su tutta l'area, compiono uno strato di sabbia limosa seguito da uno strato di ghiaia con sabbia. Tali strati mostrano una certa variabilità di spessore sull'area di progetto. La loro caratterizzazione evidenzia una buona resistenza ed una compressibilità ben inferiore a quella dei limi soprastanti.
Tali strati giacciono su uno strato di argilla compatta pliocenica, presente al di sotto della Piattaforma in spessori piuttosto variabili ed elevati.
Le campagne geognostiche eseguite negli anni hanno consentito la completa caratterizzazione geotecnica dei terreni portando alla definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità richiamate in questo rapporto al capitolo 11.
Da un punto di vista costruttivo le caratteristiche dei primi metri del terreno di fondazione comportano la necessità di posare sul fondale uno strato granulare di transizione, che è stato denominato bonifico. Tale strato costituisce quindi un filtro tra il limo di fondazione ee lo scanno di imbasamento dei cassoni, evitando che si possano verificare delle rotture a seguito del successivo versamento dei materiali più grossolani.

Al fine poi di limitare gli spostamenti delle opere in esercizio il terreno di fondazione viene consolidato con inclusioni rigide realizzate in calcestruzzo.

Le campagne di indagini svolte hanno inoltre confermato come anche i terreni al di sotto della nuova Diga Foranea siano analoghi a quelli dell'area della Piastra, salvo l'assenza in quest'area dell'argilla di base.

4. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Sono di seguito presentati i documenti di riferimento e le fonti da cui sono state attinte informazioni geotecniche complementari alle indagini geognostiche di stretta pertinenza della Piastra Multifunzionale:

[1] Progetto Definitivo della Nuova Piastra Multifunzionale del Porto di Vado Ligure – Technital S.p.A.

[2] Progetto Esecutivo Fase 1 e Fase 2 della Nuova Piastra Multifunzionale del Porto di Vado Ligure – Technital S.p.A.

[3] Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008

[4] Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008, Circolare del 2/2/2009

5. CAMPAGNE DI INDAGINE DI RIFERIMENTO

Nel presente capitolo vengono presentate tutte le campagne di indagine considerate per il progetto della Piastra Multifunzionale. Da un lato si sono infatti considerate le campagne di indagine eseguite nell'ambito delle opere esistenti adiacenti l'area di progetto e dall'altra le indagini eseguite nell'ambito del progetto della Piastra stessa.

In Fig. 5-1 sono riportate le indagini pregresse eseguite in corrispondenza delle opere esistenti ed in particolare:

- Indagine Sipac del 1969 lungo il Pontile Esso;
- Indagine Celotti del 1974 lungo il Pontile Fornicoke;
- Indagine RC del 1976 lungo per il prolungamento del Molo Sopraflutti;
- Indagine RC del 1980 per il Molo Traghetti.
- Indagini del 2014 eseguite per la nuova Diga Foranea.

In Fig. 5-2 si riportano in rosso e arancione le nuova indagini svolte per la realizzazione della Nuova Diga Foranea, assieme alle indagini, in azzurro, svolte nell'area nel 1976.

Le indagini invece svolte per il progetto della Piastra Multifunzionale sono le seguenti, vedasi la Fig. 5-3:

- Indagine Garassino del 2006 per il Progetto Preliminare;
- Indagine del 2008 per il Progetto Definitivo;
- Indagine del 2011 per il Progetto Esecutivo nell'ambito del Campo Prova Area Rilevato.



FIG. 5-1- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINI PREGRESSE

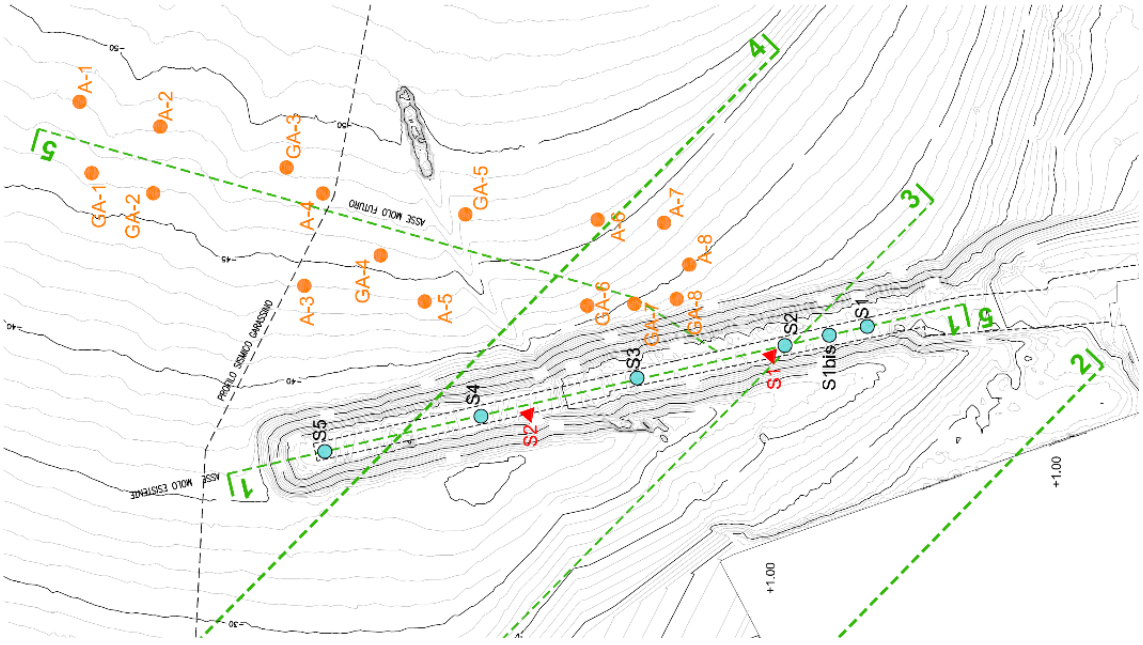


FIG. 5-2- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINI PER NUOVA DIGA FORANEA

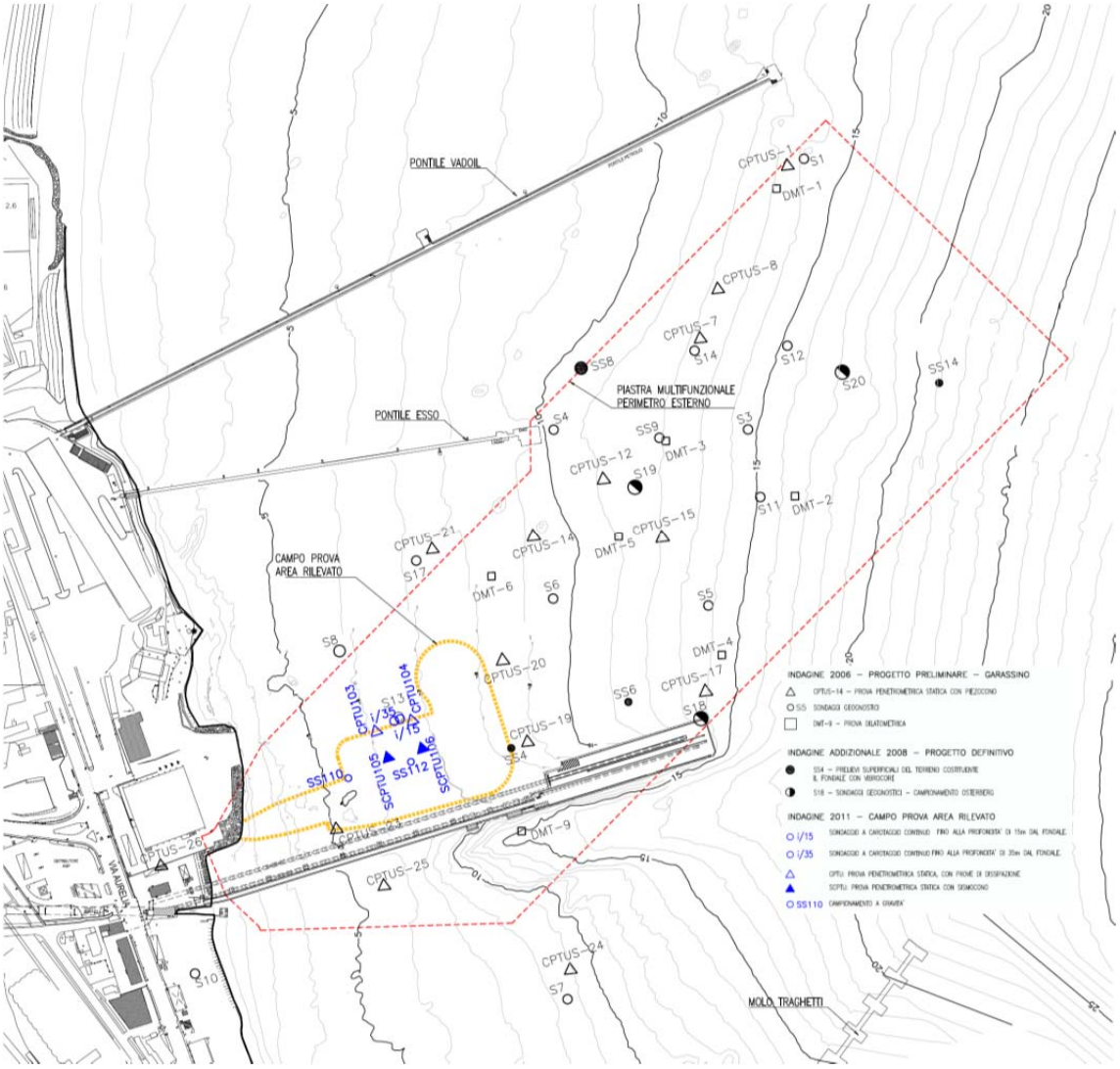


FIG. 5-3- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINI ESEGUITE PER IL PROGETTO DELLA PIASTRA

I risultati di tutte queste indagini sono stati utilizzati per la definizione dell'assetto stratigrafico ed idrogeologico dei terreni di fondazione della piastra multifunzionale, nonché delle loro caratteristiche geotecniche.

I documenti di dettaglio inerenti le indagini pregresse e quelle svolte per il progetto preliminare e definitivo della Piastra sono contenute rispettivamente negli Allegati A e B della presente relazione.

5.1. Indagini antecedenti il Progetto (ante 2006)

5.1.1. Ampliamento Pontile Esso - SGI/SIPAC 1969

Sono stati effettuati 10 sondaggi geognostici lungo lo sviluppo del pontile esistente e del prolungamento, proposto nel progetto di ampliamento, ma non realizzato.
I sondaggi sono stati eseguiti a carotaggio continuo, con prove in sito SPT e Vane Test, prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per le prove di laboratorio.
Sono state individuate sostanzialmente due formazioni, una superficiale di natura granulare ed una profonda costituita da limi ed argille compatti.
La formazione granulare si articola su sottolivelli che, procedendo dal fondale in profondità, sono costituiti da materiali granulari a grana molto fine, limi-limi sabbiosi, con incremento della frazione sabbiosa con la profondità.
Nei sondaggi da S3 a S8B, realizzati in posizione più lontana dalla costa, si è trovato, con spessori variabili, uno strato ghiaioso, il cui letto definisce il termine della deposizione olocenica sovrastante i limi e le argille pleistoceniche.
Questa indagine ha permesso di documentare, ai fini di questo studio, la presenza di un flusso di acqua dolce in condizione artesiana rispetto al fondale, che trova la sua maggiore diffusione attraverso lo strato di ghiaia di cui si è detto.
Nel corso della realizzazione dei sondaggi infatti è stata riscontrata la risalita attraverso il tubo di rivestimento di acqua in pressione, una volta attraversato il livello limoso sabbioso più superficiale e raggiunto lo strato ghiaioso a più alta permeabilità.
Nella Tab. 5-1 sono sintetizzate le osservazioni relative ai 10 sondaggi in oggetto, concernenti i livelli stratigrafici individuati e le relative quote, la presenza del livello ghiaioso e del sottostante livello coesivo limoso argilloso compatto e la risalita artesiana di acqua dolce.

TAB. 5-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - SONDAGGI AMPLIAMENTO PONTILE ESSO - SINTESI DEI DATI STRATIGRAFICI E DELLA EVIDENZA DELLA PRESSIONE ARTESIANA

sondaggio	**quota fondale**	**quota fine sond.**	**letto livello granulare superficiale poco addensato**	**spessore strato superficiale poco addensato**	**strato ghiaioso**	**tetto livello coesivo limoso /argilloso**	**evidenza della presenza artesiana - note riprese dai documenti originali**
	m l.m.m.	m l.m.m.	m l.m.m.	m	m l.m.m.	m l.m.m.	
S1	-4.10	-29.45	-20.30	16.20		-20.30	-
S2	-6.00	-31.00	-16.50	10.50		-16.50	-
S3	-8.10	-33.25	-21.10	13.00	-21.10 ÷ -28.60	-28.60	Venute d'acqua in pressione riscontrate dallo strato di ghiaia.
S4	-11.60	-46.60	-24.20	12.60	-24.20 ÷ -29.70	-29.70	Acqua in pressione a 1 m sopra il livello del mare.
S5	-17.10	-47.50	-30.50	13.40	-30.50 ÷ -47.50	-47.50	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.
S6	-22.60	-52.60	-33.90	11.30	-33.90 ÷ -49.40	-49.40	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.
S7A	-15.20	-55.20	-28.10	12.90	-28.1 0 ÷ -46.10	-46.10	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.
S7B	-16.00	-48.90	-33.10	13.10	-33.10 ÷ -30.80	-	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.
S8A	-18.50	-56.00	-31.20	12.70	-31.20 ÷ -48.50	-48.50	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.
S8B	-18.20	-50.45	-30.70	12.50	-30.70 ÷ -46.40	-46.40	Forte venuta d'acqua in pressione, riscontrata dallo strato di ghiaia.

5.1.2. Pontile Fornicoke - Studio Celotti 1974

Nell'ambito del progetto sono stati effettuati 2 sondaggi a carotaggio continuo con prove SPT e prelievo di campioni.
Nella Tab. 5-2 sono indicati gli elementi caratteristici individuati dai sondaggi, ovvero la quota del letto del livello granulare superficiale poco addensato, la relativa potenza, la presenza del livello ghiaioso e la relativa potenza.
In questi due sondaggi durante la perforazione l'esecutore non ha evidenziato risalita di acqua in pressione dallo strato di ghiaia in particolare.

TAB. 5-2 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - SONDAGGI PONTILE FORNICOKE

Sond	Quota fondale	Quota fine sond.	Letto livello granulare superficiale poco addensato	Spessore strato superficiale poco addensato	Strato ghiaioso	Tetto della roccia/tetto argilla compatta
	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m)	(m s.l.m.m.)	(m l.m.m.)
S1	-10.50	-40.50	-24.00	13.5	-24.00 ÷ fine sond.	-
S2	-13.50	-44.50	-25.00	11.5	-25.00 ÷ fine sond.	-

5.1.3. Prolungamento molo sopraflutti di Capo Vado - RC 1976

Nell'ambito del progetto sono stati effettuati 6 sondaggi geognostici lungo lo sviluppo del prolungamento del futuro molo.
I sondaggi sono stati effettuati a carotaggio continuo, con prove in sito SPT e prelievo di campioni indisturbati e rimaneggiati per le prove di laboratorio.
Nei primi quattro sondaggi, procedendo da Capo Vado verso il largo, si è incontrata roccia al letto del livello granulare sovrastante, costituita da gneiss, denominato Granito del Torrente Letimbro, che si presenta in uno stato alterato.
Nell'ambito del livello granulare superficiale si è chiaramente individuata una porzione poco addensata, poggiante su un livello ghiaioso sabbioso la cui potenza incrementa procedendo verso mare, a scapito della roccia che tende ad inabissarsi per non essere più individuata nei due sondaggi posti sui fondali più profondi.

Nella Tab. 5-3 sono sintetizzate le osservazioni relative ai 6 sondaggi in oggetto, concernenti i livelli stratigrafici individuati e le relative quote, la presenza del livello ghiaioso e la presenza della roccia di Capo Vado, Granito del Torrente Letimbro.
Anche in questo caso l'esecutore non ha evidenziato risalite d'acqua in pressione artesiana dallo strato di ghiaia.

TAB. 5-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - SONDAGGI PROLUNGAMENTO MOLO SOPRAFLUTTI

Sond.	**Quota fondale**	**Quota fine sond.**	**Letto livello granulare superficiale poco addensato**	**Spessore strato superficiale poco addensato**	**Strato ghiaioso**	**Tetto della roccia**
	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m)	(m s.l.m.m.)	(m l.m.m.)
S1	-27.00	-32.00	-30.50	3.5	-30.50 ÷ -31.00	-31.00
S1bis	-30.50	-39.50	-33.50	3.0	-33.50 ÷ -37.20	-37.20
S2	-34.50	-43.50	-39.10	4.6	-39.10 ÷ -41.50	-41.50
S3	-39.50	-47.50	-43.90	4.4	-43.90 ÷ -45.60	-45.60
S4	-42.00	-56.00	-50.00	8.0	-50.00 ÷ fine sond	-
S5	-41.50	-71.50	-55.00	13.5	-55.00 ÷ fine sond	-

5.1.4. Molo Traghetti - RC 1980

Nell'ambito del progetto si fa riferimento alle stratigrafie di 7 sondaggi - S07, S08, S09, S10, S11, S12 e S13.
Per i sondaggi S07 - S09 non sono disponibili le stratigrafie di dettaglio, ma è fornita una sezione stratigrafica schematica da cui si evince la presenza di un livello granulare sabbioso limoso della potenza di circa 10 m poggiante su roccia.
La stessa roccia si individua nel sondaggio S11, mentre il sondaggio S10 incontra l'argilla compatta.
Nella Tab. 5-4 sono sintetizzate le osservazioni relative ai 4 sondaggi per i quali è disponibile la scheda stratigrafica, ovvero i livelli stratigrafici individuati e le relative quote, la presenza del livello ghiaioso e la presenza della roccia di Capo Vado, Granito del Torrente Letimbro.

TAB. 5-4 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - SONDAGGI MOLO TRAGHETTI

Sond.	Quota fondale	Quota fine sond.	Letto livello granulare superficiale poco addensato	Spessore strato superficiale poco addensato	Strato ghiaioso	Tetto della roccia
	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m)	(m s.l.m.m.)	(m l.m.m.)
S10	-8.00	-41.00	-15.30	7.30	-15.30 ÷ -35.00	-35.00 (argilla compatta)
S11	-2.80	-17.30	-14.30	11.50		-14.30 (roccia)
S12	-4.60	-34.70	-18.10	13.50	-18.10 ÷ fine sond	
S13	-12.00	-55.20	-32.00	20.00	-32.00 ÷ fine sond	

5.2. Indagini per il Progetto della Piastra Multifunzionale

5.2.1. Indagine a base del Progetto Preliminare (Garassino 2006)

La campagna geognostica per il Progetto Preliminare è stata svolta nel 2006 a cura dello Studio Garassino.

L'indagine comprende una cospicua mole di indagini in sito, costituite da:

- 13 sondaggi geognostici a carotaggio continuo con prove SPT;
- 14 prove penetrometriche statiche CPTU;
- 7 prove dilatometriche;
- prove pressiometriche nei fori di sondaggio;
- prove di laboratorio.

I risultati della campagna sono stati recepiti e sintetizzati negli elaborati grafici allegati alla presente Relazione Geotecnica.

Si sottolinea che nella campagna d'indagine non si è riusciti a prelevare campioni dal livello più superficiale, costituente il piano di fondazione delle future opere.

Nella seguente Tab. 5-5 sono elencate tutte le indagini eseguite.

TAB. 5-5 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINE STUDIO GARASSINO - 2006

Prova	Quota fondale (m l.m.m.)	Quota fine sond. (m l.m.m.)	Spessore strato superficiale poco addensato non recuperato (m)	note
SONDAGGI				
S1	-14.50	-75.50	4.00	
S3	-14.00	-74.00	5.00	
S4	-11.00	-73.00	1.00	
S5	-15.00	-46.00	2.50	4 prove pressiometriche
S6	-10.00	-66.50	5.50	6 prove pressiometriche
S7	-9.50	-65.50	6.00	
S8	-6.00	-66.50	6.00	
S10	0.00	-60.00	-	
S11	-15.50	-77.00	4.50	
S12	-14.50	-114.50	5.50	
S13	-7.30	-73.00	4.20	7 prove pressiometriche
S14	-12.50	-64.00	5.00	5 prove pressiometriche
S17	-7.30	-63.50	4.70	4 prove pressiometriche
CPTUS				
1	-13.40	-32.00	-	
7	-12.50	-26.00	-	
8	-12.20	-27.00	-	
12	-11.40	-24.72	-	
14	-9.40	-21.40	-	
15	-12.60	-24.80	-	
17	-12.60	-16.90	-	
19	-10.60	-17.70	-	
20	-8.40	-23.60	-	
21	-7.20	-20.00	-	
23	-5.20	-27.80	-	
24	-9.60	-30.40	-	
25	-5.50	-26.10	-	
26	-5.50	-18.80	-	
DMT				
1	-13.50	-39.30	-	
2	-17.10	-29.30	-	
3	-12.00	-25.90	-	
4	-14.40	-27.00	-	
5	-11.30	-24.30	-	
6	-9.00	-22.20	-	
9	-14.50	-23.90	-	

5.2.2. Indagine a base del Progetto Definitivo del 2008

Le indagini svolte per il progetto preliminare nel 2006, di cui si è detto nel precedente paragrafo, per distribuzione areale e tipologia è stata giudicata idonea a fornire tutti gli elementi geologici e geotecnici per il Progetto Definitivo.

E' stato tuttavia necessario condurre una campagna di indagine addizionale, al fine di definire le caratteristiche geotecniche dello strato limoso superficiale, presente in tutta l'area occupata dalla futura nuova piastra multifunzionale.

Le particolari caratteristiche geotecniche in sito di questo strato, che ha uno spessore mediamente pari a 10 m, non ha permesso nel corso dell'indagine Garassino 2006 il recupero di campioni rappresentativi, né disturbati né rimaneggiati.

E' stato quindi necessario condurre un'indagine geognostica addizionale, mirata al prelievo di campioni soltanto da questo strato superficiale.

La necessità di avere campioni rappresentativi di questo terreno si manifesta anche al fine di avere una corretta interpretazione delle prove penetrometriche statiche CPTUS e Dilatometriche del 2006.

Le peculiari condizioni fisiche di questo terreno hanno reso molto difficile l'operazione di prelievo dei campioni, pertanto è stato necessario impiegare metodologie di prelievo che fossero in grado di garantire un campionamento che rispettasse gli scopi dell'indagine.

Il lavoro è stato molto difficile ed i risultati ottenuti hanno richiesto un'approfondita analisi per poter determinare quanto i campioni prelevati fossero rappresentativi del terreno in sito.

E' risultato che il campionamento ed il successivo trasporto in laboratorio, a causa dello stato di bassa consistenza del terreno in sito, hanno modificato le caratteristiche volumetriche del terreno prelevato, così che in laboratorio è giunto un campione di terreno più addensato del terreno in sito.

L'indagine ha comunque permesso la classificazione del terreno e la valutazione dei suoi parametri di resistenza allo stato critico e deformabilità in termini di compressibilità in campo vergine ed in scarico-ricarico. Non è stato invece possibile, a causa del disturbo, ottenere informazioni circa i parametri di stato (indice dei vuoti, contenuto d'acqua, peso di volume) corrispondenti allo stato naturale

dei terreni, né avere informazioni attendibili circa il reale profilo di preconsolidazione.

L'indagine addizionale è stata condotta sia con metodo Vibrocore che con campionamento utilizzando il campionatore con pistone Osterberg.

Il prelievo con Vibrocore è stato spinto fino a 6 m di profondità dal fondale ed ha prelevato sostanzialmente campioni rimaneggiati.

Il campionatore Osterberg è stato impiegato in sondaggi spinti fino a circa 12 m di profondità dal fondale, nei quali è stato eseguito il campionamento continuo del terreno, appunto utilizzando il campionatore Osterberg a pistone.

Nella tabella seguente si riporta il programma di indagini eseguite.

TAB. 5-6 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINE ADDIZIONALE 2008

Sond.	**Quota fondale**	**Quota fine sond.**	**Spessore strato superficiale poco addensato**
	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m)
SONDAGGI A CAMPIONAMENTO CONTINUO - OSTERBERG			
S18	-12.90	-26.00	9.50
S19	-12.00	-24.90	9.00
S20	-18.20	-32.10	8.00
SONDAGGI VIBROCORE			
SS4	-8.00	-12.00	almeno 4.00
SS6	-10.00	-16.00	almeno 6.00
SS8	-9.7	-15.70	almeno 6.00
SS9	-12.00	-18.00	almeno 6.00
SS14	-22.00	-28.00	almeno 6.00

5.2.3. Indagine Progetto Esecutivo - Campo prova area rilevato del 2011

Poiché la campagna di indagine del 2008 non ha permesso il recupero di campioni indisturbati rappresentativi delle condizioni in sito degli strati limosi superficiali, all'interno del campo prova sono state previste una serie di indagini da eseguirsi sul terreno naturale, atte ad ottenere campioni più rappresentativi del terreno in sito.

In particolare, al fine di arrecare il minimo disturbo durante il campionamento si è ricorsi a campionatori di tecnologia Carmacoring, congelando l'intera fustella subito dopo il prelievo.

In aggiunta si sono eseguiti due sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni con Osterberg e Shelby, anche in questo caso congelando immediatamente i campioni ottenuti.

Le indagini così condotte sono quindi state:

- 2 campionamenti a gravità, SS111 e SS113, di lunghezza 2 m con tecnologia Carmacoring (carotiere SW104);
- 2 campionamenti a gravità, denominati SS110 e SS112, del terreno di fondazione con tecnologia Carmacoring (carotiere a pistone CP20), con lunghezza 7 m;
- 4 prove penetrometriche statiche con misura delle pressioni neutre, di cui 2 con misura anche della velocità delle onde di taglio, denominate CPTU103, CPTU104, SCPTU105 ed SCPTU106;
- 2 sondaggi a carotaggio continuo denominati i/35 e i/15 con prelievo di campioni.

I campionamenti Carmacoring da 2 metri non sono andati a buon fine, non consentendo il prelievo del terreno.

Con riferimento ai campionamenti a gravità si sottolinea che essi hanno riguardato i primi 7 metri al di sotto del fondale naturale interessando quindi il solo strato superficiale poco addensato, mentre i sondaggi a carotaggio continuo hanno interessato anche gli strati sottostanti. Tutti i campioni Carmacoring nonché i campioni prelevati dai sondaggi a carotaggio continuo sono stati immediatamente congelati e mandati in laboratorio per essere sottoposti alle prove previste.

I campioni così ottenuti si sono dimostrati effettivamente rappresentativi delle condizioni in sito, consentendo la valutazione dei parametri di stato corrispondenti allo stato naturale, integrando così le informazioni ottenute con la campagna del 2008.

In Tab. 5-7 si riporta una sintesi delle indagini eseguite sul terreno naturale.

TAB. 5-7 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDAGINE ADDIZIONALE 2011

Sond.	**Quota fondale**	**Quota fine sond.**	**Spessore strato superficiale poco addensato**
	(m l.m.m.)	(m l.m.m.)	(m)
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO			
I15	-6.40	-41.40	8.50
I35	-6.40	-21.40	9.50
CAMPIONI CARMACORING			
SS110	-5.60	-12.70	almeno 7 m
SS112	-7.00	-13.74	almeno 7 m
CPTU/SCPTU			
CPTU103	-7.10	-25.00	6.50
CPTU104	-7.80	-23.00	7.00
SCPTU105	-6.60	-23.60	8.00
SCPTU106	-7.50	-24.70	8.00

5.1. Indagini per il Progetto della Nuova Diga Foranea

La campagna di indagine del 2014 ha visto l'esecuzione di vibrocore, lungo l'asse della futura Diga, più due sondaggi realizzati lungo il molo sopraflutti.

Le indagini lungo la Nuova Diga hanno interessato soltanto gli strati più superficiali, penetrando nel fondale per soli 3-4 m. I due sondaggi S1 ed S2 eseguiti all'interno della diga esistente hanno invece attraversato il corpo diga, spingendosi almeno 15-20 m all'interno del fondale, raggiungendo entrambi la roccia di base.
Alcuni campioni sono stati prelevati e sono stati mandati in laboratorio dove si sono eseguite per lo più prove di classificazione.

Tali sondaggi hanno confermato la stratigrafia del molo sopraflutti già valutata con la precedente campagna di indagine e si è potuta meglio definire quella al di sotto dell'asse della Nuova Diga, che mostra in ogni caso la stessa successione di strati:

- L: limi e limi sabbiosi;
- SL: sabbie limose;
- G: ghiaie e ghiaietto;
- R: substrato roccioso.

In aggiunta a tali sondaggi è inoltre stato eseguito nel 2006 un profilo sismico, procedendo da terra verso mare, attraversando la futura diga intorno alla -47 m l.m.m.

Sulla base di questo si è potuto confermato il rapido inabissamento del tetto dello strato roccioso a favore dello spessore di ghiaia, a partire dai sondaggi A-3 e A-4.
In Fig. 5.4 si riporta il profilo sismico eseguito, che mostra in corrispondenza dell'intersezione con l'asse della Diga, un evidente approfondimento del tetto della roccia.

La seguente Tab. 5.8 riassume le stratigrafie dei sondaggi della campagna 2014.

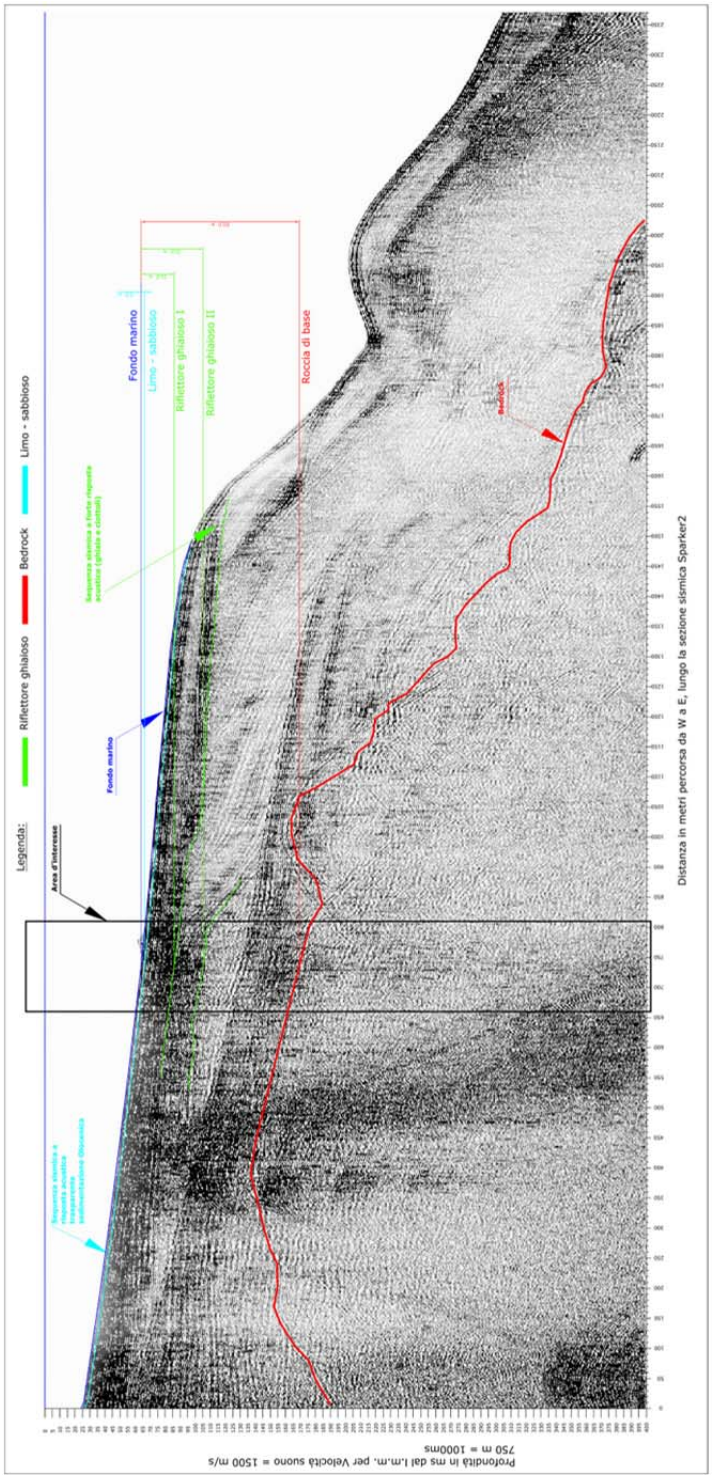


FIG. 5.4 - VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – PROFILO SISMICO

TAB. 5.8 - VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – ASSETTO STRATIGRAFICO – SONDAGGI 2014 NUOVA DIGA FORANEA

SONDAGGIO	STRATO	QUOTE DA FONDALE (m)	SPESSORI (m)
GA-1	L1	0 – 1.3	1.3
	L2	1.3 – 2.75	1.45
	SL	2.75 – fine sondaggio	0.75
GA-2	L1	0 – 1.35	1.35
	L2	1.35 – 2.7	1.35
	SL	2.7 – fine sondaggio	0.3
GA-3	L1	0 – 0.2	0.2
	L2	0.2 – 2.85	2.55
	SL	2.85 – fine sondaggio	0.55
GA-4	L1	0 – 1.4	1.4
	SL	1.4 – fine sondaggio	0.9
GA-5	L1	0 – 1.35	1.35
	SL	1.35 – fine sondaggio	2.45
GA-6	L1	0 – 1.4	1.4
	L2	1.4 – 2.0	0.6
	SL	2.0 – fine sondaggio	0.2
GA-7	L1	0 – 1.85	1.85
	SL	1.85 – fine sondaggio	0.45
GA-8	L1	0 – 0.4	0.4
	L2	0.4 – 1.3	1.3
	SL	1.3 – fine sondaggio	0.3
A-1	L1	0 – 1.3	1.3
	L2	1.3 – 2.3	1.0
	SL	2.3 – fine sondaggio	0.8
A-2	L1	0 – 0.7	0.7
	L2	0.7 – 2.5	1.8
	SL	2.5 – fine sondaggio	1.0
A-3	L1	0 – 1.4	1.4
	L2	1.4 – 2.8	1.4
	SL	2.8 – fine sondaggio	0.8
A-4	L1	0 – 0.5	0.5
	L2	0.5 – 2.1	1.6

	SL	2.1 – fine sondaggio	0.3
A-5	L1	0 – 1.4	1.4
	L2	1.4 – 2.2	0.8
	SL	2.2 – fine sondaggio	0.6
A-6	L1	0 – 0.4	0.4
	L2	0.4 – 1.8	1.8
	SL	1.8 – fine sondaggio	0.6
A-7	L1	0 – 0.5	0.5
	L2	0.5 – 1.2	1.2
	SL	1.2 – fine sondaggio	0.5
A-8	L1	0 – 1.0	1.0
	SL	1.0 – 2.0	1.0
S1	SL	0 – 4.5	4.5
	G	4.5 – 10	5.5
	R	10 – fine sondaggio	11
S2	L1	0 – 1.5	1.5
	SL	1.5 – 6.0	4.5
	G	6.0 – 11	5
	L	11 – 13	2
	R	13 – fine sondaggio	8

5.2. Sintesi delle informazioni ottenute con le varie campagne di indagine

L'analisi delle indagini ante 2006 ha consentito di definire la stratigrafia di base, identificando la presenza di uno strato superficiale scarsamente addensato, al di sotto del quale si trovano invece terreni a consistenza via via maggiore.

Le indagini a base del Preliminare hanno consentito di valutare la potenza dello strato superficiale su tutta l'area di progetto, tuttavia, visto lo scarso addensamento del materiale, non si sono potuti prelevare campioni per la sua caratterizzazione.

L'indagine ha però consentito di caratterizzare lo strato di argilla pleistocenica più profondo tramite prove di laboratorio, lasciando invece alle sole prove penetrometriche l'onere di caratterizzare gli strati superficiali.

Al fine di ottenere informazioni ulteriori relativamente allo strato superficiale, nel 2008 è stata condotta un'ulteriore indagine, finalizzata al solo prelievo di campioni da questo strato, per poterne eseguire le prove di laboratorio.

I campioni prelevati sono risultati tuttavia addensati sia dalla fase di campionamento stessa che dal successivo trasporto in laboratorio. Le prove eseguite hanno quindi consentito la classificazione del materiale e l'individuazione dei parametri di resistenza allo stato critico, nonché le deformabilità in campo vergine ed in scarico-ricarico, lasciando però non definita la caratterizzazione allo stato naturale.

Per sopperire a tale mancanza, nel 2011 sono stati eseguiti prelievi di campioni dello strato superficiale, questa volta congelandoli immediatamente dopo il prelievo, riuscendo così ad ottenere campioni rappresentativi delle condizioni in sito.

Ad oggi l'iter di caratterizzazione seguito, consente la caratterizzazione completa dei terreni di fondazione.

Le indagini eseguite invece nell'area della Nuova Diga Foranea, confermano una stratigrafia simile a quella della Piastra, salvo l'assenza dell'argilla di base.

6. ASSETTO STRATIGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI PROGETTO

La struttura geologica dell'area di progetto mostra la presenza di contatti trasgressivi, evidenziando una complessa storia geologica e morfologica.
Sul basamento roccioso, costituito dagli gneiss di Capo Vado, si sono depositati tanto i sedimenti granulari quaternari quanto le argille compatte probabilmente di età pliocenica.
I medesimi terreni quaternari si sono anche depositati sulle argille compatte.
Si evidenzia dunque una complessa storia deposizionale che ha messo in contatto formazioni e terreni di diverse età geologiche.

6.1. Lineamenti stratigrafici generali dell'area di progetto

La paleomorfologia dell'area rivela una complessa evoluzione che ha modellato particolarmente l'argilla compatta pliocenica, con accentuata geometria sulla quale si sono depositati i sedimenti granulari recenti, costituiti prevalentemente di ghiaia, sabbia e limo.
Il basamento roccioso di Capo Vado si approfondisce sotto il livello del mare in direzione NS, come evidenziato dai sondaggi del Molo Sopraflutti S1, S1bis e S2 e da quelli dell'area traghetti S07, S08, S09, S11.
La roccia quindi raggiunge notevoli profondità nell'area della nuova piastra multifunzionale.
Anche nella zona a terra della nuova piastra la roccia si trova a notevole profondità, superiore probabilmente a -80/-100 m s.l.m.m.
E' presumibile che su questa inclinata superficie rocciosa, interessata da erosioni vallive che si sviluppano in direzione Sud Nord e verso Ovest, cioè nella zona a terra della nuova piastra, si sia depositata l'argilla compatta in epoca pliocenica.
A seguito del sollevamento tettonico della linea di costa, questa argilla ha subito un processo di indurimento che le ha conferito un notevole grado di preconsolidazione, ma è anche stata erosa notevolmente, dando luogo a profonde incisioni.
L'andamento generale del tetto di questa argilla è leggermente inclinato in direzione NO-SE. Questa primitiva conformazione geologica è stata notevolmente

erosa lungo l'attuale linea di costa, dietro la nuova piastra multifunzionale, ma anche nello spazio tra l'area traghetti ed il pontile Fornicoke, dove crea una fossa che risale in direzione NE per poi riprendere la sua originaria pendenza in direzione NE dall'estremità del pontile Fornicoke.

La paleomorfologia dell'argilla pliocenica mostra quindi un alto morfologico in corrispondenza della nuova piastra multifunzionale, avendo subito una pronunciata erosione lungo la linea di costa in direzione NO-SE, e sui due lati, tanto quello a NO fino all'altezza della sezione stratigrafica T4 ovvero fino a metà del pontile Esso, quanto quello a SE fino alla sezione stratigrafica T5 ovvero dall'estremità del pontile Fornicoke.

Queste erosioni laterali hanno lasciato nella zona della piastra delle zone sopraelevate nel tetto dell'argilla pliocenica tra le sezioni stratigrafiche T2-T8.

Le Argille non si sono invece depositate in corrispondenza del molo traghetti e di quello sopraflutti dal momento che queste aree erano di fatto degli alti strutturali rispetto alla adiacente fossa tettonica.

Questa complessa paleomorfologia è stata quindi coperta dai depositi granulari quaternari, ghiaie, sabbie con un'accentuata presenza di limi nella parte più superficiale.

Questi terreni hanno riempito la depressione lungo la linea di costa, ricoprendo l'argilla pliocenica nella zona della piastra, dove descrivono il fondale che si approfondisce in direzione NE. Nella zona a Sud Est hanno poi ricoperto anche il profilo della roccia di Capo Vado nell'area traghetti ed alla radice del molo frangiflutti. Seguendo l'immersione verso NE del tetto dell'argilla pliocenica si nota un considerevole aumento dello spessore della ghiaia e della sabbia limosa, che sono conformi al profilo dell'argilla pliocenica. Gli spessori degli strati limosi superiori a granulometria più fine restano praticamente invariati. Appare dunque di complessa interpretazione il periodo deposizionale di questi terreni granulari che dal tetto dell'argilla compatta mostrano un profilo fine upward, cioè la granulometria diventa più fine dal basso verso l'alto.

E' molto probabile quindi che la deposizione sia avvenuta in ambiente continentale per quanto riguarda la ghiaia e la sabbia limosa soprastante, per poi chiudersi

con una deposizione di terreni a grana fine, prevalentemente limo, in acque poco profonde.

Questo processo deposizionale è stato possibile durante le glaciazioni würminane, quando il livello del mare si è abbassato fino a 100 m sotto il livello attuale.

Alla fine dell'era pleistocenica il mare è risalito da -100 m s.l.m.m. al livello attuale, con continuità tra 50000 e 12000÷10000 anni da oggi, per poi rimanere, con piccole variazioni, al livello attuale. E' in questo periodo che può essere avvenuta la deposizione di questi terreni, con un ambiente deposizionale che è passato progressivamente da continentale a bacino di sedimentazione in acque poco profonde.

La deposizione continentale ha prevalso per gli strati di ghiaia e sabbia, quella in acqua di mare per i terreni fini soprastanti, come testimoniato dall'abbondante presenza di resti di forma marina, conchiglie e fossili di varia natura.

Nel seguente periodo olocenico, ovvero negli ultimi 10000 anni questi terreni sono rimasti sotto il livello del mare, più o meno come nella attuale condizione, esposti maggiormente ad erosione piuttosto che a sedimentazione.

6.2. Stratigrafia media ricavata dalle indagini in situ

L'esame di tutti i sondaggi geognostici e delle prove in situ effettuate nelle varie campagne di indagine, ha mostrato una successione stratigrafica, a partire dal fondale, che vede man mano il passaggio a livelli sempre più grossolani, passando pertanto da livelli a prevalenza limosa, a livelli a prevalenza sabbiosa e poi ghiaiosa. Tali livelli rappresentano la deposizione quaternaria, che si attesta sul livello di argilla pliocenica di base o direttamente sulla roccia per quanto riguarda l'area della diga foranea.

In sintesi la successione stratigrafica dell'area della piastra risulta pertanto:

- Strato superficiale poco addensato;
- Sabbia limosa;
- Ghiaia;
- Argilla;
- Roccia.

Lo strato superficiale, costituito da limo sabbioso, è stato suddiviso in due livelli denominati nel seguito L1 ed L2.

E' possibile osservare che, al di sotto della piattaforma, lo strato limoso superficiale L1 ha uno spessore medio di 4 m, variabile tra 2.5 m e 6 m, tendendo a scomparire verso terra. In corrispondenza dell'esistente pontile fornicoke, è stato quasi completamente dragato e pertanto il suo spessore si riduce ancora di più.
Il livello L2 non risulta presente lungo la costa ed il suo spessore, nell'area della futura piastra, risulta variabile tra 0 e 6 m, mediamente pari a 5 m.
Lo strato denominato SL, presente al di sotto di L1 ed L2, mostra spessori elevati lungo la costa, per ridurre il suo spessore nella prima metà della piastra a circa 4 m ed incrementarlo ancora nella zona a maggiori profondità di fondale fino a circa 13 m. In prossimità della costa, come verificato dal sondaggio S10, al di sotto dello strato di sabbia limosa SL, è presente uno strato di sabbia più pulita S con spessore che supera i 20m. Sempre verso terra si è riscontrata la presenza di una lente a prevalenza limosa, compresa tra lo strato SL e G. Tale lente viene confermata sia delle prove CPTU che dai sondaggi eseguiti nelle diverse campagne di indagine in tale area. Lo strato di ghiaia G, posto al di sotto di SL, si insinua man mano proseguendo dalla costa verso mare, mostrando spessori mediamente pari a 4 m al di sotto della piastra, che si incrementano fino anche a 24 m lungo il lato sud della piattaforma e a 22 m verso l'estremità a mare della stessa.
Al di sotto del livello granulare sabbioso-ghiaioso posto al letto della deposizione quaternaria, si individua la deposizione pliocenica, costituita da argilla limosa/limo argilloso sovraconsolidata, che in alcuni sondaggi giunge a profondità superiore a -100 m s.l.m.m. Soltanto in alcuni sondaggi è stata incontrata quella che si può definire la roccia di base, costituita dalla formazione rocciosa che forma Capo Vado.
Le sezioni stratigrafiche, di cui al seguente paragrafo, cercheranno di descrivere sulla base della stratigrafia riscontrata nei sondaggi e lungo le verticali delle prove in situ, la complessa geomorfologia dell'area di progetto.

6.3. Sezioni stratigrafiche - Piastra

La stratigrafia dei terreni di fondazione che interessano la futura nuova piastra multifunzionale è stata descritta con:

- 5 sezioni stratigrafiche longitudinali, da L1 ad L5, realizzate a partire dalla linea di costa fino al termine della piastra, in direzione SO- NE;
- 10 sezioni stratigrafiche trasversali, da T1 a T10, realizzate a partire dalla linea di costa fino all'estremità della piastra, con direzione NO-SE;
- 4 sezioni stratigrafiche, da 1 a 4, realizzate in corrispondenza del campo prova area rilevato.

La Fig. 6-1 mostra l'ubicazione di tali sezioni che sono riportate negli elaborati grafici della presente relazione.

Tali sezioni sono state redatte tenendo in considerazione le verticali di indagine di tutte le campagne di indagine presentate al cap.5. Nel seguito vengono discusse le sezioni trasversali e longitudinali relative all'intera Piastra Multifunzionale.

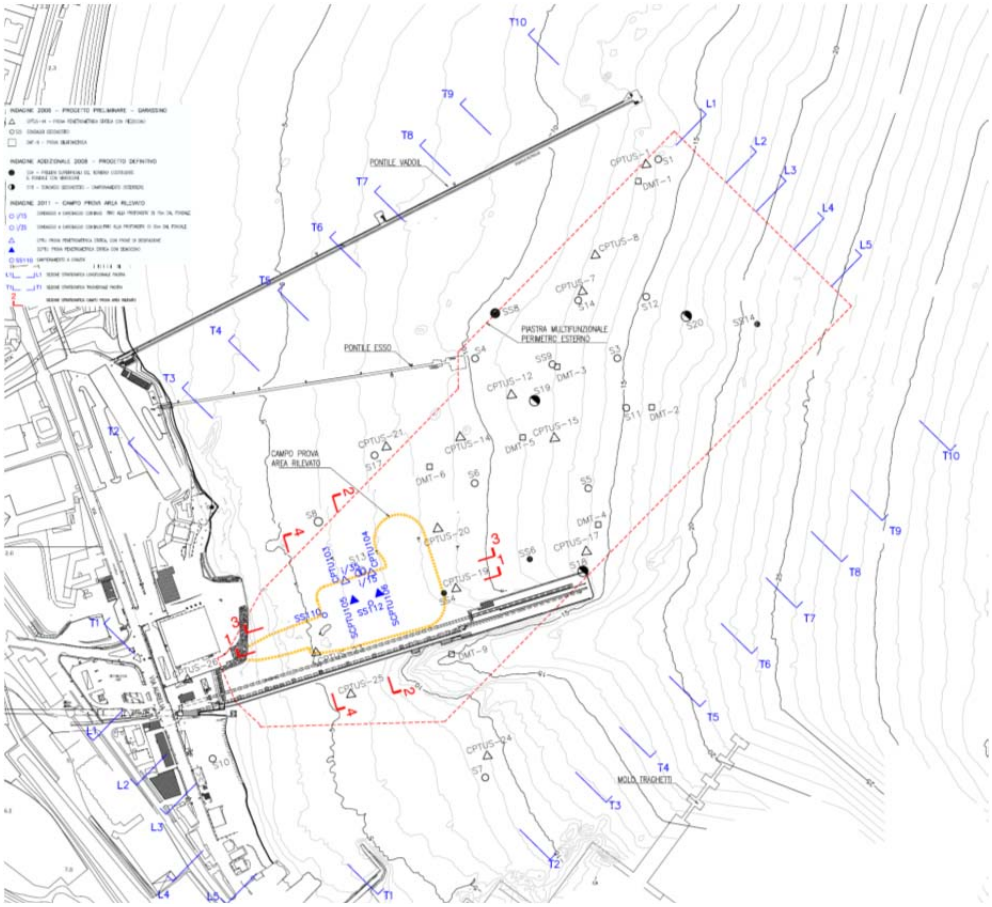


FIG. 6-1- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PLANIMETRIA CON UBICAZIONE SEZIONI STRATIGRAFICHE

6.3.1. Sezioni longitudinali

SEZIONE L1-L1

E' all'estremo occidentale della piastra multifunzionale. Il profilo dell'argilla compatta mostra l'erosione verso la linea di costa, così come la sua immersione verso il largo. Lungo la costa la depressione è stata riempita con terreni prevalentemente sabbio-limosi, mentre verso mare, man mano compaiono anche gli strati limosi superficiali, L1 ed L2, e lo strato di ghiaia, che in questa sezione si protende con un lembo all'interno dei depositi verso la costa.
Compresa tra i limi e la ghiaia vi è poi lo strato sabbioso limoso SL.

SEZIONE L2-L2

Come la precedente si osserva la forma di erosione dell'argilla pliocenica ed i riempimenti in materiale granulare. Procedendo verso il largo man mano compaiono gli strati limosi superficiali e lo strato di ghiaia. Gli strati limosi si mantengono a spessore pressoché costante, mentre la ghiaia e la sabbia limosa tendono ad incrementare la loro potenza verso l'estremità a mare della piattaforma.
Si osserva poi la presenza di una lente limosa verso terra, compresa tra gli strati SL e G.
In corrispondenza del sondaggio S13 si osserva la comparsa della roccia di base a circa -70 m l.m.m.

SEZIONE L3-L3

Anche questa sezione mostra caratteristiche simili alla precedente L2-L2. Si osserva infatti ancora l'erosione dell'argilla di base lato costa ed il suo approfondimento verso il largo, risultando più superficiale soltanto nella zona centrale della piastra. Al di sopra del deposito pliocenico sono poi presenti i diversi livelli granulari, a prevalenza sabbiosa lungo la costa. Proseguendo verso i fondali maggiori compaiono invece gli strati superficiali limosi L1 ed L2, nonché lo strato di ghiaia. E' ancora presente, verso costa, la lente limosa compresa tra SL e G. Si osserva inoltre un progressivo incremento di spessori di questi due livelli, verso i fondali più profondi.

SEZIONE L4-L4

Simile alla precedente, si osserva la scomparsa della lente limosa verso terra. Rimangono invece invariata la successione stratigrafica, che mostra verso terra la presenza di soli strati sabbiosi. Proseguendo verso mare compaiono poi sia gli strati limosi superficiali che lo strato di ghiaia più profondo, che va ad interporsi tra la sabbia limosa SL e l'argilla pliocenica. Sia SL che G vedono un incremento di spessore verso i fondali più profondi.

SEZIONE L5-L5

In questa sezione il tetto dell'argilla di base risulta, nella zona verso costa, più costante rispetto alle precedenti, subendo un innalzamento, concentrato a metà della futura piattaforma, per poi inabissarsi ancora nell'area a fondali maggiori. Al di sopra di tale deposito si osserva la stessa successione stratigrafica delle sezioni precedenti, con gli strati L1 ed L2 che tendono ad essere presenti anche sotto la linea di costa. Lo strato di ghiaia mostra un notevole spessore lungo tutta la sezione. E' nuovamente presente la lente limosa verso terra, compresa tra gli strati SL e G.

A conclusione dell'andamento stratigrafico longitudinale si fa osservare che la deposizione di L1 ed L2 può essere avvenuta anche nella zona attualmente interessata dalla linea di costa, sempre in acque poco profonde e che attualmente siano stati ricoperti da sabbia, sabbia con ciottoli, provenienti dall'entroterra.

6.3.2. Sezioni trasversali

SEZIONE T1-T1

E' ubicata vicino alla linea di costa e mostra il profilo dell'argilla pliocenica che si abbassa verso NO nella paleo valle che è stata riempita di materiali granulari di origine marina e continentale, ovvero lo strato di sabbia S profondo può essere continentale, mentre SL e poi L1 ed L2 di origine marina in acque poco profonde. Questi terreni sono poi stati ricoperti dalla sabbia con ciottoli di probabile origine continentale.

SEZIONE T2-T2

La sezione evidenzia bene la paleomorfologia dell'argilla pliocenica ricoperta dai depositi granulari quaternari. Si osserva la presenza di una lente limosa, compresa tra gli strati SL e G. Proseguendo verso NO si nota poi la progressiva comparsa dello strato sabbioso S, che si interpone tra la ghiaia G e l'argilla di base.

SEZIONE T3-T3

Come la precedente descrive il profilo dell'argilla compatta, dei terreni granulari soprastanti e la roccia di base, riscontrata nel sondaggio S13.
Si nota come la ghiaia tenda a chiudersi e scomparire in direzione NO, mentre incrementa notevolmente il suo spessore proseguendo verso SE. Gli strati limosi superficiali tendono a scomparire verso la linea di costa, mentendo invece uno spessore costante nell'area di progetto, ad accezione della zona in corrispondenza del pontile Fornicoke, in cui il dragaggio ha quasi del tutto asportato L1.

SEZIONE T4-T4

Risulta simile alla precedente, con lo strato di ghiaia che scompare verso NO, mentre incrementa il suo spessore verso SE. Gli strati limosi ancora una volta tendono a scomparire verso la linea di costa ed L1 risulta essere stato dragato in corrispondenza del pontile Fornicoke.

SEZIONE T5-T5

Si osserva un andamento all'incirca costante per gli strati L1, L2 ed SL, mentre G modifica il suo spessore, seguendo le variazioni del tetto dell'argilla. La sezione è nella zona di alto della morfologia dell'argilla compatta.

SEZIONE T6-T6

Come la precedente gli strati limosi e lo strato di sabbia sono pressoché costanti, mentre G segue le variazioni del tetto dell'argilla di base. La sezione è ancora nella zona di alto morfologico dell'argilla compatta.

SEZIONE T7-T7

Il profilo dell'argilla è ancora caratterizzato dall'alto morfologico e lo strato di ghiaia è presente sui due lati della piastra, dove tende ad incrementare il suo spessore. I soprastanti strati L1, L2 ed SL si mantengono invece circa costanti.

SEZIONE T8-T8

E' del tutto simile alla precedente nei suoi caratteri stratigrafici e morfologici.

SEZIONE T9-T9

La sezione è lontana dall'alto morfologico dell'argilla compatta, che mostra un letto ribassato ma regolare.
Lo spessore della ghiaia è notevole ed interessa tutto il profilo. Gli strati SL, L1 ed L2 mostrano ancora un andamento all'incirca costante.

SEZIONE T10-T10

Come la precedente, la sezione è lontana dall'alto morfologico dell'argilla compatta. Tutti gli strati mostrano uno spessore pressoché costante, che risulta maggiorato rispetto alle sezioni precedenti nel caso di G ed SL. Si mantengono invece abbastanza costanti gli spessori di L1 ed L2.

La presenza dello strato di ghiaia tende a scomparire nella zona occidentale tra la piastra e la linea di costa, vicino alla radice del pontile Vadoil, dove il tetto dell'argilla pliocenica compatta ne può aver impedito la deposizione.
In tutta la zona della piastra, dalla linea di costa verso il largo, lo spessore complessivo del limo tenero L1 ed L2 si mantiene abbastanza costante, intorno ai 9-10 m complessivi.

6.4. Sezioni stratigrafiche – Diga Foranea

Per quanto concerne la Diga Foranea sono state definite 5 sezioni stratigrafiche, Fig. 6.2.
La sezione 1-1 è stata realizzata lungo il molo sopraflutti esistente. Le sezioni 2-2, 3-3 e 4-4 sono invece trasversali rispetto alla Piastra e raggiungono l'area della

Diga Foranea. Infine la sezione 5-5, in Fig. 6.3, è posta lungo l'asse della Nuova Diga Foranea.

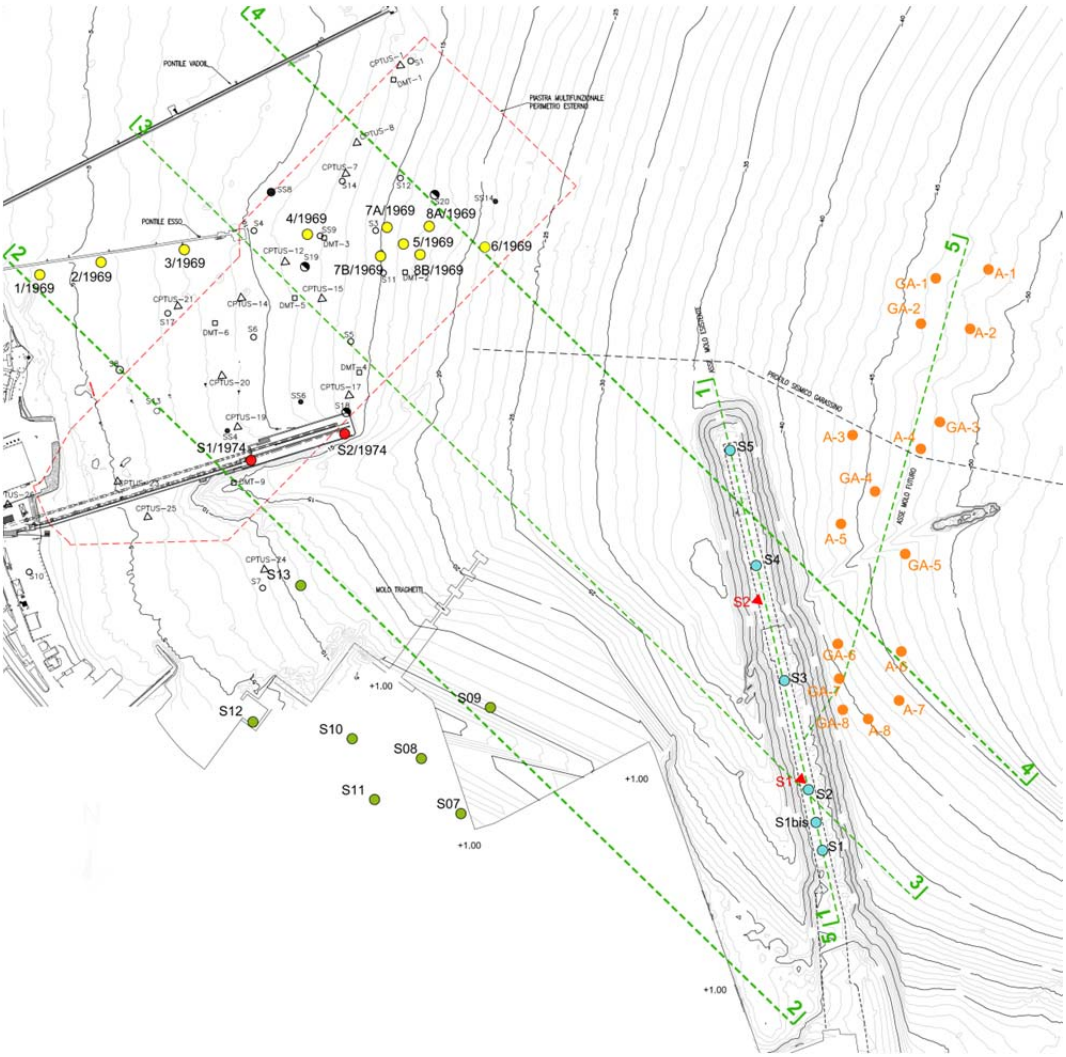


FIG. 6.2 - VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONI STRATIGRAFICHE

Come si può osservare, le indagini svolte confermano anche nell'area della diga la stratigrafia dell'area della Piastra, a meno dell'argilla di base. Si osserva quindi la presenza di circa 5 m di limo, che sparisce verso terra, posto sopra allo strato di sabbia e quindi alla ghiaia. La ghiaia è poi posta sul tetto della roccia di base, che come confermato dal profilo sismico, si inabissa al di sotto dell'asse della diga.

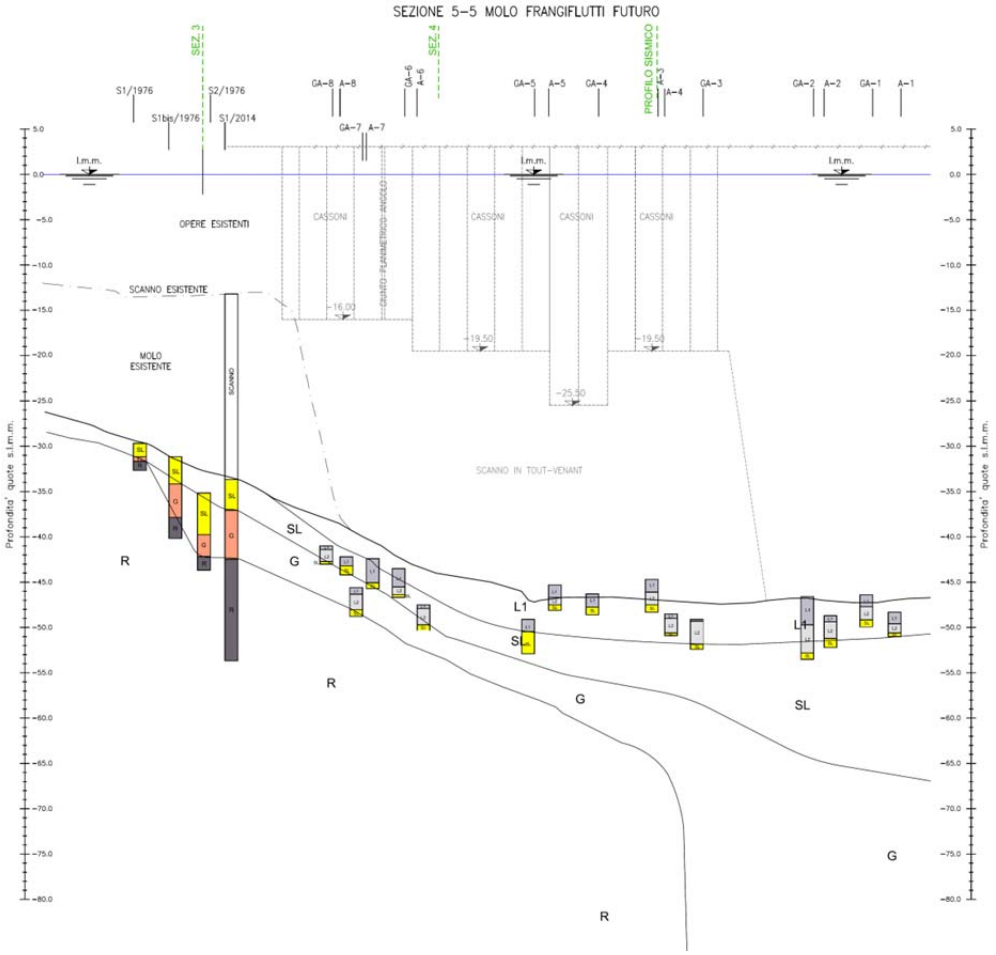


FIG. 6.3 - VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – STRATIGRAFIA NUOVA DIGA FORANEA – SEZIONE LONGITUDINALE

6.5. Idrogeologia

Durante l'indagine eseguita nel 1969 per il pontile Esso fu riscontrata acqua in pressione che si origina principalmente dallo strato di ghiaia G.

Durante lavori di fondazione eseguiti nell'area portuale sono state raccolte testimonianze di acqua in pressione nei terreni di fondazione.

In tutti questi casi sembra trattarsi di acqua dolce, quindi proveniente dall'entroterra.

In particole si è constatato che la risalita artesiana si è verificata soltanto nei sondaggi che hanno attraversato il livello di ghiaia G.

Si può quindi descrivere a linee generali il seguente modello idrogeologico:

- la falda continentale, con livello superiore di qualche metro al medio mare, entra in contatto con il mare attraverso la vasta depressione lungo la costa riempita da terreno granulare mediamente permeabile, vedi le sezioni stratigrafiche longitudinali e la descrizione fornita nel precedente paragrafo;
- in virtù della sua pressione superiore a quella esercitata dal mare spinge il cuneo salino verso il mare e si spinge così al di là della linea di costa;
- lo strato di ghiaia, di elevata permeabilità, cattura questa pressione e la trasporta al largo, fino al termine della nuova piastra ed oltre, come dimostrato nei sondaggi 1969.

Durante l'indagine fu osservato come la risalita d'acqua era di almeno 1 m sopra il livello del mare, sondaggio S4.

Negli altri sondaggi si è evidenziata una forte venuta di acqua in pressione. Considerando la possibile altezza della piattaforma da cui verranno eseguiti i sondaggi e le osservazioni riportate circa le venute di acqua si può considerare che la risalita sia stata tra 2 e 3 m sopra il livello del mare.

Considerando che lo spessore di L1, L2, SL sopra la ghiaia mediamente è intorno a 15 m, ne deriva un gradiente di flusso verticale verso l'alto tra 0.15 e 0.2.

Considerando però che la permeabilità del terreno diminuisce dal tetto della ghiaia verso l'alto, ne deriva che il gradiente varia con la profondità.

In prima approssimazione si può supporre che nello strato di sabbia subito a contatto con la ghiaia il gradiente sia ≤ 0.1, nello strato di limo con consistenza bassa L2 tra 0.15÷0.2 e, nello strato di limo con consistenza bassa L1 possa giungere fino a 0.3, comunque con valori compresi tra 0.25 e 0.30. E' plausibile ritenere che la presenza di tale gradiente possa avere influito sullo stato di addensamento dello strato superficiale di limo.

Per quanto riguarda la storia deposizionale dei terreni è probabile che la deposizione di L1 ed L2 sia avvenuta prima o contemporaneamente alla pressione artesiana. Il tutto è riconducibile all'entroterra, se è stato sempre più alto del livello

del mare e quindi in grado di trasmettere o meno una pressione artesiana nei terreni sotto il livello del mare.

7. PROBLEMATICHE LEGATE ALLA CARATTERIZZAZIONE DELLO STRATO SUPERFICIALE A BASSA CONSISTENZA

Il limo tenero che costituisce i primi due strati del terreno di fondazione, ovvero gli strati L1 ed L2, rappresenta, dal un punto di vista della progettazione geotecnica della Piastra, la maggiore problematica. Trattandosi infatti di un terreno a scarsa consistenza risulta il livello che più influenza la stabilità e i cedimenti.
La sua caratterizzazione è risultata fin da subito problematica, a causa proprio della sua ridotta consistenza, che ha reso particolarmente difficoltoso il recupero di campioni indisturbati, rappresentativi delle condizioni allo stato naturale di tale terreno. Il suo campionamento è stato quindi oggetto di diverse campagne di indagine, così come già evidenziato ai capitoli precedenti e soltanto nell'ultima campagna, eseguita durante il campo prova area rilevato, è stato possibile ottenere dei campioni effettivamente rappresentativi.

7.1. Campionamenti dei limi nelle varie campagne di indagine

Durante la campagna di indagine del 2006 a base del Progetto Preliminare, i sondaggi eseguiti non sono riusciti a recuperare i primi 4-6 m dello strato limoso superficiale. La loro caratterizzazione è quindi stata basata soltanto sui risultati delle prove in situ, CPTU, DMT e pressiometriche, senza quindi prove di laboratorio.
Al fine di poter meglio caratterizzazione il limo superficiale, in fase di Progetto Definitivo, è stata condotta una campagna specifica, volta al campionamento proprio del solo strato limoso superficiale. Sono quindi stati svolti dei campionamenti con tecnologia Vibrocore e Osterberg. I campioni così ottenuti, tuttavia, sono risultati disturbati, sia a causa del campionamento stesso che li ha in taluni casi liquefatti, sia a causa del successivo trasporto in laboratorio, che ne ha causato un addensamento. I successivi risultati delle prove di laboratorio non sono quindi stati ritenuti rappresentativi dello stato naturale di tale terreno in termini di corretta definizione dei parametri di stato (peso di volume, contenuto d'acqua, indice dei vuoti) e di un profilo di preconsolidazione, corrispondenti allo stato di sforzo in sito. Esse hanno comunque permesso la classificazione granulometrica dei terreni, nonchè la definizione dei parametri di resistenza allo stato critico.

Al fine quindi di colmare questa lacuna di informazioni relative allo stato naturale dei terreni, in fase di Progetto Definitivo si decise di eseguire in laboratorio una prova di sedimentazione, con lo scopo di riprodurre in laboratorio lo stato di sforzo del terreno in sito, ricavando così le sue caratteristiche di peso di volume, contenuto di acqua e indice dei vuoti. La caratterizzazione così ottenuta è stata recepita nel Progetto Definitivo. L'ultima campagna del 2011 ha consentito l'effettivo recupero di campioni indisturbati dei limi superficiali consentendone l'effettiva caratterizzazione anche allo stato naturale.
Nel seguito, nell'ottica di fornire una visione organica del lavoro svolto, si ripresenta rapidamente la prova di sedimentazione e si richiamano i risultati ottenuti, congiuntamente alle considerazioni fatte a valle della campagna del 2008 sulle problematiche legate al campionamento.

7.2. Problematiche legate al campionamento

L'indagine 2008 per il progetto definitivo richiedeva il campionamento dello strato superficiale di bassa consistenza L1 per definirne tanto la natura quanto la consistenza, deformabilità, permeabilità, resistenza al taglio ai fini progettuali, per il dimensionamento dei metodi costruttivi da impiegare per la realizzazione delle opere.
Sono stati prescritti prelievo di campioni semidisturbati con il metodo Vibrocore ed indisturbato con l'impiego del campionatore a pistone Osterberg.
L'impiego di questi strumenti nel presente caso non ha dato i risultati sperati. In particolare il campionatore Vibrocore si è infisso nel terreno, con e senza la vibrazione, senza alcuna difficoltà per l'intera lunghezza prevista di 6 m, dopo l'estrazione però il più delle volte è risultato vuoto o pieno soltanto per il 50%.
Essendo la consistenza del terreno molto bassa e la sua natura prevalentemente limosa, durante il campionamento, a seguito delle sovrappressioni indotte dall'infissione del Vibrocore, esso si è fluidificato e, in virtù della sua granulometria molto fine, è passato attraverso le lamelle del cestello di fondo come fosse un fluido.
Soltanto nel caso in cui al fondo del campionatore si sia formato un tappo di terreno più compatto, è stato possibile recuperare il terreno, che però, a seguito della

liquefazione, è risedimentato all'interno del campionatore stesso, rendendolo non più rappresentativo delle reali condizioni in sito.
Con il campionamento continuo tramite il campionatore a pistone Osterberg il risultato è stato migliore, in quanto il metodo sollecita il terreno molto meno del precedente caso.
Con il pistone poi è possibile applicare al fluido interstiziale una depressione, annullando la pressione neutra o addirittura rendendola negativa e quindi consentendo al terreno di sviluppare la resistenza laterale sufficiente a poter essere integralmente estratto con la fustella.
Anche in questo caso però si è avuta l'impressione, una volta aperto il campione in laboratorio, che il terreno prelevato all'interno del campionatore Osterberg fosse più addensato del terreno in sito e che quindi le sue caratteristiche fisiche non fossero completamente rappresentative dello stato naturale. In questo caso l'effettivo disturbo è risultato più associato agli effetti del trasporto in laboratorio che non al campionamento in sé.

7.3. Prova di sedimentazione

L'obiettivo delle prove di sedimentazione è stato quello di integrare le informazioni derivate dalle prove di classificazione, nonché dalle caratteristiche dei terreni allo stato critico con una stima dei principali parametri di stato (peso di volume, contenuto d'acqua, indice dei vuoti) corrispondenti allo stato di sforzo in sito. In aggiunta a ciò si sono simulate le operazioni di campionamento con Vibrocore e Osterberg, al fine di capire meglio il motivo del mancato prelievo di campioni rappresentativi in sito.

7.3.1. Descrizione delle prove di sedimentazione

Le prove di sedimentazione sono state effettuate con il materiale prelevato in sito, utilizzando un cilindro di plexiglas di diametro interno di circa 240 mm e altezza 1.5 m, vedi Fig. 7-1, in cui si vede il cilindro prima del suo utilizzo e l'inizio della fase di posa del materiale limoso.
La prove hanno simulato la sedimentazione dei limi in presenza del gradiente idraulico di cui si è discusso in precedenza.

Da una parte del tubo, in corrispondenza dello strato di ghiaietto di altezza di circa 150 mm, è stato messo un rubinetto, utilizzato per la regolazione del flusso e quindi del gradiente. Il ghiaietto ha lo scopo di separare il punto di immissione dell'acqua dal terreno, distribuendo così al di sotto di esso le pressioni e il flusso d'acqua dal basso verso l'alto. Ha anche lo scopo di dissipare gli eccessi di pressione neutra durante la fase di sedimentazione, quando è stato chiuso il rubinetto e si è lasciato che l'eccesso di pressione neutra potesse equalizzarsi al pelo libero dell'acqua nel cilindro.



FIG. 7-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ATTREZZATURA DELLA PROVA DI SEDIMENTAZIONE - CILINDRO DI PROVA ED INIZIO FASE DI POSA DEL TERRENO

Diametralmente opposto è posizionato un piezometro per la misura della pressione nel ghiaietto. Attraverso la differenza di quota Δh con il livello d'acqua all'interno del tubo e quella alla base del materiale limoso L, è stato possibile misurare il gradiente. Le prove simulano, oltre che la deposizione dei terreni, anche il loro comportamento sotto carico, al fine di individuare le caratteristiche di deformabilità.

Di seguito si riporta l'elenco delle prove eseguite:

- Prova 1: sedimentazione con gradiente, successiva posa di materiale granulare e poi applicazione di un carico a gradiente nullo;
- Prova 2: sedimentazione con gradiente, successiva posa di materiale granulare e poi applicazione di un carico a gradiente non nullo;
- Prova 3: sedimentazione e successivo campionamento con tubi Shelby in presenza di gradiente;
- Prova 4: sedimentazione e successivo campionamento tipo Osterberg con pistone in presenza di gradiente.

7.3.2. Valutazione dei parametri di stato allo stato naturale

Un primo obiettivo è la ricostruzione del profilo di indice dei vuoti in sito con la profondità e, di conseguenza, del peso di volume e del contenuto d'acqua.
La legge che correla la variazione dell'indice dei vuoti con la tensione verticali efficace,può essere così esplicitata:

$$e_f = e_i - C_c \log\left(\frac{\sigma'_i + \sigma'_f}{\sigma'_i}\right)$$

Dove
e_i = indice dei vuoti corrispondente a σ'_i
e_f = indice dei vuoti corrispondente a $\sigma'_f + \sigma'_i$

E' quindi opportuno valutare i valori di e_i e C_c da utilizzare nella formula.
Per quanto concerne C_c, esso è ricavabile dalle prove edometriche seguite in laboratorio.
In particolare tale valore è ricavabile anche se i campioni sono disturbati, ricostruendo la pendenza della curva sforzi-deformazioni in campo vergine.
E' invece di più difficile valutazione il valore di e_i corrispondente a una qualunque tensione efficace σ'_i.
Nel seguito si indica con e_i l'indice dei vuoti in corrispondenza del fondale naturale, ossia a $\sigma'_i \cong 0$. Per comodità numerica si assume $\sigma'_i = 1kPa$, da cui

$$e_f = e_i - C_c \log\left(\frac{1+\sigma'_f}{1}\right).$$

In tal senso si sfrutta la prova di sedimentazione per individuare il valore di e_i al fondale naturale. Tale valore risulterà essere quello in corrispondenza del momento in cui termina la fase di sedimentazione vera e propria e i grani iniziano ad andare in contatto l'uno con l'altro sviluppando quindi la tensione efficace. Questo punto è riconoscibile nella curva H(t), misurata nella prova, da un cambio di pendenza. Una volta individuato tale punto, noto il contenuto d'acqua, si risale al corrispondente indice dei vuoti.

7.3.2.1 Sintesi dei risultati

In Fig. 7-2 si riporta il risultato della prova 1 eseguita in laboratorio, in termini di altezza del terreno nella colonna di sedimentazione nel tempo. Tale prova è infatti l'unica ad aver permesso la misura della fase di sedimentazione fino al suo esaurimento, prima della successiva applicazione del materiale granulare.

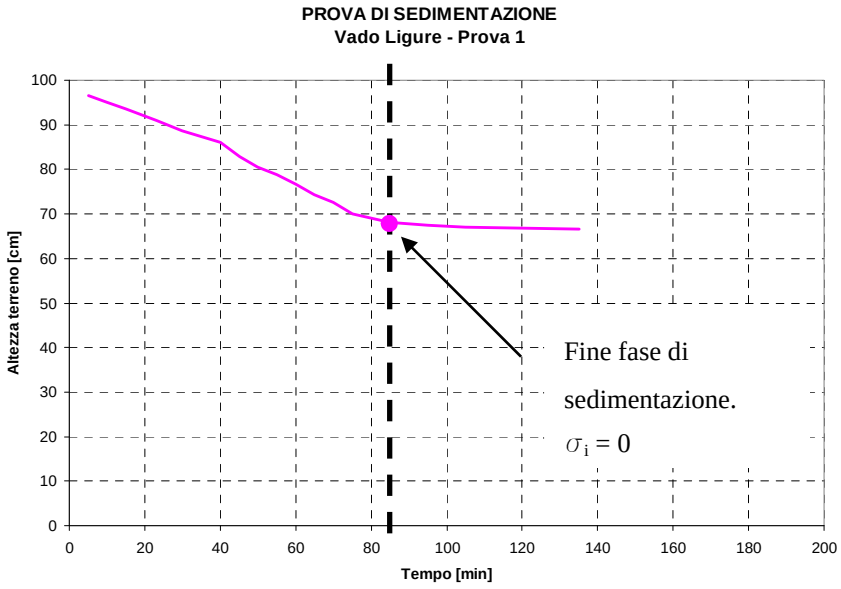


FIG. 7-2 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CURVA H(T) MISURATA NELLA PROVA 1

Al tempo di 84 min si osserva il cambio di pendenza, che, come detto, rappresenta la fine della fase di pura sedimentazione, con le particelle che iniziano ad andare in contatto, facendo nascere le tensioni efficaci. A tale istante la prova restituisce un valore di contenuto d'acqua pari al 72%, da cui si ricava un indice dei vuoti pari a 1,93.

7.3.2.2 Interpretazione della prova

Come anticipato l'obiettivo della prova di sedimentazione è la ricostruzione dei parametri di stato allo stato naturale del terreno. E' infatti possibile ottenere il profilo dell'indice dei vuoti con la tensione efficace essendo

$$e_f = e_i - C_c \log\left(\frac{1+\sigma'_f}{1}\right).$$

Il valore di C_c è ricavabile dai risultati delle prove di laboratorio, che forniscono, vedasi cap.9, un valor medio tra L1 ed L2 pari a 0.36.

Il valore di e_i è stato ricavato dalla prova di sedimentazione stessa, come detto al paragrafo precedente, e risulta pari a 1.93.

Si ricava quindi il primo dei grafici riportati in Fig. 7-3, che mostra l'andamento dell'indice dei vuoti con la tensione efficace per gli strati limosi superficiali. Da tale grafico si possono quindi ricavare i restanti grafici di Fig. 7-3, ossia il profilo del contenuto d'acqua e del peso di volume con la tensione efficace. Avendo poi a a disposizione il profilo peso di volume/tensione efficace, è possibile ricavare il profilo di tutte e tre le grandezze con la profondità, vedasi Fig. 7-4.

Tali grafici forniscono quindi i parametri di stato dei terreni limosi di fondazione allo stato naturale in sito in condizioni di normalconsolidazione.

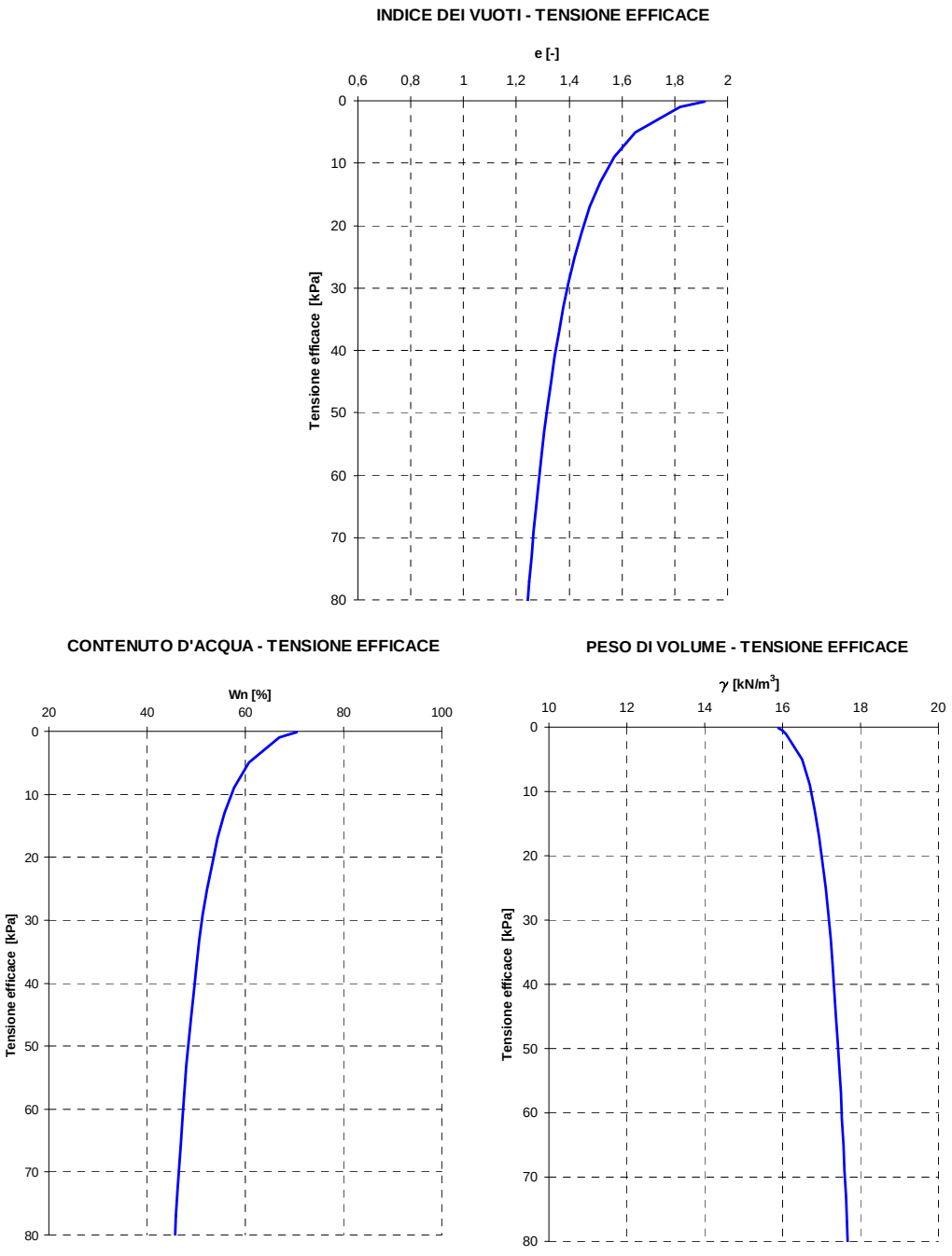


FIG. 7-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROFILO INDICE DEI VUOTI, CONTENUTO D'ACQUA E PESO DI VOLUME CON LE TENSIONI EFFICACI RICAVATO DALLA PROVA DI SEDIMENTAZIONE

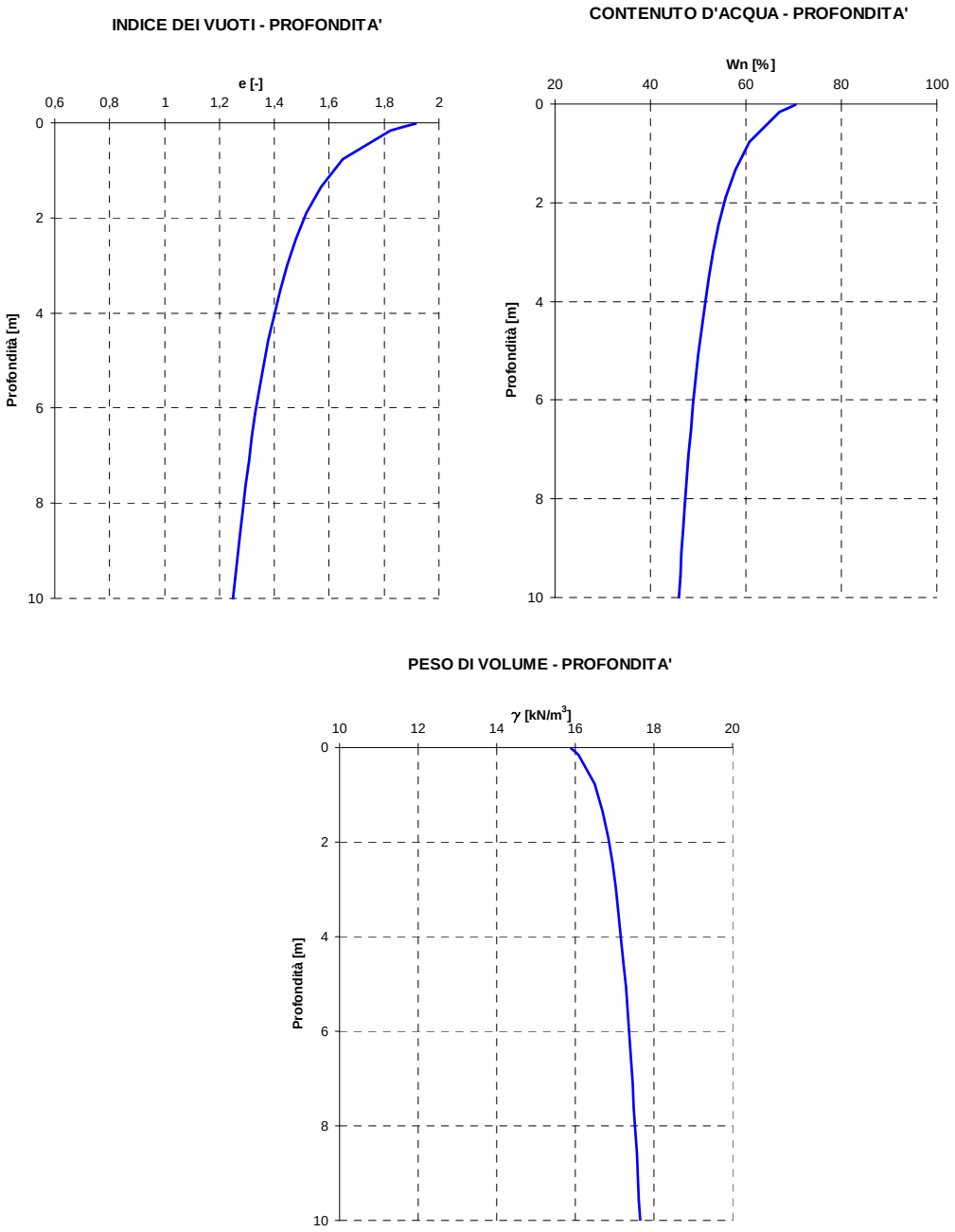


FIG. 7-4 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROFILO DELL'INDICE DEI VUOTI, DEL CONTENUTO D'ACQUA E DEL PESO DI VOLUME CON LA PROFONDITÀ RICAVATI DALLA PROVA DI SEDIMENTAZIONE

7.3.3. Effetto del campionamento

L'effetto del campionamento sui terreni in sito è stato simulato tramite due diverse prove di sedimentazione, simulando in una l'infissione del campionatore Shelby, e nell'altra quella del campionatore Osterberg.

Dall'analisi dei risultati delle prove si è potuto dedurre che:

- l'infissione del campionatore non produce estrusione del terreno verso l'esterno della fustella, ovvero nel campionatore non si forma il tappo;
- il cambio di volume che accompagna l'infissione della fustella genera un notevole aumento di pressione neutra nel terreno, che porta il terreno in condizione prossime alla rottura;
- l'effetto della rottura per liquefazione dovuta all'infissione comporta una successiva sedimentazione del terreno all'interno della fustella campionatrice, rendendo quindi il terreno campionato maggiormente addensato. A riprova di questo si osserva, alla fine della prova di infissione, un peso di volume maggiore rispetto a quello ottenuto nelle prove di sola sedimentazione sena simulazione del campionamento;
- nel caso del campionamento con l'Osterberg, l'incremento di sovrappressione prodotto dall'infissione risulta inferiore rispetto al caso con il campionatore Shelby. Infatti tali sovrappressioni vengono azzerate grazie all'effetto vuoto generato dal pistone, evitando così la rottura del terreno.

In ogni caso anche il trasporto in laboratorio ha contribuito ad alterare le proprietà del terreno, modificandone l'indice dei vuoti ed il contenuto d'acqua. A riprova di tale effetto di addensamento si anticipano nella Fig. 7-5 i valori di indici dei vuoti ricavati dai campioni della campagna del 2008, i cui risultati verranno meglio trattati nel successivo cap.9. Tali valori vengono confrontati con il profilo dell'indice dei vuoti ricavato dalla colonna di sedimentazione. Come si osserva i valori di laboratorio sono sempre inferiori a quelli della prova di sedimentazione, indicando un maggiore addensamento di tali campioni rispetto alla condizione naturale di normalconsolidazione, ascrivibile proprio al disturbo apportato dal citato campionamento e dal trasporto.

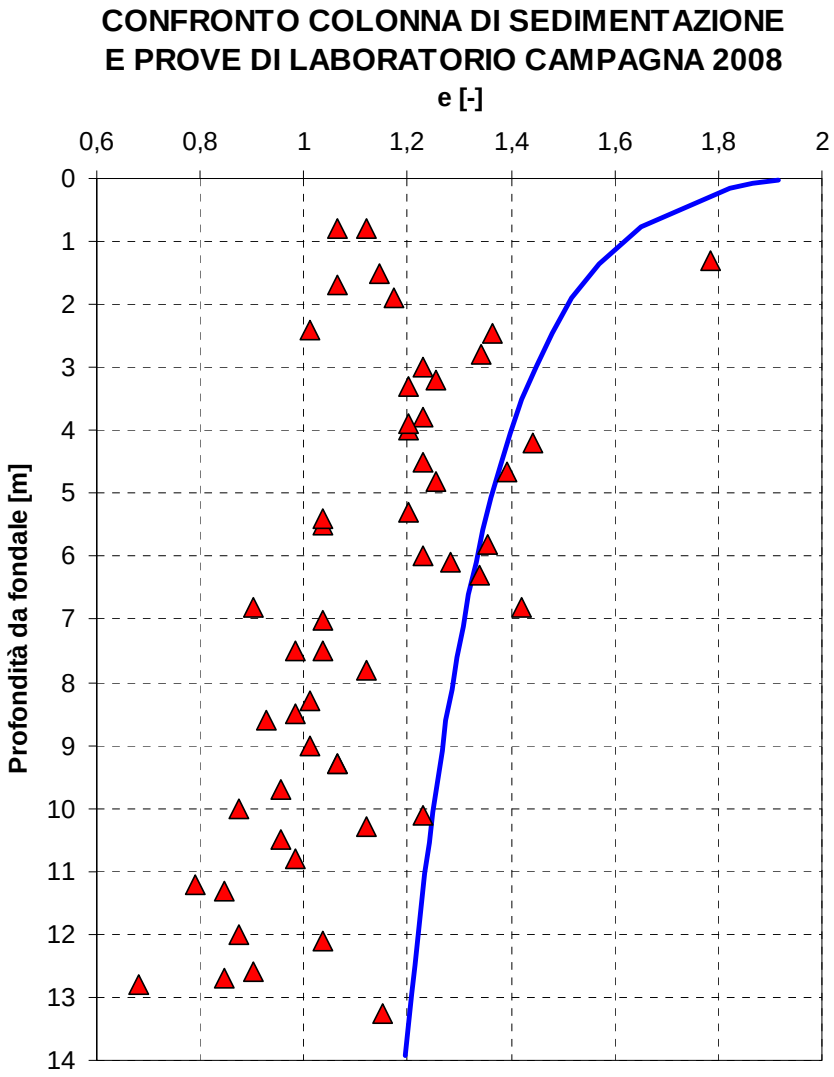


FIG. 7-5 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CONFRONTO DEL PROFILO DELL'INDICE DEI VUOTI CON LA PROFONDITÀ OTTENUTO CON LA COLONNA DI SEDIMENTAZIONE E QUELLO DALLE PROVE DI LABORATORIO DELLA CAMPAGNA DEL 2008

Nella campagna del 2011, invece, si sono utilizzati dei campionatori più leggeri (in plastica anziché di metallo), dotati di pistone, quali i campionatori Carmacoring, e dei campionatori Osterberg e Shelby. In tutti i casi i campioni sono poi

stati immediatamente congelati, minimizzando così il disturbo del trasporto. In Fig. 7-6 si riporta quindi il confronto del profilo dell'indice dei vuoti ottenuto con le prove di laboratorio eseguite sui campioni della nuova campagna rispetto a quello della colonna di sedimentazione. A meno dei primi tre metri più superficiali si osserva un buon accordo tra i due, confermando quindi la rappresentatività dei campioni prelevati nella campagna del 2011.

Lo scostamento tra l'indice dei vuoti misurato nei primi tre metri da quello ricavato dalla prova di sedimentazione è legato alla preconsolidazione del livello L1 per effetto del moto ondoso (tale effetto verrà discusso nel dettaglio al cap. 9.4.2).

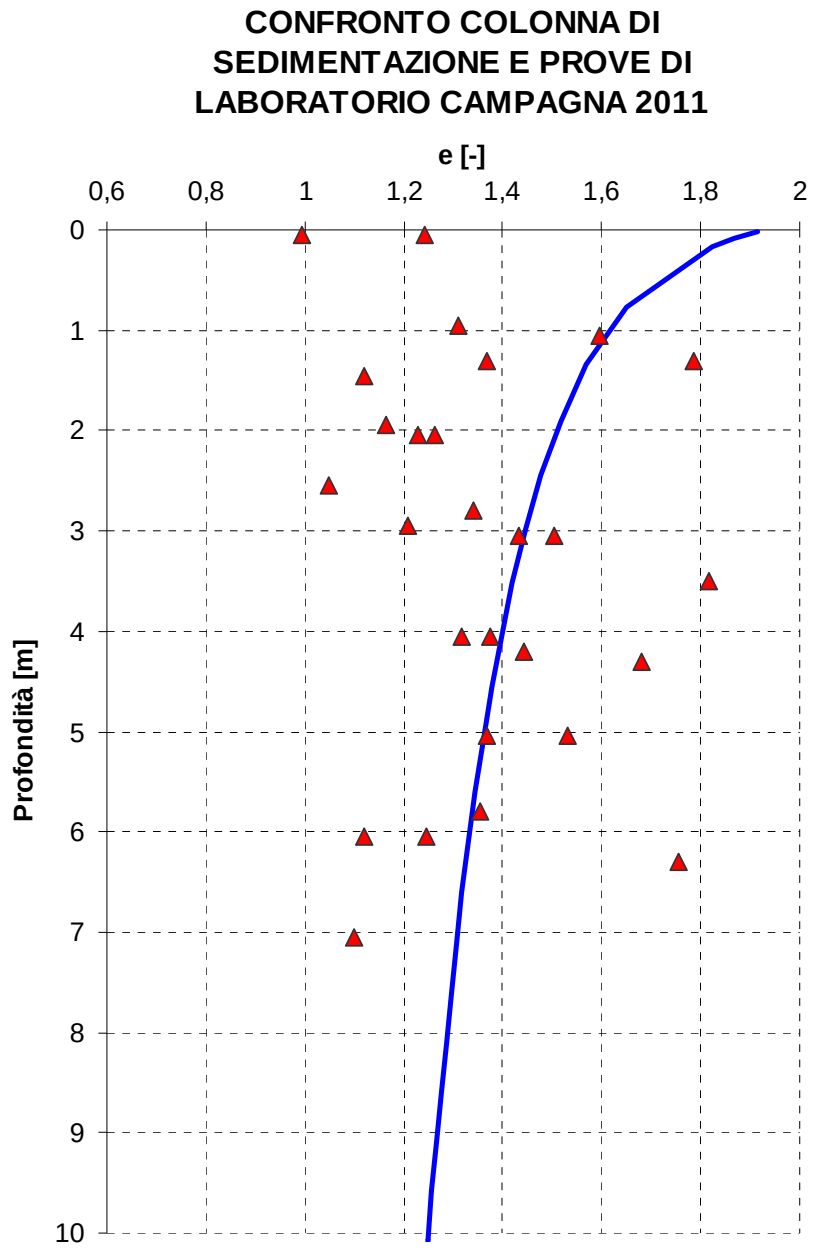


FIG. 7-6 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CONFRONTO DEL PROFILO DELL'INDICE DEI VUOTI CON LA PROFONDITÀ OTTENUTO CON LA COLONNA DI SEDIMENTAZIONE E QUELLO DALLE PROVE DI LABORATORIO DELLA CAMPAGNA DEL 2011

7.3.4. Ripercussioni progettuali dello scarso addensamento dei limi

In sede di progetto definitivo, non disponendo di altre informazioni, si caratterizzarono gli strati L1 ed L2 in accordo con i risultati della prova di sedimentazione, considerandoli cioè entrambi normalconsolidati.
Si assunse quindi per L1 $\gamma = 14.5 kN/m^3$ e per L2 $\gamma = 16.5 kN/m^3$, corrispondenti rispettivamente a $e_0 = 1.8$ ed $e_0 = 1.5$.

Al fine di migliorare le caratteristiche geotecniche dei limi si decise di mettere in opera uno strato di materiale granulare, denominato bonifico, avente lo scopo di compensare lo scarso addensamento del terreno naturale e di evitarne la rottura per effetto della costruzione delle opere.
Le prove di sedimentazione hanno avuto proprio lo scopo di simulare la posa di detto bonifico prima, e l'applicazione del carico poi, al fine di verificare l'effettivo addensamento del terreno naturale, valutandone anche la deformabilità.
La variazione dell'indice dei vuoti dei limi a seguito dell'applicazione del bonifico prima e del carico poi, si è mostrata in linea con il diagramma (e, σ'_v) ricavato in Fig. 7-3, mostrando quindi la rappresentatività dell'indice di compressibilità Cc assunto (Cc = 0.36).
Come già accennato, le prove del 2011 hanno evidenziato la preconsolidazione di L1 per effetto del carico ciclico da onda, giustificando lo scostamento tra l'indice dei vuoti misurato nei primi tre metri del fondale e l'indice dei vuoti derivante dalla colonna di sedimentazione.
In tale ottica, quindi, lo strato L1 risulta già addensato dalla preconsolidazione. Tuttavia non si rinuncia alla messa in opera del bonifico che comunque risulta fondamentale anche come transizione granulometrica tra il terreno naturale e lo scanno dei cassoni a giorno o tra il terreno naturale e il tout-venant del rilevato.

8. RISULTATI DELLE INDAGINI IN SITU

Nel Progetto Esecutivo si considerano le indagini relative alle diverse campagne eseguite nell'area, con particolare attenzione a quelle specifiche del progetto della Piastra, ossia:

- Campagna del Progetto Preliminare del 2006 - Garassino;
- Campagna del Progetto Definitivo del 2008;
- Campagna del Progetto Esecutivo Campo Prova Area Rilevato del 2011.

I risultati delle indagini sono mostrati sia nelle tavole allegate che nella presente relazione dove sono descritti nel dettaglio. In particolare nel presente capitolo si analizzano le prove in situ, mentre nel successivo verranno trattate le prove di laboratorio.

Le indagini in situ eseguite sono riconducibili alle seguenti tipologie:

- Prove penetrometriche statiche CPTU/SCPTU,
- Prove penetrometriche dinamiche SPT,
- Prove dilatometriche,
- Prove pressiometriche.

Di seguito vengono sinteticamente descritti i risultati ottenuti dalle precedenti prove, utilizzati per definire la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione della nuova piastra multifunzionale.

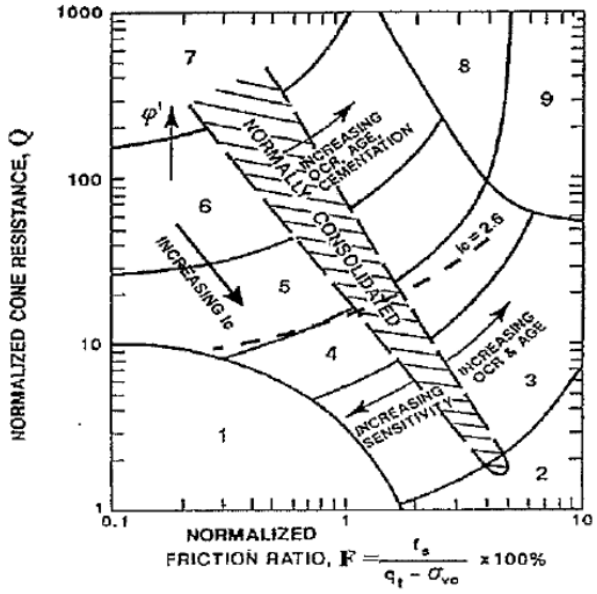
8.1. Prove penetrometriche statiche CPTU/SCPTU

8.1.1. Interpretazione delle prove penetrometriche

Il risultato dell'interpretazione delle prove è riportato nei disegni allegati. Di seguito si indicano le correlazioni utilizzate per la valutazione dei vari parametri. Si sottolinea che tali correlazioni sono state tarate sulla base dei risultati delle prove di laboratorio.

- **Ic - Indice per la classificazione dei terreni**
  (Robertson 2009)

$$I_c = \sqrt{(3{,}47 - \log(Q))^2 + (\log(F) + 1{,}22)^2}$$



Zone	*Soil Behavior Type*	I_c
1	*Sensitive, fine grained*	N/A
2	*Organic soils – peats*	> 3.6
3	*Clays – silty clay to clay*	2.95 – 3.6
4	*Silt mixtures – clayey silt to silty clay*	2.60 – 2.95
5	*Sand mixtures – silty sand to sandy silt*	2.05 – 2.6
6	*Sands – clean sand to silty sand*	1.31 – 2.05
7	*Gravelly sand to dense sand*	< 1.31
8	*Very stiff sand to clayey sand**	N/A
9	*Very stiff, fine grained**	N/A

** Heavily overconsolidated or cemented*

L'indice di classificazione, Ic, rappresenta il comportamento del terreno e non la sua granulometria: si parla quindi di terreni a comportamento non drenato, clay like soil, (Ic >2.6) e drenato, sand like soil, (Ic <2.6).

La valutazione dell'indice Ic è fatta attraverso il parametro F e Q, che rap presenta l'adimensionalizzazione della qt (resistenza alla punta corretta):

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{v0}} \cdot 100$$

$$Q = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{P_a} \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n .$$

Pa è la pressione atmosferica e quindi pari a 100 kPa, il parametro *n* ha in vece diversi valori a seconda della tipologia di terreno:

- Argille: n= 1;
- Sabbie: n= 0.5;
- Limi: n = 0.7.

Poiché a priori non si conosce la natura del terreno, la valutazione di Ic è fatta in maniera iterativa:

- Fase 1: n=1
  - si valuta Q;
  - si valuta Ic.
  - Se Ic > 2.6 allora il procedimento termina ed il terreno è un clay like soil.
  - Se Ic < 2.6 si passa alla fase 2.
- Fase 2: n =0.5
  - si valuta Q;
  - si valuta Ic;
  - Se Ic < 2.6 il terreno è a comportamento granulare e il procedimento termina.
  - Se Ic > 2.6 il terreno è un limo plastico e si passa alla fase 3.
- Fase 3: n=0.7
  - si valuta Q;
  - si valuta Ic. Il valore così ottenuto è rappresentativo del terreno.

I valori di Ic così ottenuti possono essere utilizzati per individuare la caratterizzazione dei terreni.

- **γ - Peso di volume**
  (Mayne et al. 2010 e Robertson et al. 2010)

$$\gamma_{sat} = 11{,}46 + 0{,}33\log z + 3{,}1\log f_s + 0{,}7\log q_T$$

$$\gamma_{sat} = \gamma_w \left[0{,}27\log\left(\frac{f_s}{q_T}100\right) + 0{,}36\log\left(\frac{q_T}{Pa}\right) + 1{,}236 \right] \frac{G_s}{2{,}65}$$

Nel calcolo si sfruttano entrambe le correlazioni e si restituisce come peso di volume la media aritmetica dei valori calcolati con le due correlazioni sopra citate.

- **OCR - Grado di sovraconsolidazione**

$$OCR = \left[\frac{0.192\left(q_t / Pa\right)^{0.22}}{\left(1 - \sin\phi'\right)\left(\sigma'_{v0} / Pa\right)^{0.31}} \right]^{\left(\frac{1}{\sin\phi'} - 0.27\right)}$$

- **Cu - resistenza al taglio non drenata per terreni coesivi**
  (Robertson 2009)

$$c_u = \frac{q_T - \sigma_{v0}}{N_k}$$

con N_k = 25 da taratura con il laboratorio

- **ϕ' - Resistenza al taglio drenata**
  (Mayne e Campanella 2005, Kulhawy and Mayne 1990)

Se 0.1<Bq<1

$$\phi' = 29.5° \mathrm{Bq}^{0.121}\left[0.256 + 0.336\,\mathrm{Bq} + \log \mathrm{Q}\right]$$

con :

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}}$$

Se Bq<0.1

$\phi' = 17.6° + 11° \log(q_{t1})$

con

$$q_{t1} = \frac{q_T / P_a}{(\sigma'_{v0} / P_a)^{0.5}}$$

- **M - Modulo edometrico**

(Robertson 2009)

$M = \alpha_M (q_T - \sigma_{v0})$

$\alpha_M = Q$ se $Q \le 14$

$\alpha_M = 14$ se $Q > 14$

- **E - Modulo elastico**

(Robertson 2009)

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\upsilon)}{1-\upsilon} M$$ limi, con ν = 0,35

$E = \alpha_E (q_T - \sigma_{v0})$ sabbie/ghiaie

Con $\alpha_E = 0{,}015\left[10^{(0{,}55 I_c + 1{,}68)}\right]$

- **Vs - Velocità delle onde di taglio**

(Hegazy e Mayne 1995)

$$Vs = \left[10.1 \log(q_t) - 11.4\right]^{1.67} \left[\frac{f_s}{q_t} 100\right]^{0.3}$$

- **G_{max} - Modulo di taglio alle piccole deformazioni**

$$G_{max} = \frac{\gamma_t}{g} \cdot Vs^2$$

con:

g = 9.81 m^2/s

γ_t = da calcolo

8.1.2. Risultati ottenuti dalle prove penetrometriche

Le prove penetrometriche statiche con la misura della pressione neutra hanno mostrato la presenza nei primi 9/10 m di terreni con bassi valori di resistenza alla punta, pari a circa 1 MPa, che poi incrementano leggermente con la profondità. In tale strato i criteri di classificazione del terreno in base alle resistenze, q_c ed f_s, descrivono il terreno con comportamento limo sabbioso o limo argilloso. Le prove confermano quindi la stratigrafia dei sondaggi, individuando un primo strato limoso a scarsa consistenza, che può essere suddiviso in due sottostrati, L1 ed L2, dove il secondo mostra valori di resistenza alla punta leggermente superiori a L1. L'incremento di pressione neutra registrata in L1 ed L2 risulta pressoché positivo, indicando un comportamento tendenzialmente contraente, ad eccezione dei primi 2-3 metri dove si osservano invece delle sovrappressioni negative. In superficie si riscontra una sovraconsolidazione, che poi scompare con la profondità. Le prove individuano poi il passaggio ad uno strato a comportamento più sabbioso, identificabile con lo strato SL, con un aumento di resistenza alla punta ed un minore incremento di pressione neutra in relazione allo sforzo efficace agente rispetto a quanto misurato in L1 ed L2. Al di sotto di SL le prove vanno poi a rifiuto, incontrando lo strato ghiaioso G.

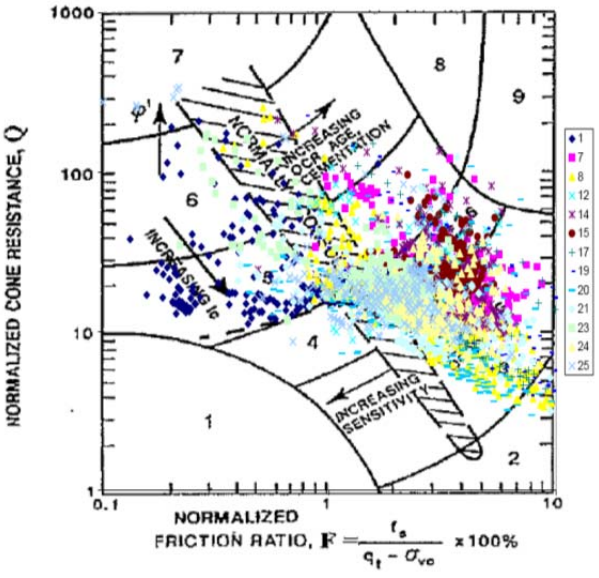
Per meglio individuare la classificazione dei terreni limosi superficiali si riportano nelle figure da Fig. 8-3 a Fig. 8-2 i risultati della classificazione sulla carta di Robertson, distinguendo il livello L1 da L2, per le CPTU delle indagini sia del 2011 che del 2006.

I risultati di entrambe le campagne mostrano la maggior parte dei punti appartenenti alle aree 4, 5 ed anche 3 nel caso delle indagini del 2006. I campi 4 e 5 corri-

spondono ai limi argillosi/argille limose e sabbie limose/limi sabbiosi rispettivamente. Il campo 3 corrisponde a terreni con comportamento tipo argille o limi argillosi.

Come si mostrerà al capitolo successivo si ha una corrispondenza molto buona tra la classificazione ottenuta dalle prove laboratorio delle indagini del 2008 e 2011 con quella derivata dalle CPTU. Le campagne del 2008 e del 2011 hanno infatti evidenziato una maggiore plasticità dei limi relativi ai campioni della campagna 2008, rispetto invece a quelli del 2011. Questo indica quindi una maggiore plasticità dei limi verso fondali maggiori, essendo la maggior parte delle indagini della campagna del 2008 stata eseguita a profondità maggiori rispetto a quella del 2011, eseguita invece verso la costa. Tale differenza risulta in accordo con i grafici di classificazione, dove infatti le CPTU del 2006 mostrano dei punti anche nel campo 3, più vicino a terreni con comportamento clay-like soil, essendo relativi a terreni a maggior plasticità.

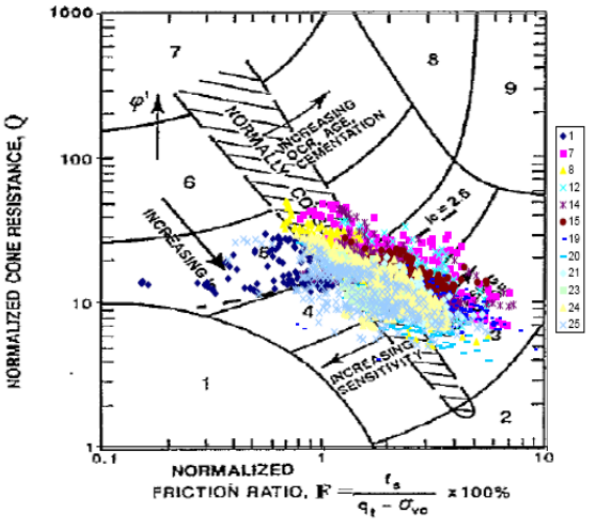
In entrambe le campagne di CPTU si osserva comunque una preconsolidazione superficiale, che scompare nello strato L2.



Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	*Sensitive, fine grained*	N/A
2	*Organic soils – peats*	> 3.6
3	*Clays – silty clay to clay*	2.95 – 3.6
4	*Silt mixtures – clayey silt to silty clay*	2.60 – 2.95
5	*Sand mixtures – silty sand to sandy silt*	2.05 – 2.6
6	*Sands – clean sand to silty sand*	1.31 – 2.05
7	*Gravelly sand to dense sand*	< 1.31
8	*Very stiff sand to clayey sand**	N/A
9	*Very stiff, fine grained**	N/A

** Heavily overconsolidated or cemented*

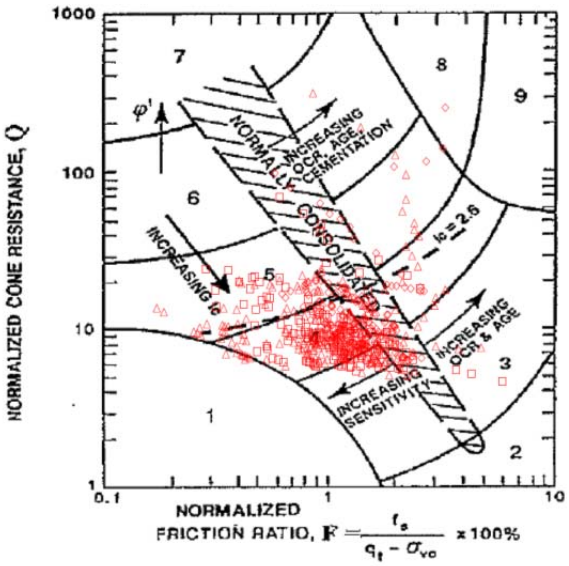
FIG. 8-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CLASSIFICAZIONE SULLA CARTA DI ROBERTSON PER IL LIVELLO L1 CPTU 2006



Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	*Sensitive, fine grained*	N/A
2	*Organic soils – peats*	> 3.6
3	*Clays – silty clay to clay*	2.95 – 3.6
4	*Silt mixtures – clayey silt to silty clay*	2.60 – 2.95
5	*Sand mixtures – silty sand to sandy silt*	2.05 – 2.6
6	*Sands – clean sand to silty sand*	1.31 – 2.05
7	*Gravelly sand to dense sand*	< 1.31
8	*Very stiff sand to clayey sand**	N/A
9	*Very stiff, fine grained**	N/A

** Heavily overconsolidated or cemented*

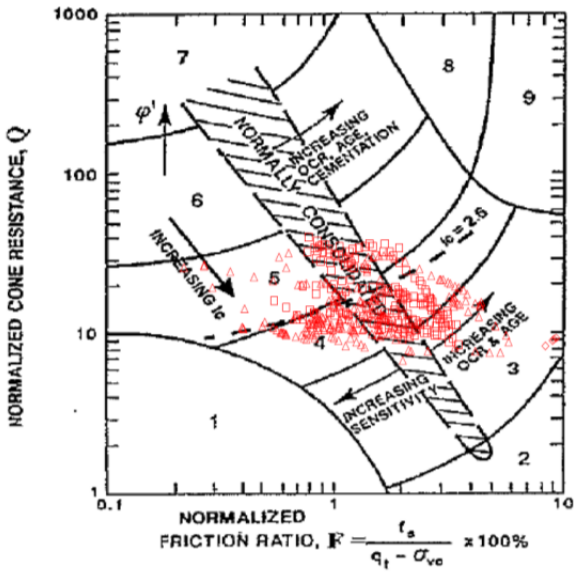
FIG. 8-2 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CLASSIFICAZIONE SULLA CARTA DI ROBERTSON PER IL LIVELLO L2 CPTU 2006



Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	*Sensitive, fine grained*	N/A
2	*Organic soils – peats*	> 3.6
3	*Clays – silty clay to clay*	2.95 – 3.6
4	*Silt mixtures – clayey silt to silty clay*	2.60 – 2.95
5	*Sand mixtures – silty sand to sandy silt*	2.05 – 2.6
6	*Sands – clean sand to silty sand*	1.31 – 2.05
7	*Gravelly sand to dense sand*	< 1.31
8	*Very stiff sand to clayey sand**	N/A
9	*Very stiff, fine grained**	N/A

** Heavily overconsolidated or cemented*

FIG. 8-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CLASSIFICAZIONE SULLA CARTA DI ROBERTSON PER IL LIVELLO L1 CPTU 2011



Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – peats	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

* Heavily overconsolidated or cemented

FIG. 8-4 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CLASSIFICAZIONE SULLA CARTA DI ROBERTSON PER IL LIVELLO L2 CPTU 2011

Si riporta nelle figure seguenti una sintesi dei risultati ottenuti dalle prove penetrometriche. Per le interpretazioni complete si rimanda agli elaborati grafici allegati.

Vengono di seguito forniti i valori medi delle diverse grandezze considerate, ottenuti da ciascuna campagna di indagine

Si considerano di seguito gli andamenti con la profondità di:

- Peso di volume γ - Fig. 8-5;
- Grado di sovraconsolidazione OCR - Fig. 8-5;
- Angolo d'attrito ϕ' - Fig. 8-6;
- Coesione non drenata C_u dei soli limi L1 ed L2 - Fig. 8-6;
- Velocità onde di taglio V_s - Fig. 8-7;
- Modulo elastico E - Fig. 8-7.

Come si può osservare dai grafici, entrambe le campagne di indagine mostrano un ottimo accordo tra i risultati ottenuti ed in particolare si osserva che:

- nei primi metri dal fondale si riscontra la presenza di una preconsolidazione;

- l'angolo di resistenza al taglio ricavato mostra valori più elevati in superficie, nei primi due metri, per poi ridursi ed assestarsi tra 30° e 32°, mostrando poi valori più sparsi negli strati di sabbia e ghiaia;
- il profilo della coesione non drenata è stato ricavato dalle CPTU utilizzando un fattore N_k = 25 e si osserva un andamento lineare con la profondità, mostrando una preconsolidazione superficiale.
- si osserva inoltre una buona corrispondenza tra i valori delle velocità delle onde di taglio ottenuti con le correlazioni e quelli misurati direttamente con il sismo-cono, ottenendo valori linearmente crescenti con la profondità da circa 70 m/s a 170 m/s;
- il profilo di modulo elastico mostra un andamento linearmente crescente con la profondità tra 2 circa 12 MPa in L1 ed L2, subendo poi un incremento in SL fino a 30 MPa, valore che poi si incrementa con la profondità fino a circa 50 MPa nella ghiaia G.

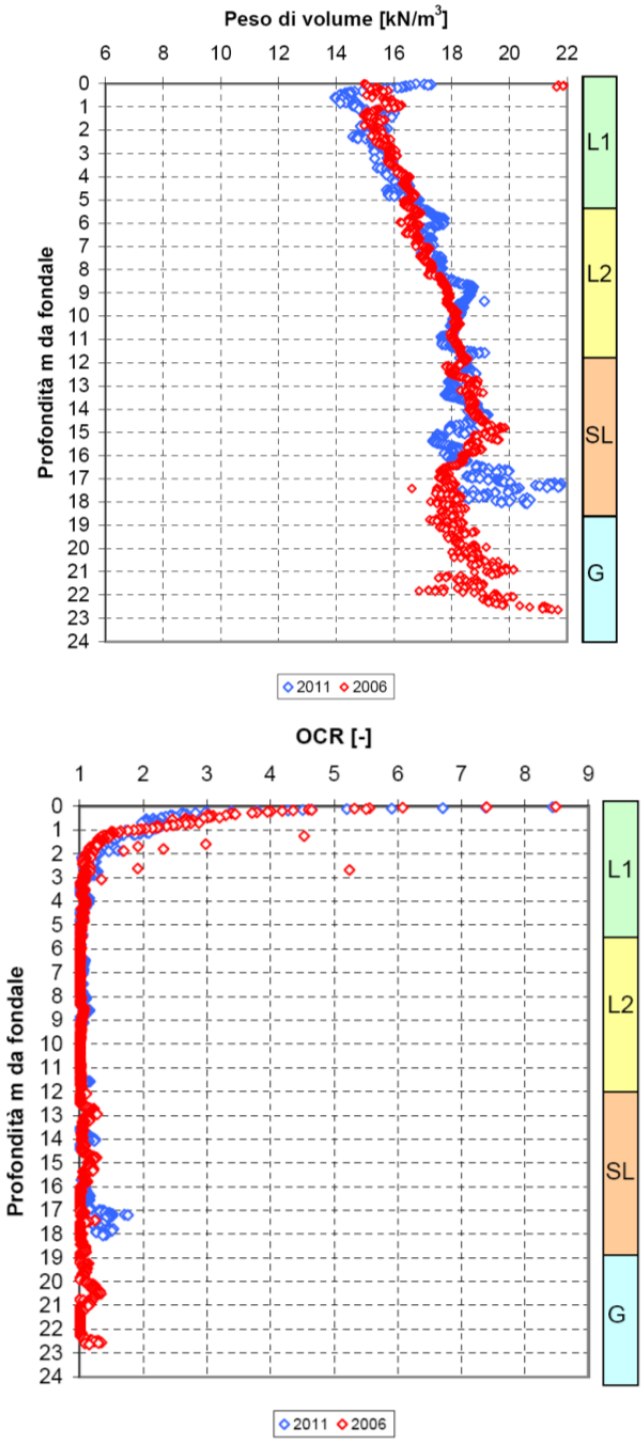


FIG. 8-5 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PESO DI VOLUME E OCR DA PROVE CPTU

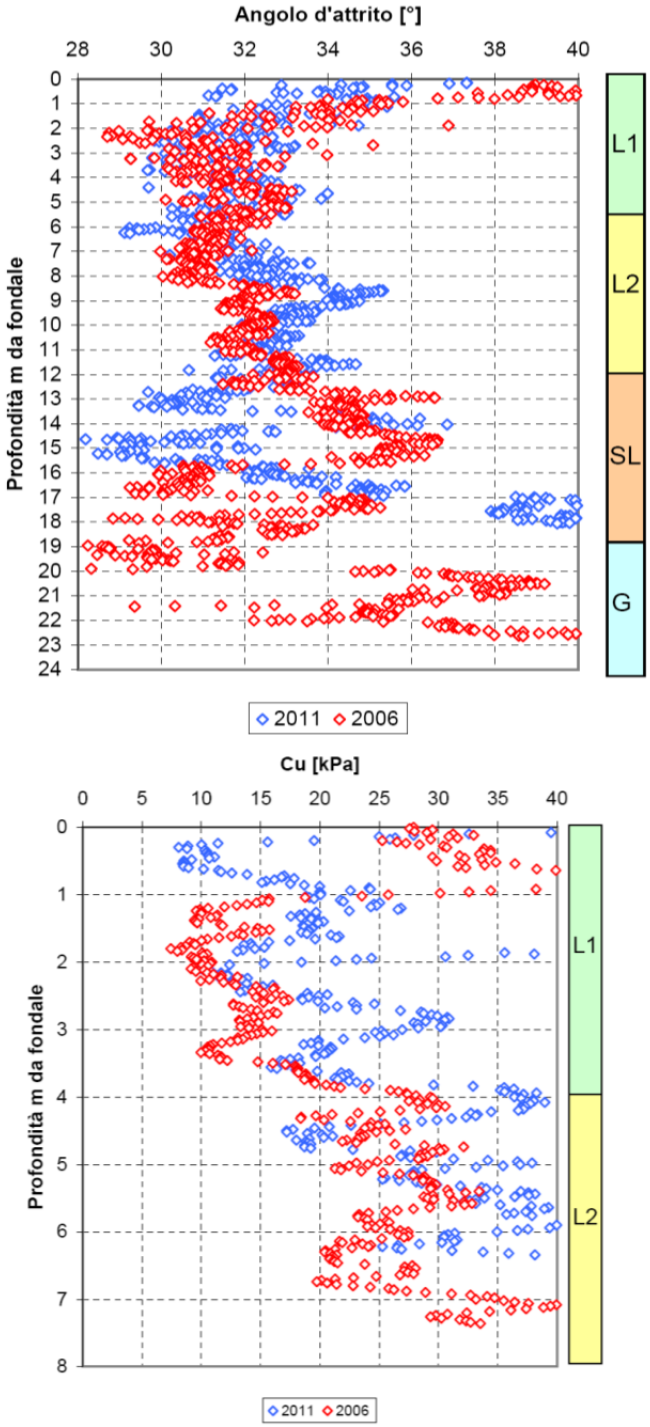


FIG. 8-6 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANGOLO DI ATTRITO E CU DA PROVE CPTU

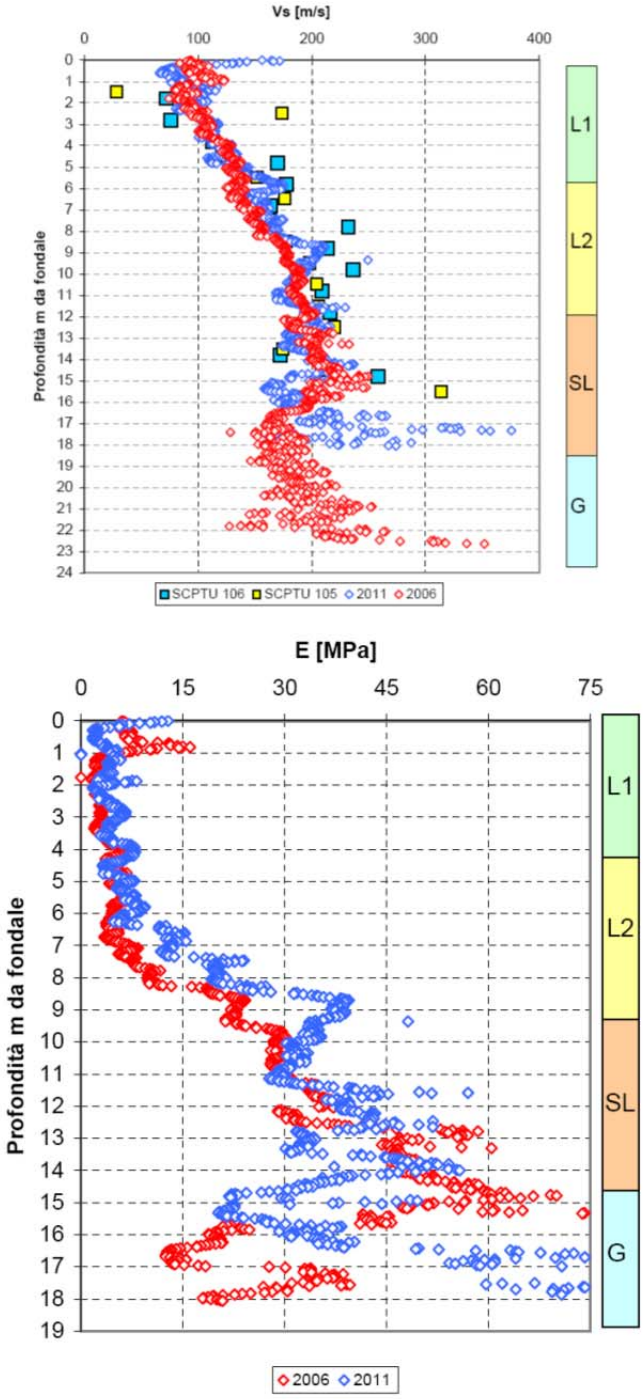


FIG. 8-7 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - VELOCITA' ONDE DI TAGLIO E MODULO ELASTICO DA PROVE CPTU

8.2. Prove Penetrometriche Dinamiche

Nei sondaggi geognostici della campagna 2006 sono state eseguite numerose prove Standard Penetration Test. Le prove hanno interessato principalmente lo strato granulare SL e quello ghiaioso G. Esse confermano che la deformabilità del terreno incrementa linearmente con la profondità.

8.2.1. Interpretazioni prove penetrometriche dinamiche

Le prove hanno permesso di fornire la caratterizzazione geotecnica dei terreni utilizzando le seguenti correlazioni.

- **DR - Densità relativa**
  BAZARAA (1967)

  E' valida per SABBIE NC

$$Dr = \begin{cases} = \left(\dfrac{N_{60}}{20\left(1 + 4.1 \cdot \sigma'_{v0}\right)} \right)^{0.5} & \sigma'_{v0} \le 73.2kPa \\ = \left(\dfrac{N_{60}}{20\left(3.24 + 1.024 \cdot \sigma'_{v0}\right)} \right)^{0.5} & \sigma'_{v0} > 73.2kPa \end{cases}$$

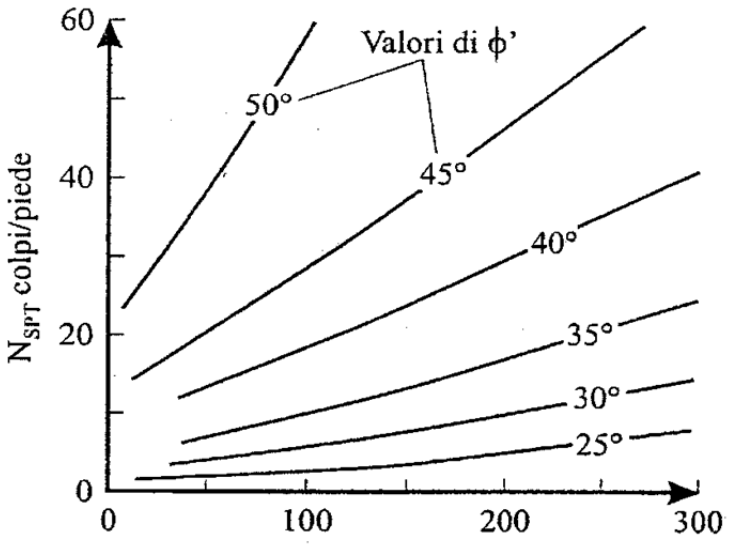
- **Φ' - Angolo d'attrito**
  SCHMERTMANN (1975)

  La correlazione è valida per SABBIE, non si specifica se NC o OC, ed è un'equazione diretta tra N_{60} e ϕ'.

$$\phi' = tg^{-1}\left[\frac{N_{60}}{\left(12.2 + 20.3 \cdot \dfrac{\sigma'_{v0}}{Pa}\right)} \right]^{0.34}$$

  MITCHELL et al. (1978)

E' derivata e valida per SABBIE NC. La correlazione è rappresentata dal grafico sottostante e mette in diretta dipendenza N_{60} con ϕ'.



σ'$_{v0}$ - sforzo verticale efficace - kPa

JAPANESE ROAD BRIDGE SPECIFICATIONS

La correlazione è molto povera e dà valori molto conservativi. Vale per sabbie NC:

$$\phi' = \sqrt{15 \cdot (N_1)_{60}} + 15$$

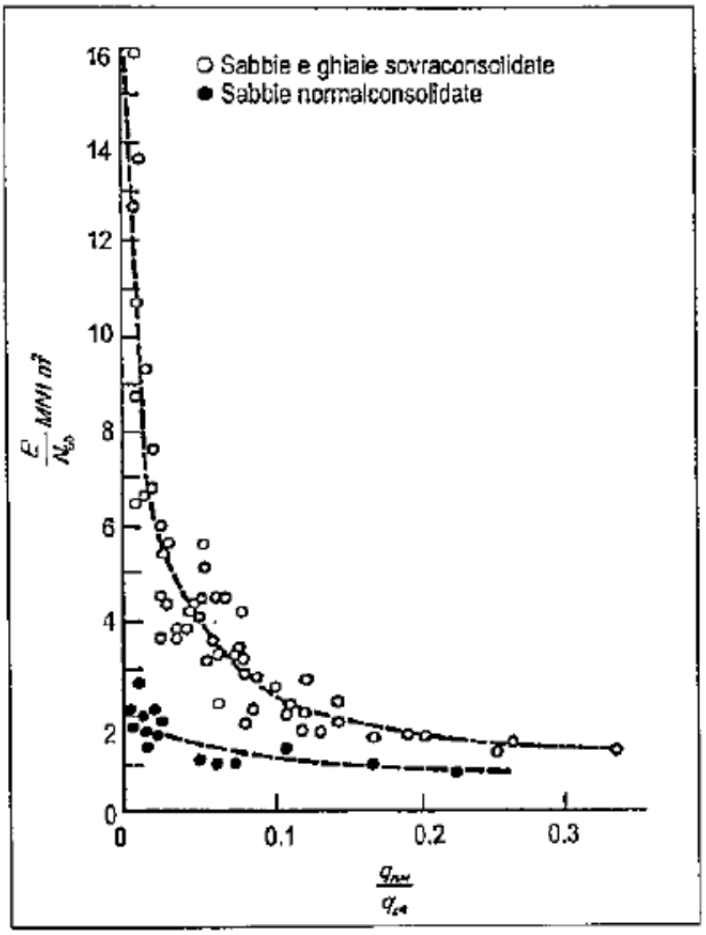
- **E - Modulo elastico**

STROUD (1989)

La correlazione più valida è quella proposta da Stroud (1989) che ha derivato da back-analysis di fondazioni superficiali, pali e prove di carico la variazione del rapporto E/N_{60} con il livello di mobilitazione della resistenza al taglio q_{NET}/q_{ULT}.

Il grafico seguente mostra come la relazione dipenda dal grado di sovraconsolidazione, ma in maggior modo dal grado di mobilitazione della resistenza.

A basse deformazioni, quindi per coefficienti di sicurezza elevati nell'ordine di 20, e sabbie OC, si può arrivare a valori di $E/N_{60} = 16$. Per FS = 3, il rapporto E/N_{60} sia per sabbie NC che OC tende invece all'unità.



Realisticamente, nel programma di interpretazione della prova SPT, si ipotizza che $\frac{q_{NET}}{q_{ULT}} = 0.25 \rightarrow FS = 4$ per cui:

$$\frac{E}{N_{60}} = 1(MPa) \text{ per sabbie NC}$$

$$\frac{E}{N_{60}} = 2(MPa) \text{ per sabbie e ghiaie OC}$$

E' messo in evidenza da Stroud che il fattore di sicurezza delle fondazioni che si prendono in considerazione è solitamente ben elevato, per cui il

coefficiente E/N_{60} soprattutto per terreni OC può arrivare a valori di almeno 4.

BURLAND AND BURBIDGE (1985)

Il modulo elastico drenato E, da utilizzare per il calcolo dei cedimenti immediati in sabbia, è messo in relazione a (N_{60}), senza però indicazione del grado di mobilitazione della resistenza al taglio e dell'OCR.

N_{60}	**E/N_{60} (MPa)**		
	Valore medio	**Limite inferiore**	**Limite superiore**
4	1.6-2.4	0.4-0.6	3.5-5.3
10	2.2-3.4	0.7-1.1	4.6-7.0
30	3.7-5.6	1.5-2.2	6.6-10.0
60	4.6-7.0	2.3-3.5	8.9-13.5

Nel programma di interpretazione si utilizzano il valore medio inferiore, che viene moltiplicato con il valore misurato di N_{60}. Tale stima di E, da confronto con i risultati di Stroud, si riferisce a gradi di mobilitazione $\frac{q_{NET}}{q_{ULT}} = 0.1 \div 0.04$, cioè a FS = 10-25. I valori di E' che si ottengono saranno perciò superiori a quelli calcolati con la correlazione di Stroud, visto che FS di riferimento è differente.

JAMIOLKOWSKI (1988)

La correlazione permette di ottenere il modulo di Young E corrispondente a tensioni dell'ordine del 25% di quelle a rottura, cioè corrispondente ad un FS=4. Le correlazioni sono valide per sabbie e ghiaie.

$$E_{25} = (10.5 - 3.5 \cdot Dr\%) \cdot \frac{N_{60}}{10} \quad [MPa] \quad per\ terreni\ NC$$

$$E_{25} = (52.5 - 35 \cdot Dr\%) \cdot \frac{N_{60}}{10} \quad [MPa] \quad per\ terreni\ OC$$

Nel programma di interpretazione, il valore di Dr% è valutato secondo la correlazione di Skempton (1986).
Per valori inferiori a Dr = 50%, le espressioni conducono ad una sottostima di E_{25}.

- **G_{MAX} - Modulo di taglio**
  OHTA e GOTO (1978)

  Si determina in primo luogo la velocità delle onde di taglio Vs, che viene poi correlata con G_0.

$$V_s = C \cdot (N_{60})^{0.171} \cdot z^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \qquad (m/s)$$

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

Dove si pone:
γ = peso di volume del terreno (kN/m^3)
z = profondità dal p.c. (m)
C = 67.3
f_A = coefficiente dipendente dall'età del deposito
f_G = coefficiente dipendente dalla composizione granulometrica

$$f_A = \begin{cases} 1.0 & OLOCENE \\ 1.3 & PLEISTOCENE \end{cases}$$

$$f_G = \begin{cases} 1.45 & GHIAIA \\ 1.15 & SABBIE\ GHIAIOSE \\ 1.14 & SABBIE\ GROSSE \\ 1.09 & SABBIE\ MEDIE \\ 1.07 & SABBIE\ FINI \end{cases}$$

Nel programma di interpretazione, il valore di f_G assume solo 2 valori medi:
f_G = 1.45 per GHIAIA

$f_G = 1.10$ per SABBIA

CRESPELLANI-VANNUCCHI (1991)

La correlazione di base è unica, i coefficienti di correlazione dipendono da granulometria ed origine dei depositi:

$G_0 = a \cdot N_{60}^b \quad [MPa]$

MATERIALE	ORIGINE	a	b	r
SABBIA	ALLUVIONALE	12.3	0.611	0.671
	GLACIALE	17.4	0.631	0.728
GHIAIA	ALLUVIONALE	8.1	0.777	0.798
	GLACIALE	31.3	0.526	0.552

8.2.2. Sabbia SL: risultati delle prove SPT

In Fig. 8-8 sono riportati i risultati delle interpretazioni eseguite sulle prove SPT eseguite nello strato SL:
Come si può osservare, le prove restituiscono mediamente un valore di DR pari al 60%. In termini di resistenza si osserva una certa variabilità tra le correlazioni. A favore di sicurezza si può considerare un angolo d'attrito di 34°.
In termini invece di deformabilità, la correlazione di Burland & Burbidge sembra dare valori eccessivamente alti, rispetto alle altre, che mediamente indicano un modulo elastico di 20 MPa.

8.2.3. Ghiaia G: risultati delle prove SPT

In Fig. 8-8 sono riportati i risultati delle interpretazioni eseguite sulle prove SPT eseguite nello strato G:
Come si può osservare, le prove restituiscono mediamente un valore di DR pari al 30%. In termini di resistenza si osserva una certa variabilità tra le correlazioni. Mediamente si può considerare un angolo d'attrito di 38°.
In termini invece di deformabilità, la correlazione di Burland & Burbidge sembra dare valori eccessivamente alti, rispetto alle altre, che mediamente indicano un modulo elastico di 40 MPa.

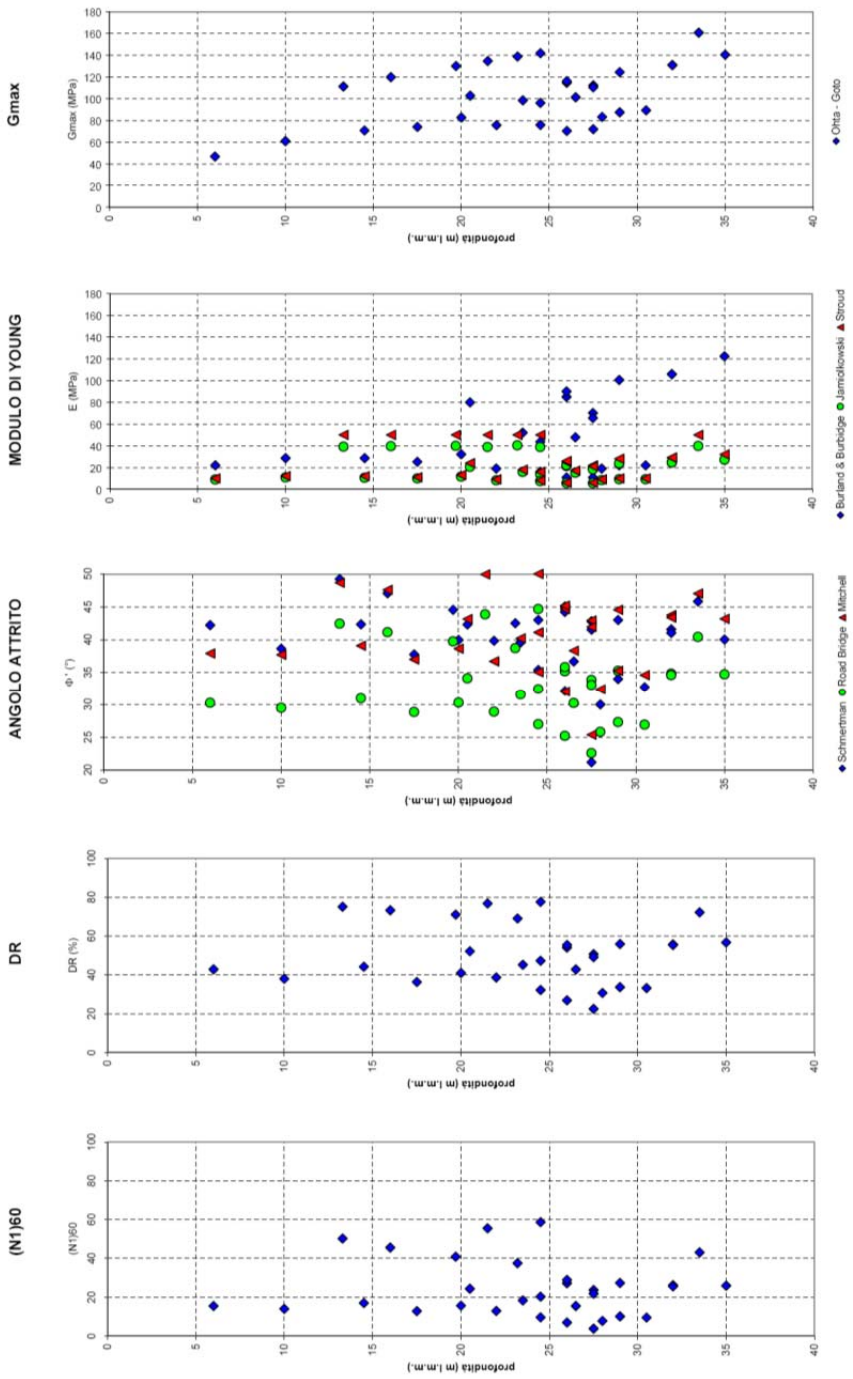


FIG. 8-8 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INTERPRETAZIONI PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE PER LA SABBIA SL

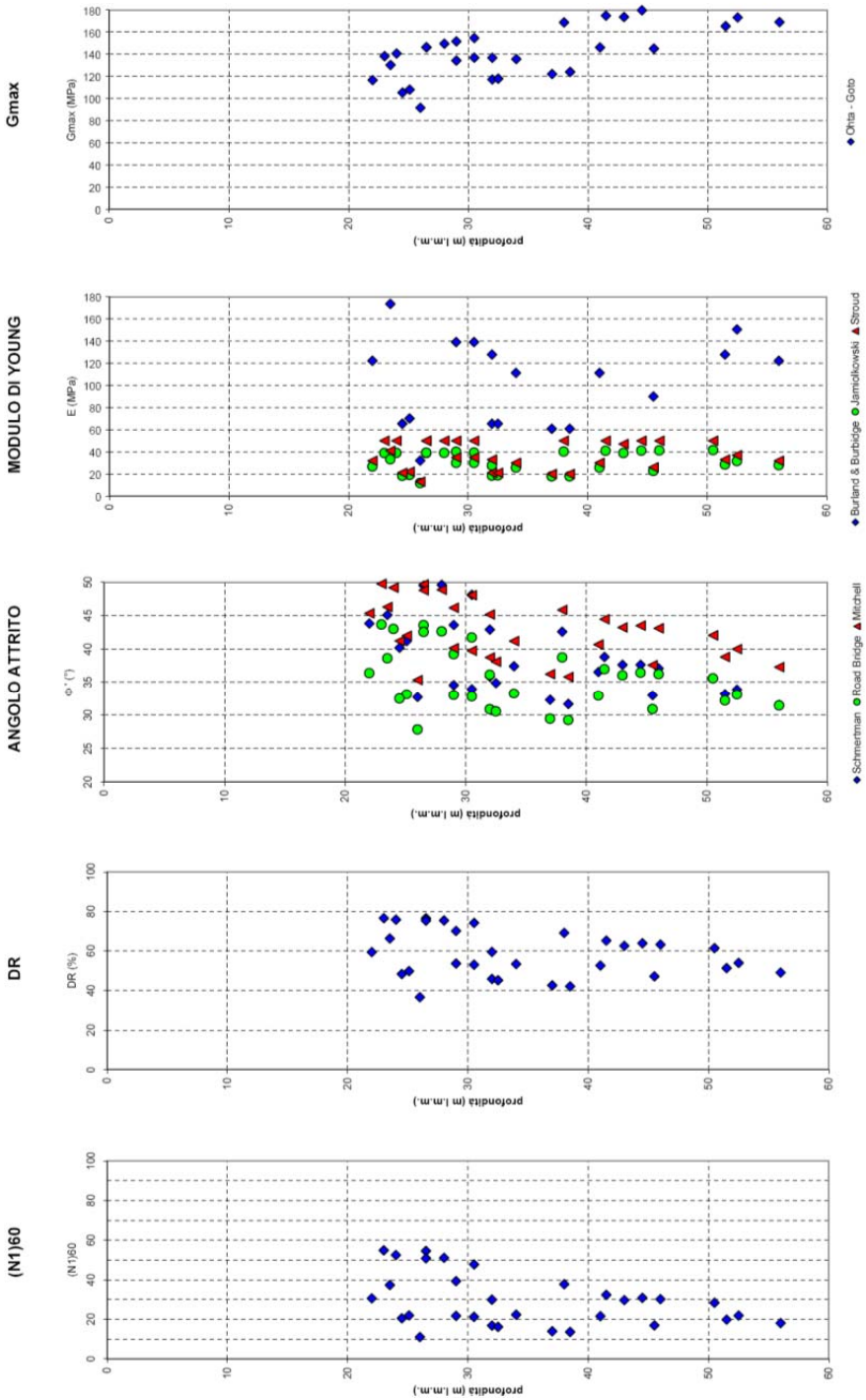


FIG. 8-9 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INTERPRETAZIONI PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE PER LA GHIAIA G

8.3. Prove dilatometriche

Queste prove hanno fornito un'ulteriore conferma della successione stratigrafica e delle caratteristiche geotecniche degli strati superficiali L1, L2 ed SL.
Si conferma quindi la presenza di due strati superficiali a comportamento prevalentemente limoso-argilloso, seguiti da uno strato prevalentemente sabbioso.
Da notare anche in questo caso la presenza di una preconsolidazione nella parte più superficiale, evidenziata infatti da un valore del coefficiente di spinta a riposo $k_0 > 1$.
I risultati delle prove dilatometriche sono riportate nelle tavole allegate.

8.4. Prove pressiometriche

Le prove pressiometriche, effettuate in corrispondenza di alcune verticali di sondaggio, hanno interessato gli strati L1, L2, SL e l'argilla compatta di base A.
Nello strato L1 è disponibile una sola prova, che ha fornito un modulo pari a 0.6 MPa.
Nello strato L2 i moduli variano da 2 a 5 MPa.
Nello strato sabbioso limoso più addensato SL i valori del modulo sono variabili da 7 a 10 MPa. Si ha un solo valore più basso, pari a 3.7 MPa.
All'interno dell'argilla compatta A i valori del modulo confermano la preconsolidazione. Si hanno infatti valori da 20 a 50 MPa, con andamento crescente con la profondità, vedi Fig. 8-10.
Questi moduli sottostimano i valori rappresentativi della deformabilità dei terreni in sito, in quanto l'esecuzione della prova comporta un notevole disturbo.

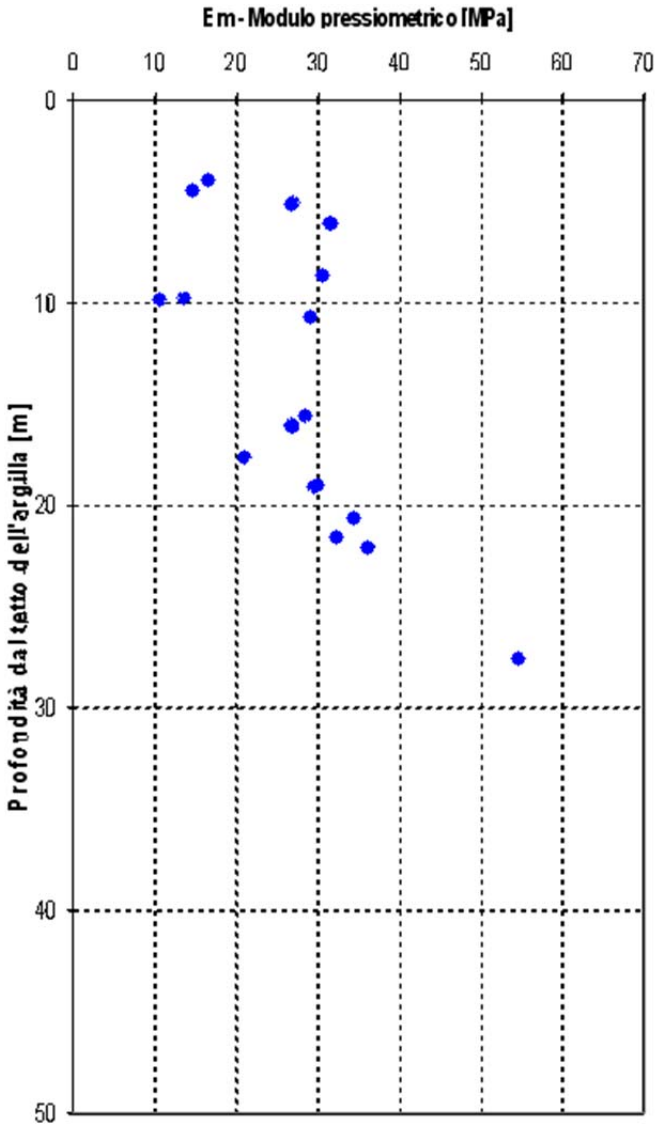


FIG. 8-10 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ARGILLA COMPATTA - MODULO PRESSIOMETRICO E_m

9. RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO ESEGUITE

9.1. Progetto Preliminare - Prove indagini Garassino

Le indagini eseguite durante la campagna del 2006 non hanno permesso il recupero degli strati limosi più superficiali e gli unici campioni su cui sono state svolte delle prove di laboratorio sono relativi all'argilla Pliocenica di base, di cui si riassumono di seguito le prove svolte nella Tab. 9-1. I campioni relativi agli strati al di sopra dell'argilla sono in numero molto limitato e su di essi si è al più svolta solo la granulometria, pertanto vengono trascurati.

9.2. Progetto Definitivo - Prove eseguite sui campioni S18 S19 S20 e Vibrocore

Le tabelle che seguono, Tab. 9-2 Tab. 9-3 Tab. 9-4 Tab. 9-5, riassumono le tipologie di prove eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi geognostici tramite campionatore Osterberg e dai campionamenti Vibrocore.

TAB. 9-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO PRELIMINARE

SOND.	CAMPIONE [m l.m.m.]	PROVE										
		γ	wn	Granulometria	LL LP IP	EDO	ELL	CIU	UU	TD	VTL	RC
S01÷S17	65.00 - 65.60			x	x							
	42.50 - 43.10			x	x		x					
	48.50 - 49.10			x								
	57.50 - 58.10			x								
	62.00 - 62.60			x								
	71.00 - 71.60			x			x					
	42.00 - 42.60	x	x	x	x	x				x		
	54.50 - 55.10	x	x	x	x		x					
	69.50 - 70.10	x	x	x	x							
	34.00 - 34.60			x	x							
	38.50 - 39.10			x	x				x			
	43.00 - 43.50			x	x				x			
	38.00 - 38.60			x	x		x					
	42.50 - 43.10			x								
	48.50 - 49.10			x					x			
	54.50 - 55.10			x								
	59.00 - 59.60			x	x							
	65.00 - 65.60			x								
	59.50 - 60.10			x	x		x					
	62.50 - 63.10			x	x		x					
	33.40 - 34.05	x	x	x	x	x						
	38.00 - 38.60	x	x	x	x		x					
	51.50 - 52.10	x	x	x	x							
	36.74 - 37.08							x			x	
	57.50 - 58.10			x					x			
	66.50 - 67.10			x					x			
	74.00 - 74.60			x								
	95.00 - 95.60			x								
	99.50 - 100.10			x								
	31.29					x						
	38.60					x						

TAB. 9-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO PRELIMINARE

SOND.	CAMPIONE [m l.m.m.]	PROVE										
		γ	wn	Granulometria	LL LP IP	EDO	ELL	CIU	UU	TD	VTL	RC
	53.52 - 53.82								x			
	59.92 - 60.02			x								x
	64.60 - 64.65			x		x						
	35.50 - 36.10	x	x	x	x	x				x		
	47.50 - 48.10	x	x	x	x							
	58.00 - 58.60	x	x	x	x							
	25.90 - 26.50	x	x	x	x	x						
	30.50 - 31.20	x	x	x	x				x			

TAB. 9-2- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA LE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO DEFINITIVO - VERTICALE S18

S18	CAMPIONE [m da fondale]	γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	CID	CIU	EDO	PET
	1.50 - 2.10	x	x	x	x	x					
	1.70 - 2.00	x	x				x		x		
	2.80 - 3.40	x	x	x	x	x					
	3.20 - 3.25	x	x			x	x			x	
	3.50 - 4.00	x	x	x	x	x					
	3.80 - 3.84	x	x			x	x			x	
	4.30 - 4.85	x	x	x	x						
	4.38 - 4.72	x	x				x		x		
	4.50 - 4.60	x	x				x				x
	5.00 - 5.60	x	x	x	x						
	5.23 - 5.45	x	x				x	x			
	5.80 - 6.35	x	x	x	x	x					
	6.19 - 6.24	x	x			x	x			x	
	6.50 - 7.00	x	x	x	x						
	6.55 - 6.65	x	x				x				x
	7.20 - 7.70	x	x	x	x						
	8.20 - 8.80	x	x	x							
	8.40 - 8.74	x	x				x		x		
	8.90 - 9.50	x	x	x	x	x					
	9.32 - 9.36	x	x			x	x			x	
	9.00 - 9.22	x	x				x		x		

	9.70 - 10.35	x	x	x	x	x					
	9.80 - 10.16	x	x				x	x			
	10.00 - 10.05	x	x			x	x			x	
	10.40 - 11.00	x	x	x							
	11.70 - 12.30	x	x	x							
	12.40 - 13.00	x	x	x							

TAB. 9-3- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO DEFINITIVO - VERTICALE S19

S19	CAMPIONE [m da fondale]	γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	VT	CTP CAU	CTS CAU	CIU	EDO	Ck_0U	VTL
	0.50 - 1.10	x	x	x	x									
	1.40 - 2.00	x	x	x	x									
	1.50 - 1.90							x						
	2.40 - 2.70	x	x	x	x									
	2.50 - 2.60	x	x				x						x	
	3.00 - 3.60	x	x	x	x	x								
	3.00 - 3.20	x	x				x		x					
	3.70 - 4.30	x	x	x	x	x								
	3.90 - 4.24	x					x							x
	3.90 - 4.24	x	x				x			x				
	4.50 - 5.10	x	x	x	x	x								
	4.58 - 5.00							x						
	5.20 - 5.80	x	x	x										
	6.00 -6.60	x	x	x	x									
	6.70 - 7.30	x	x	x	x									
	6.94 - 7.24	x	x				x				x			
	7.50 - 8.10	x	x	x	x	x								
	7.70 - 7.74	x	x			x	x					x		
	8.20 - 8.80	x	x	x	x	x								
	8.23 - 8.27	x	x			x	x					x		
	9.00 - 9.60	x	x	x	x									
	9.11 - 9.43	x	x				x			x				
	9.11 - 9.43	x					x							x
	9.70 - 10.30	x	x	x		x								
	10.14 - 10.18	x	x			x	x					x		
	9.82 - 9.92	x	x				x		x					
	11.00 - 11.65	x	x	x										
	12.3 - 12.90	x	x	x										

TAB. 9-4- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO DEFINITIVO - VERTICALE S20

S20	CAMPIONE [m da fondale]	γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	VT	PET	CID	CIU	EDO	ELL	VTL
	0.50 - 1.20	x	x	x										
	0.50 - 1.20							x						
	1.20 - 1.90	x	x	x										
	1.40							x						
	2.00 - 2.70	x	x	x	x									
	2.40							x						
	2.70 - 3.40	x	x	x	x									
	2.90 - 3.00	x	x				x		x					
	3.50 - 4.20	x	x	x										
	3.73 - 4.10							x						
	4.20 - 4.90	x	x	x	x									
	4.44 - 4.68	x	x				x			x				
	4.68 - 4.78	x					x							x
	5.00 - 5.70	x	x	x	x									
	5.20 - 5.60							x						
	5.70 - 6.40	x	x	x	x									
	5.90							x						
	6.21 - 6.31	x	x				x		x					
	6.50 - 7.20	x	x	x		x								
	7.00	x	x			x	x					x		
	7.20 - 7.90	x	x	x	x	x								
	7.76 - 7.81	x	x			x						x		
	8.00 - 8.70	x	x	x										
	8.20							x						
	8.32 - 8.42	x	x				x						x	
	8.70 - 9.40	x	x	x		x								
	9.20 - 9.25	x	x			x	x					x		
	9.25 - 9.35	x	x				x						x	
	9.40 - 10.10	x	x	x										
	10.20 - 10.90	x	x	x										
	10.9 - 11.60	x	x			x								
	11.00 - 11.10	x	x			x	x					x		
	11.70 - 12.40	x	x	x										
	12.40 - 13.10	x	x	x										
	13.20 - 13.90		x	x										

TAB. 9-5- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA LE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO DEFINITIVO - VERTICALE VIBROCORE

SONDAGGIO	CAMPIONE [m da fondale]	Granulometria	LL LP IP
SS4	0.00 - 1.23	x	x
	0.00 - 1.00	x	x
	1.00 - 1.50	x	x
	0.00 - 1.00	x	x
	1.00 - 1.63	x	x
SS6	0.00 - 0.95	x	x
	1.00 - 2.00	x	x
	0.00 - 1.00	x	x
	1.00 - 2.00	x	x
	2.00 - 3.00	x	x
SS8	0.00 - 1.20	x	x
SS9	0.00 - 1.35	x	x
SS14	0.00 - 1.00	x	x
	1.00 - 2.00	x	x
	2.00 - 3.00	x	x

9.3. Progetto Esecutivo - Prove eseguite sui campioni Carmacoring ed i15 i35

Nelle Tab. 9-6, Tab. 9-7, Tab. 9-8 e Tab. 9-9 si riportano le prove eseguite sui campioni della campagna del progetto esecutivo relativa al campo prova area rilevato.

TAB. 9-6- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO ESECUTIVO - VERTICALE SS110

VERTICALE	CAMPIONE [m da fondale]	PROVE										
		γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	EDO	CTRX	CID	CIU	CTRXk0
SS110	0.00 - 0.10	x	x	x	x	x						
	0.40 - 0.50	x	x	x	x							
	0.50 - 1.00	x	x			x	x				x	
	0.90 - 1.00	x	x	x	x	x						
	1.00 - 1.50	x	x			x	x			x		
	1.40 - 1.50	x	x	x	x	x						
	1.50 - 2.00	x	x						x			

	1.90 - 2.00	x	x	x	x	x						
	2.00 - 2.10	x	x	x	x	x						
	2.00 - 2.10	x	x			x	x					x
	2.00 - 2.10	x	x			x	x	x				
	2.45 - 2.65	x	x	x	x	x						
	2.50 - 3.00	x	x			x	x				x	
	2.90 - 3.00	x	x	x	x	x						
	3.00 - 3.10	x	x	x	x	x						
	3.00 - 3.50	x	x			x	x			x		
	3.45 - 3.55	x	x	x	x							
	3.45 - 3.55	x	x						x			
	4.00 - 4.10	x	x	x	x	x						
	4.45 - 4.55	x	x	x	x	x						
	5.00 - 5.10	x	x			x	x			x		
	5.00 - 5.10	x	x	x	x	x						
	5.00 - 5.10	x	x			x	x	x				
	5.45 - 5.55	x	x	x	x							
	5.50 - 6.00	x	x						x			
	6.00 - 6.10	x	x	x	x	x						
	6.45 - 6.55	x	x	x	x							
	6.50 - 7.00	x	x			x	x				x	
	6.80 - 7.00	x	x						x			
	7.00 - 7.10	x	x			x	x	x				
	7.00 - 7.10	x	x	x	x	x						

TAB. 9-7 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO ESECUTIVO - VERTICALE SS112

VERTICALE	CAMPIONE [m da fondale]	PROVE										
		γ	w_n	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	EDO	CTRX	CID	CIU	CTRXk0
SS112	0.00 - 0.10	x	x	x	x	x						
	0.30 - 0.50	x	x						x			
	0.45 - 0.55	x	x	x	x							
	0.50 - 1.00	x	x			x	x				x	
	1.00 - 1.10	x	x	x	x	x						
	1.45 - 1.55	x	x	x	x							
	1.50 - 2.00	x	x			x	x				x	
	2.00 - 2.10	x	x	x	x	x						
	2.00 - 2.10	x	x			x	x	x				
	2.00 - 2.10	x	x			x	x					x

	2.00 - 2.10	x	x						x			
	2.00 - 2.50	x	x			x	x			x		
	2.45 - 2.55	x	x			x	x					x
	2.45 - 2.55		x	x	x							
	3.00 - 3.10	x	x	x	x	x						
	3.00 - 3.50	x	x			x	x			x		
	3.45 - 3.55	x	x	x	x	x						
	4.00 - 4.10	x	x	x	x	x						
	4.00 - 4.50	x	x			x	x				x	
	4.45 - 4.55	x	x	x	x							
	4.50 - 5.00	x	x						x			
	5.00 - 5.10	x	x	x	x	x						
	5.00 - 5.10	x	x			x	x	x				
	5.50 - 6.00	x	x			x	x			x		
	5.45 - 5.55	x	x	x	x							
	6.00 - 6.10	x	x	x	x	x						
	6.60 - 6.70	x	x			x	x	x				
	6.60 - 6.70	x	x	x	x							

TAB. 9-8 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO ESECUTIVO - VERTICALE I/15

VERTICALE	CAMPIONE [m da fondale]	PROVE												
		γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	EDO	CTRX	CID	CIU	RC	TXCAU	K
i/15	1.00 - 1.60	x	x	x	x	x								
	1.00 - 1.60	x	x			x	x	x						
	1.00 - 1.60	x	x						x					
	1.00 - 1.60	x	x			x	x			x				
	2.50 - 3.10	x	x	x	x	x								
	2.50 - 3.10	x	x			x	x	x						
	2.50 - 3.10	x	x			x	x				x			
	2.50 - 3.10	x	x				x					x		
	4.00 - 4.40	x	x	x	x	x								
	4.00 - 4.40	x	x			x	x	x						
	4.00 - 4.40	x	x						x					
	5.50 - 6.10	x	x	x	x	x								
	5.50 - 6.10	x	x			x	x	x						
	5.50 - 6.10	x	x			x	x				x			
	7.00	x	x				x					x		
	10.00 - 10.60	x	x	x	x	x								

	10.00 - 10.60	x	x			x	x	x						
	10.00 - 10.60	x	x			x	x							x
	10.00 - 10.60	x	x										x	
	13.00 - 13.50	x	x	x	x	x								
	13.00 - 13.50	x	x			x	x			x				

TAB. 9-9 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI LABORATORIO PROGETTO ESECUTIVO - VERTICALE I/35

VERTICALE	CAMPIONE [m da fondale]	PROVE												
		γ	wn	Granulometria	LL LP IP	Gs	e	EDO	CTRX	CID	CIU	RC	TXCAU	K
i/35	1.00 - 1.65	x	x	x	x	x								
	1.00 - 1.65	x	x			x	x			x				
	1.00 - 1.60	x	x			x	x	x						
	1.00 - 1.60	x	x						x					
	4.00 - 4.60	x	x	x	x	x								
	4.00 - 4.60					x	x	x						
	6.00 - 6.60	x	x	x	x	x								
	6.00 - 6.60	x	x			x	x	x						
	6.00 - 6.60	x	x			x	x				x			
	6.00 - 6.60	x	x										x	
	10.00 - 10.60	x	x	x	x	x								
	10.00 - 10.60	x	x			x	x	x						
	10.00 - 10.60	x	x			x	x							x
	13.00 - 13.60	x	x	x	x	x								
	13.00 - 13.60	x	x			x	x	x						
	13.00 - 13.60	x	x			x	x							x
	13.00 - 13.60	x	x			x	x				x			

9.4. Limi e sabbie (L1, L2 ed SL)

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio relativi agli strati di terreno L1, L2 ed SL nelle varie campagne di indagine.

9.4.1. Prove di classificazione

9.4.1.1 Indagini Progetto Definitivo - Risultati prove di laboratorio

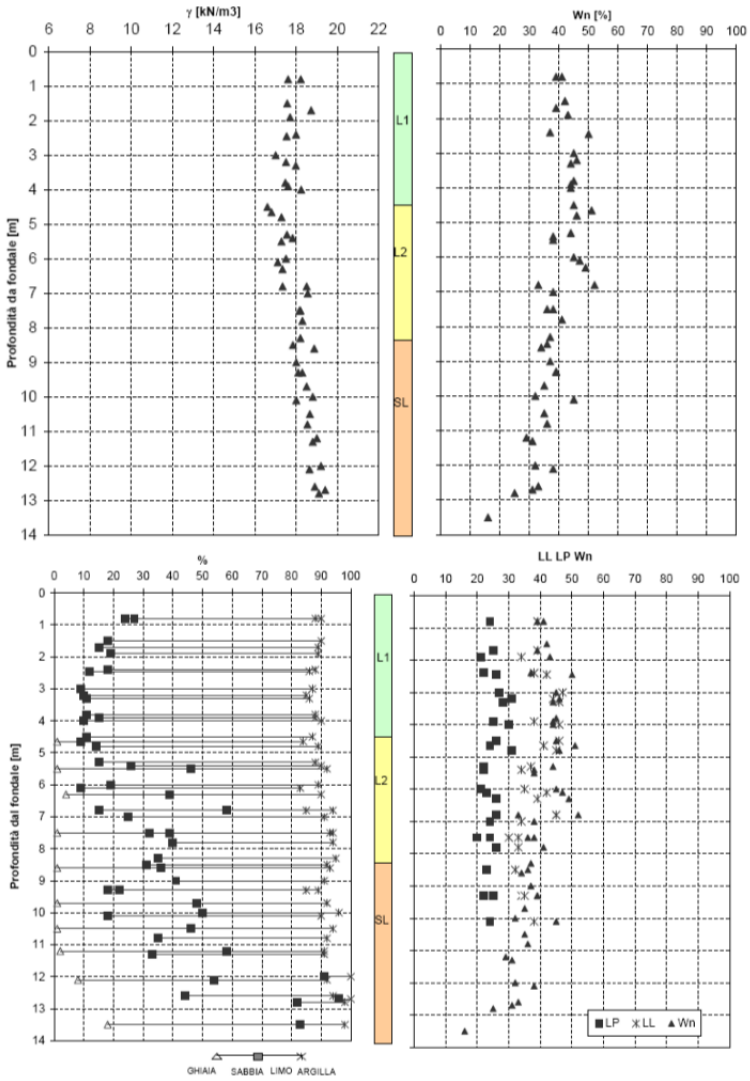


FIG. 9-1- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE S18 S19 S20: PESO DI VOLUME - CONTENUTO D'ACQUA - GRANULOMETRIA - LIMITI DI ATTERBERG

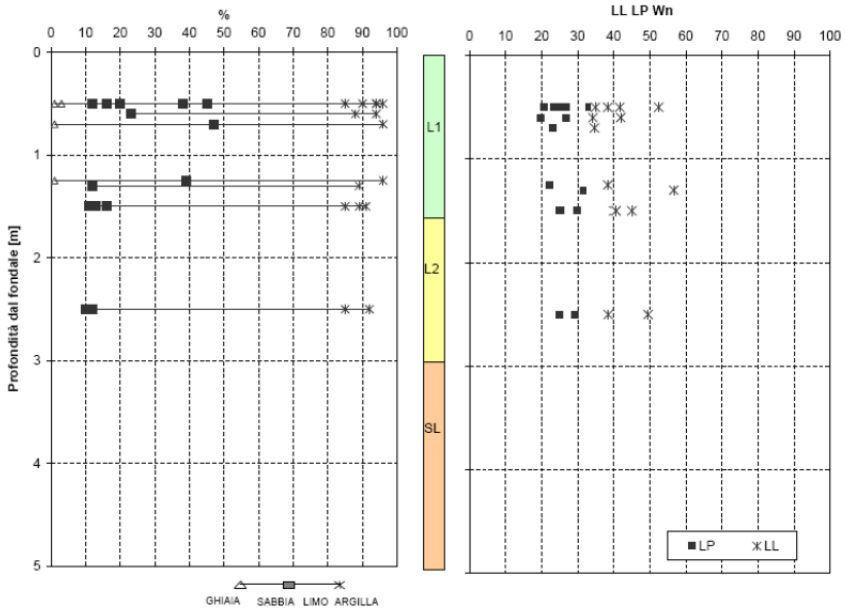


FIG. 9-2- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE VIBROCORE: GRANULOMETRIA - LIMITI DI ATTERBERG

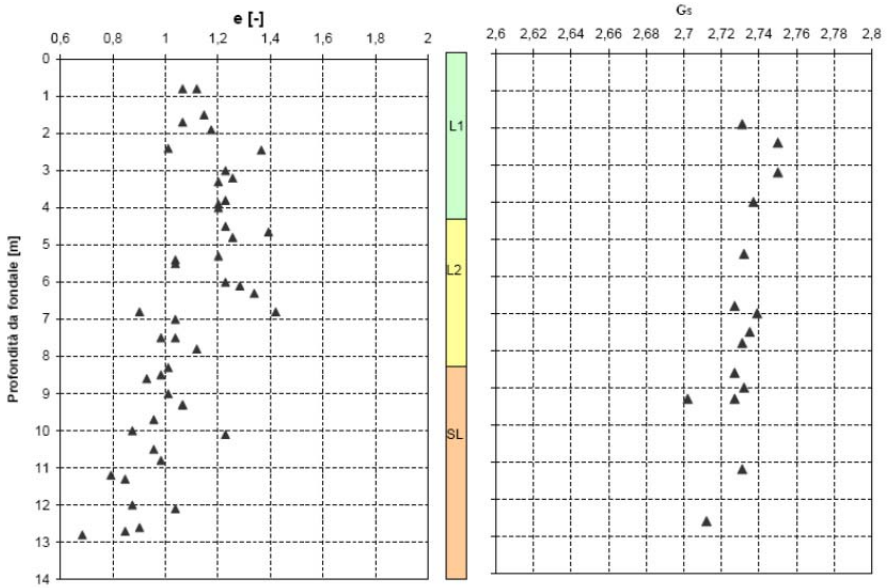


FIG. 9-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE S18 S19 S20: PESO SPECIFICO DEI GRANI E INDICE DEI VUOTI

Granulometria

Le Fig. 9-1 e Fig. 9-2 mostrano la granulometria dei sondaggi S18 S19 S20 e dei campionamenti Vibrocore. In entrambi i casi si osserva un terreno a prevalenza limosa fino ad almeno 8-9 m dal fondale. Oltre al limo è presente circa un 10% di argilla e della sabbia. La quantità di sabbia si osserva essere maggiore nei primi 2 -3 m, circa 20 - 30 %, e poi si riduce a circa 10 % in L2 per poi ricominciare a crescere verso lo strato SL, dove diventa prevalente rispetto al limo che a poco a poco si riduce. In SL si osserva anche la comparsa di ghiaia, la cui quantità man mano si incrementa con la profondità. Valutando la quantità di fine presente, inteso come passante al vaglio con diametro 0.075 mm, Fig. 9-4, si osserva circa il 60% in superficie, valore che poi si incrementa ad oltre il 90% al di sotto dei 2-3 m, per poi ritornare progressivamente a ridursi oltre i 6 m dal fondale fino quasi ad annullarsi.

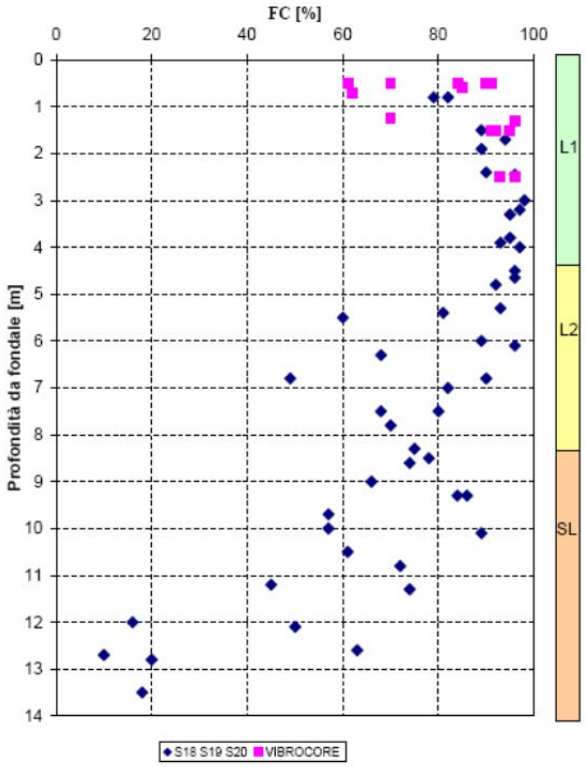


FIG. 9-4 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DEL CONTENUTO FINE CON LA PROFONDITÀ INDAGINI PROGETTO DEFINITIVO

Carta di plasticità

Al fine di classificare ulteriormente la frazione fine si fa riferimento alla carta di Plasticità di Casagrande, nella quale si osserva, Fig. 9-5, come i punti siano a cavallo della linea A, ricadendo nelle zone identificate come ML/OL e CL ovvero:

- ML = Limi inorganici, sabbie molto fini, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità;
- OL = Limi organici, argilla limose organiche di bassa plasticità;
- CL = Argille inorganiche di media plasticità

Si tratti quindi di limi sabbiosi argillosi con un indice di plasticità compreso tra il 10 ed il 20%.

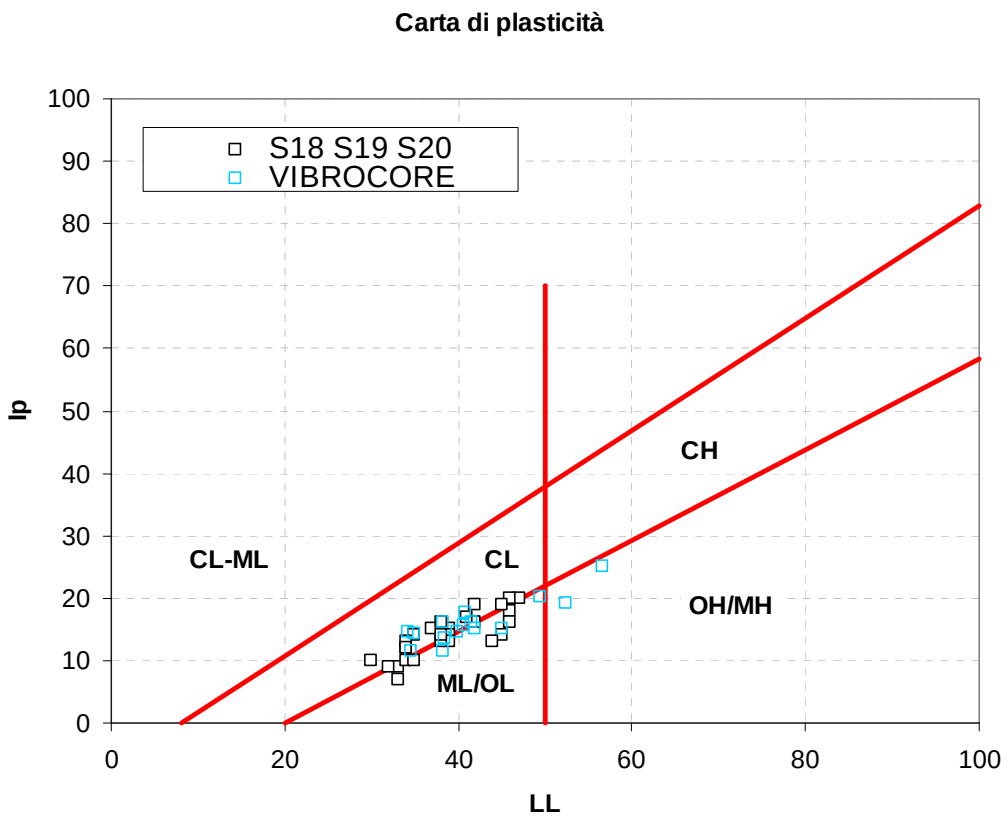


FIG. 9-5 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CARTA DI PLASTICITÀ INDAGINI PROGETTO DEFINITIVO

Contenuto d'acqua

Il contenuto d'acqua, Fig. 9-1, tende a diminuire con la profondità oltre i 3 m dal fondale, passando dal 45% al 30%.

Tra il fondale ed i 3 m di profondità il contenuto d'acqua tende invece ad aumentare passando dal 40% sul fondale al 45% ai 3 m di profondità.

L'andamento ora descritto pare evidenziare un terreno che sia leggermente preconsolidato fino ai 3 m di profondità dal fondale per poi essere normalconsolidato.

Certamente valori comunque alti del contenuto d'acqua, uguali o superiori al limite liquido, mettono in evidenza un terreno a bassa consistenza, così come del resto già classificato nella stratigrafia di progetto.

Peso di volume

L'andamento del peso di volume con la profondità riflette quello del contenuto d'acqua: esso risulta più alto sul fondale, pari a 18 kN/m^3, per poi ridursi a 17 kN/m^3 in L2, ed infine crescere fino a 19 kN/m^3 in SL, vedasi Fig. 9-1.

9.4.1.2 Indagini Progetto Esecutivo - Risultati prove di laboratorio

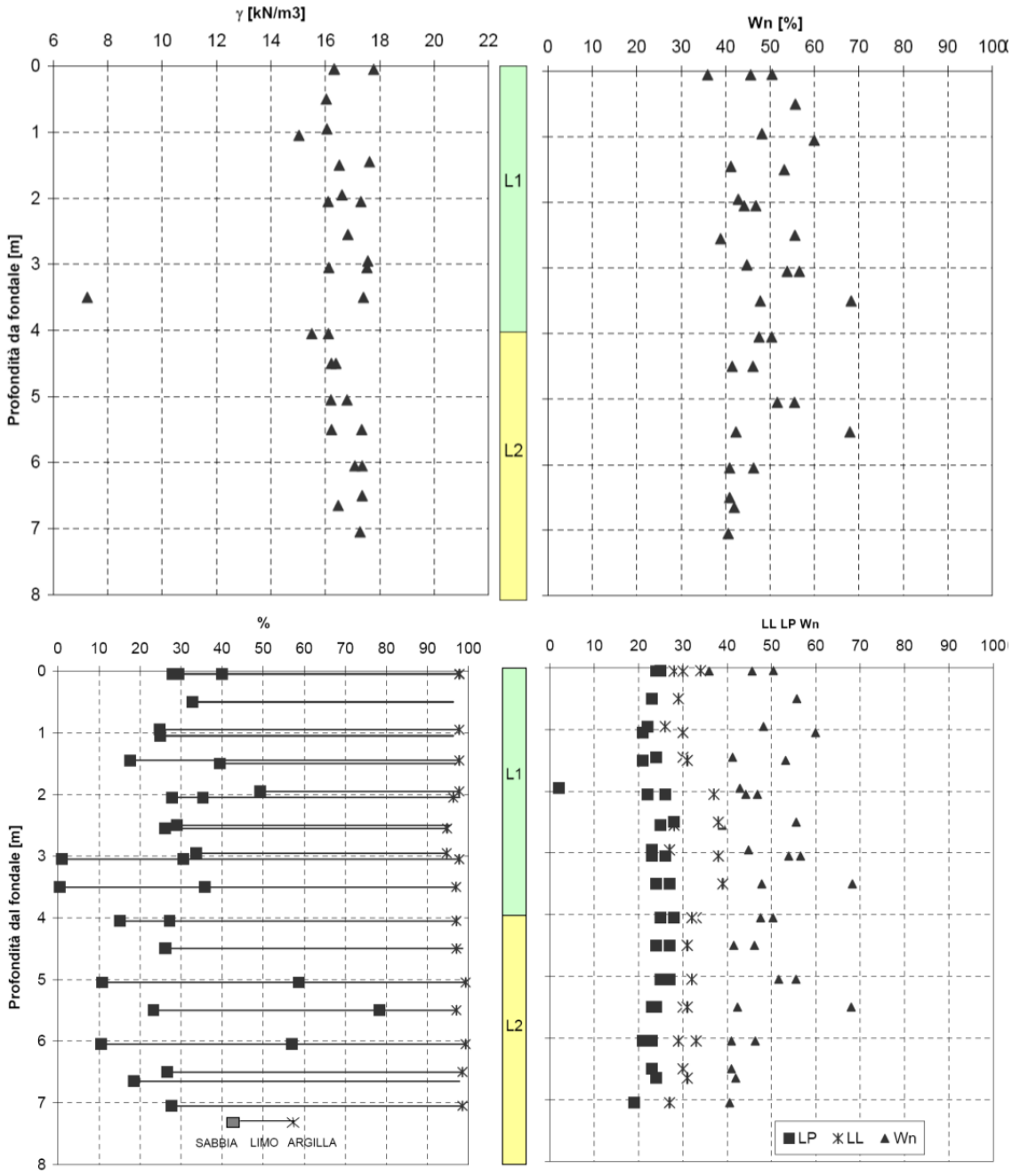


FIG. 9-6- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE SS110 SS112: PESO DI VOLUME - CONTENUTO D'ACQUA - GRANULOMETRIA - LIMITI DI ATTERBERG

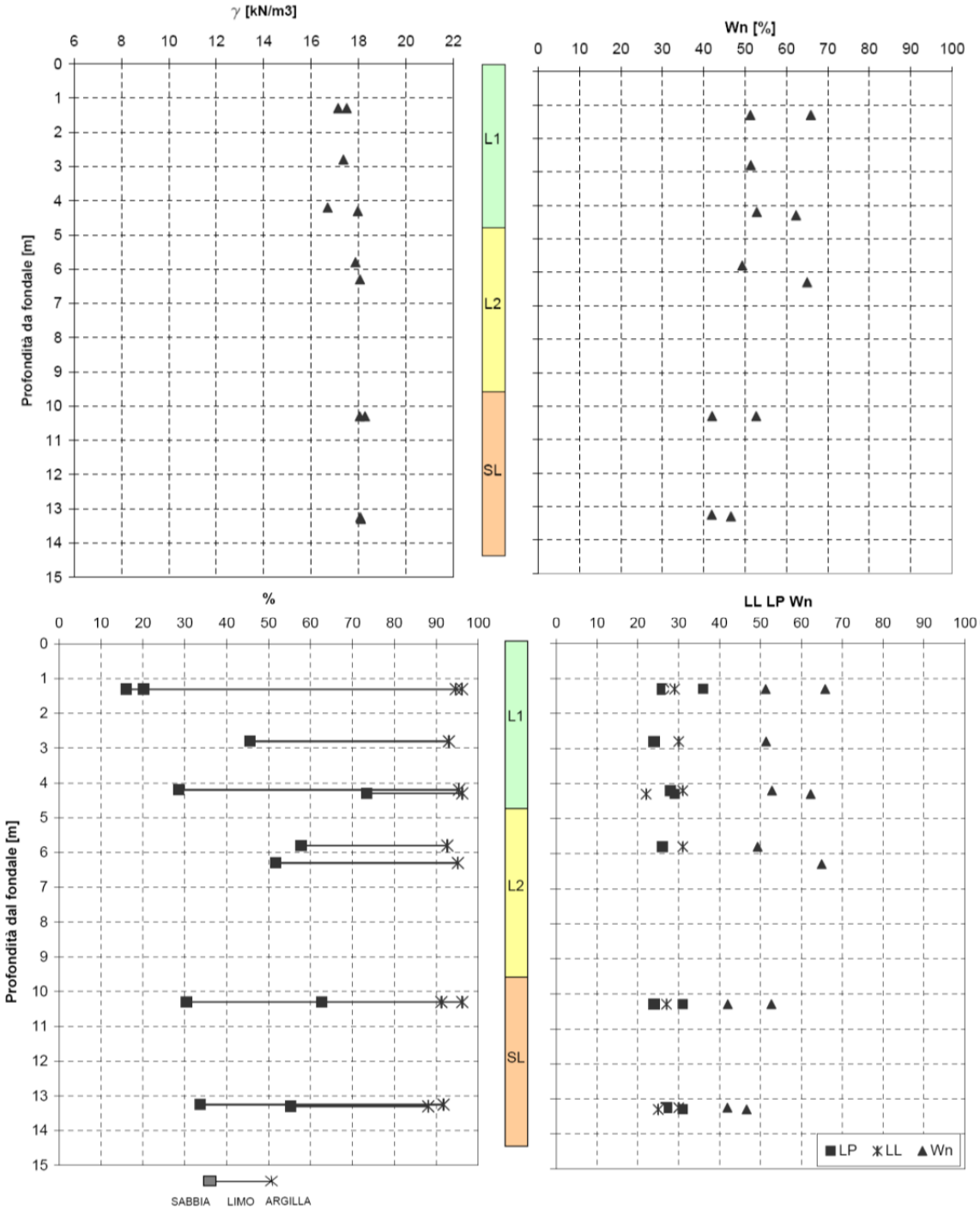


FIG. 9-7- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE I15 I35: PESO DI VOLUME - CONTENUTO D'ACQUA - GRANULOMETRIA - LIMITI DI ATTERBERG

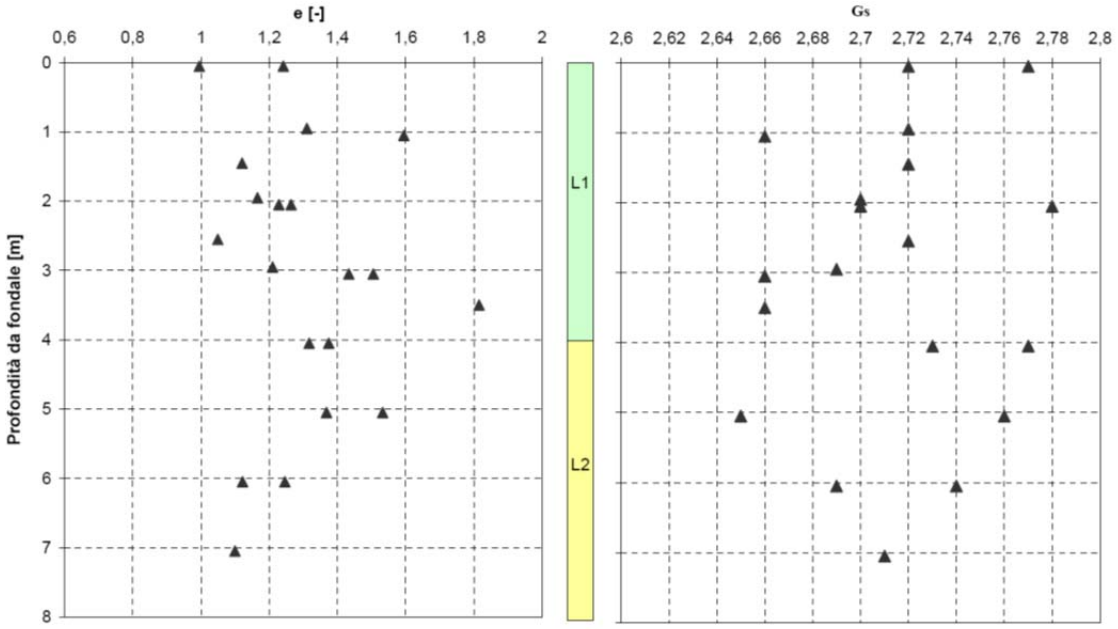


FIG. 9-8 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE SS110 SS112: PESO SPECIFICO DEI GRANI E INDICE DEI VUOTI

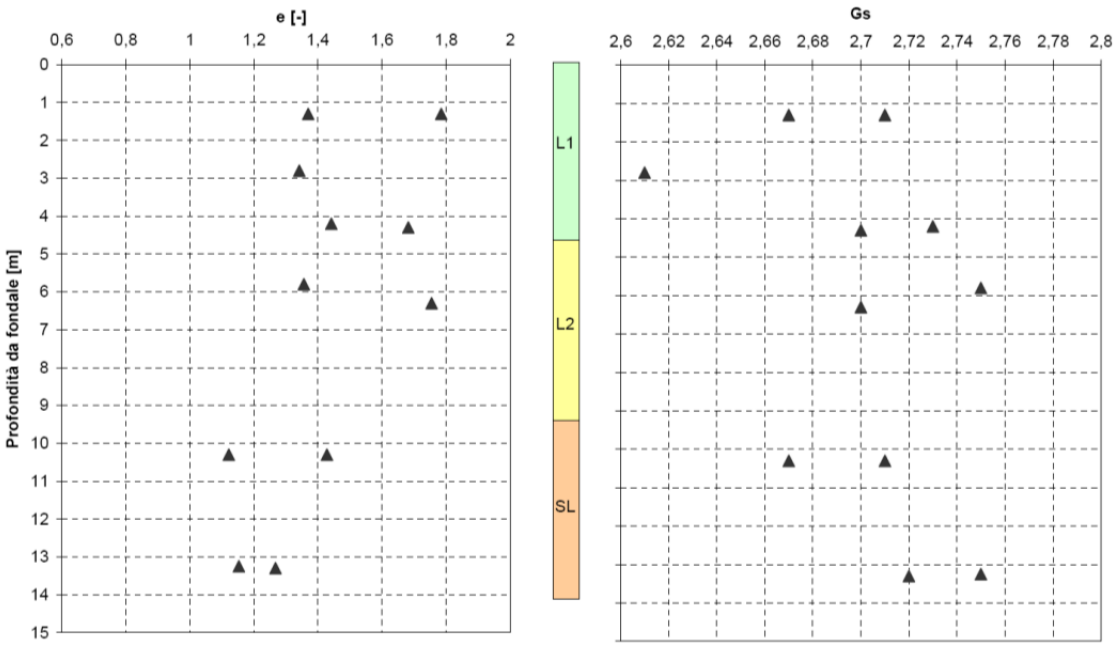


FIG. 9-9 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CLASSIFICAZIONE I15 I35: PESO SPECIFICO DEI GRANI E INDICE DEI VUOTI

Granulometria

Le prove eseguite sui Carmacoring interessano i livelli L1 ed L2, mentre le prove eseguite sui sondaggi i/15 ed i/35 riguardano anche il livello SL.

Il livello L1 presenta un contenuto di sabbia pari al 30% in peso fino ad una profondità di 4 m dal fondale. Al di sotto di tale profondità il contenuto in sabbia scende tra il 10% ed il 20% in corrispondenza del livello L2.

In SL il contenuto in sabbia arriva al 60% con campioni che però registrano un 30%. Il contenuto fine, inteso come passante al vaglio con diametro 0.075 mm, e riferito ai livelli L1 ed L2 è mediamente costante con la profondità e pari al 70% con punti che arrivano anche al 100%.

La frazione argillosa con diametro inferiore ai 2 μm è al di sotto del 5% in tutti i provini testati.

Si tratta quindi di limo con un 30% di sabbia, per quanto concerne L1 e di un limo con il 15% di sabbia per quanto concerne L2.

Il livello SL è in effetti una sabbia limosa con contenuto fine dell'ordine del 40 %.

Si riporta nella Fig. 9-10 il contenuto fine con la profondità.

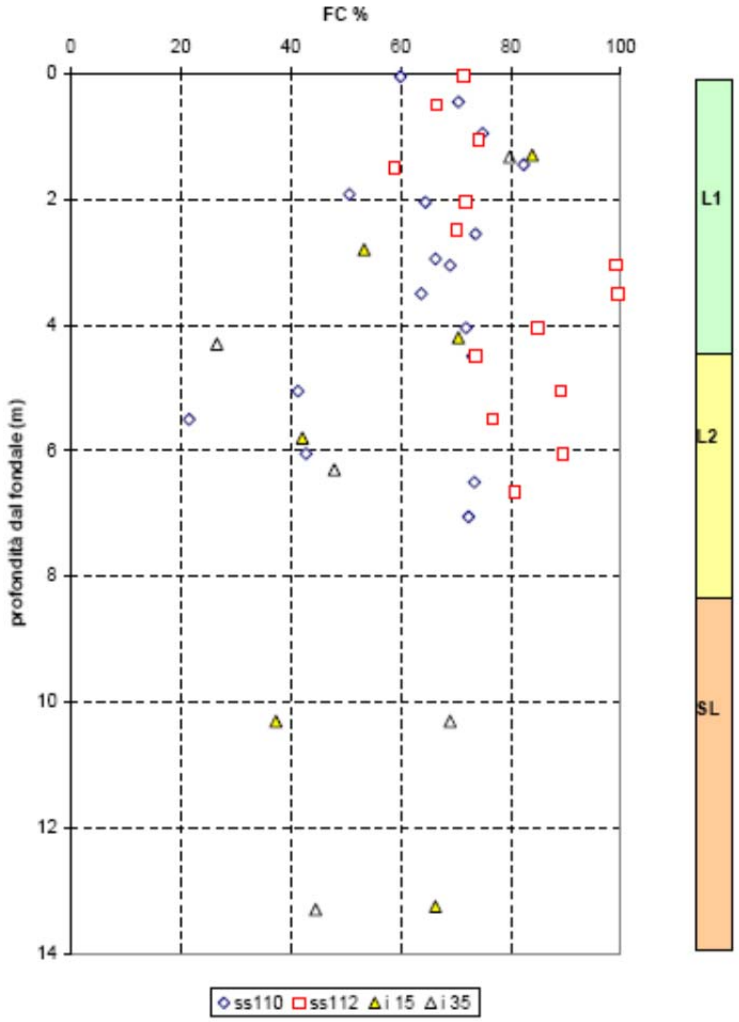


FIG. 9-10 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DEL CONTENUTO FINE CON LA PROFONDITÀ DALLE INDAGINI DEL CAMPO PROVA AREA RILEVATO

Carta di plasticità

Al fine di classificare ulteriormente la frazione fine si fa riferimento alla carta di Plasticità di Casagrande, nella quale si osserva, Fig. 9-11, come i punti stiano sotto la linea A, e si tratti quindi di limi, che ricadono nella zona identificata come ML/OL ovvero:

- ML = Limi inorganici, sabbie molto fini, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità;

- OL = Limi organici, argilla limose organiche di bassa plasticità.

L'indice di plasticità dei terreni è sempre inferiore al 10% indicando limi a bassa plasticità.

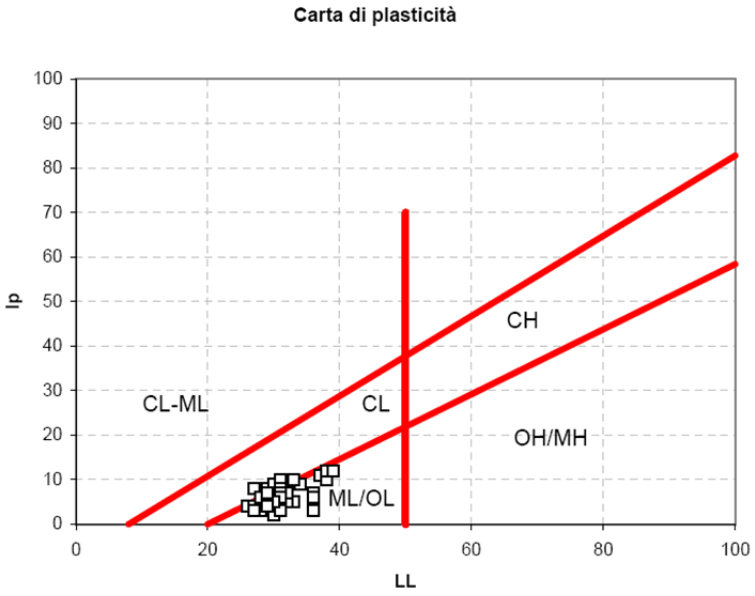


FIG. 9-11 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CARTA DI PLASTICITÀ INDAGINI CAMPO PROVA AREA RILEVATO

Contenuto d'acqua

Il contenuto d'acqua tende a diminuire con la profondità oltre i 3 m dal fondale, passando dal 55% al 40%. Tra il fondale ed i 3 m di profondità il contenuto d'acqua tende invece ad aumentare passando dal 45% sul fondale al 55% ai 3 m di profondità. L'andamento ora descritto pare evidenziare un terreno che sia leggermente preconsolidato fino ai 3 m di profondità dal fondale per poi essere normalconsolidato. Certamente valori comunque alti del contenuto d'acqua mettono in evidenza un terreno a bassa consistenza, così come del resto già classificato nella stratigrafia di progetto.

Peso di volume

L'andamento del peso di volume con la profondità riflette quello del contenuto d'acqua: esso infatti diminuisce fino ai 3 metri dal fondale per poi tornare ad aumentare. In particolare si passa dai 18 kN/m^3 sul fondale ai 16 kN/m^3 a 3 metri dal

fondale, per poi arrivare a 17 kN/m^3 al letto di L2. Anche in questo caso sembra esserci una preconsolidazione sui primi 3 metri che poi sparisce.

9.4.1.3 Confronto tra le indagini

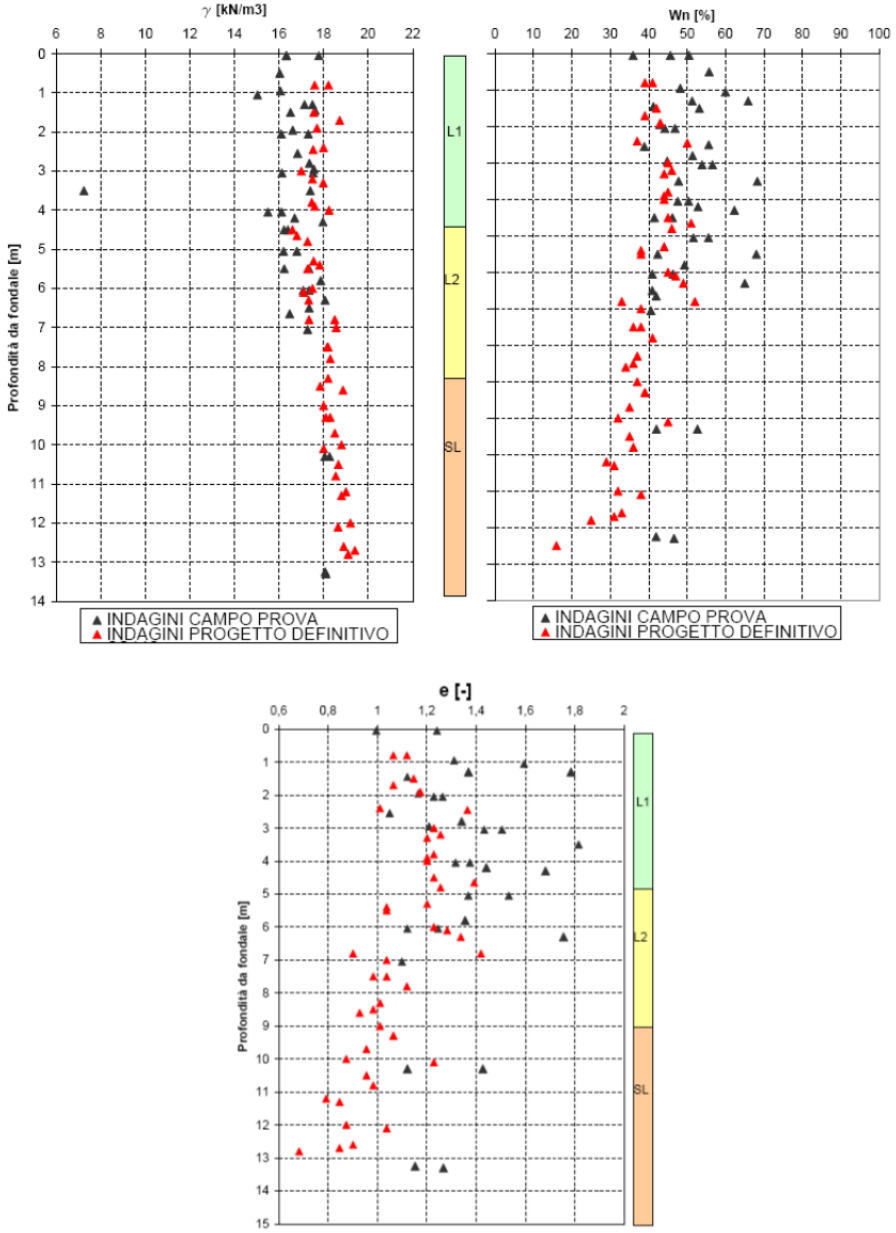


FIG. 9-12 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CONFRONTO TRA I RISULTATI DELLE DUE CAMPAGNE DI INDAGINE

La precedente Fig. 9-12 mostra il confronto tra le principali grandezze riferite alle prove di classificazione eseguite nelle campagne di indagine del Definitivo e dell'Esecutivo. Si osserva sostanzialmente una buona corrispondenza tra i risultati, notando tuttavia, nel caso della campagna del Definitivo, valori indicativi di un maggior addensamento. Questo risulta tuttavia in linea con quanto esposto nei capitoli precedenti, circa l'avvenuto disturbo legato al campionamento e successivo trasporto in laboratorio in occasione di tale campagna, che ha comportato l'addensamento dei campioni così come evidenziato dal confronto qui presentato.

9.4.2. Definizione del profilo di preconsolidazione

9.4.2.1 Indagini Progetto Definitivo

Risultati delle prove edometriche

Nelle figure che seguono si riportano le informazioni relative a contenuto d'acqua, indice dei vuoti e peso di volume, ricavati dalle prove edometriche, confrontati con quelli ottenuti dalle prove di classificazione, rispetto alle quali mostrano un buon accordo.

Dal punto di vista della valutazione della tensioni di preconsolidazione, come si può osservare dalla Fig. 9-14, si sono ricavati dei valori molto elevati lungo tutta la verticale di indagine. Tali valori si ritengono tuttavia non rappresentativi delle reali condizioni del terreno in sito, e si ritiene siano ascrivibili, come detto, al disturbo arrecato ai campioni.

Dall'interpretazione di tali prove si è comunque potuto ricavare il rapporto tra Cc e Cr per L2 ed SL che vengono riportati nella Tab. 9-10.

Non si sono potute quindi ricavare informazioni esaurienti su tali rapporto negli strati più superficiali. A causa tuttavia dell'addensamento subito dai campioni, si sottolinea che i valori di indice dei vuoti misurati risultano sottostimati. Non si ritiene quindi rappresentativo il passaggio da Cc/Cr a CR/RR, e pertanto i presenti risultati verranno considerati solo per quanto riguarda Cc e Cr.

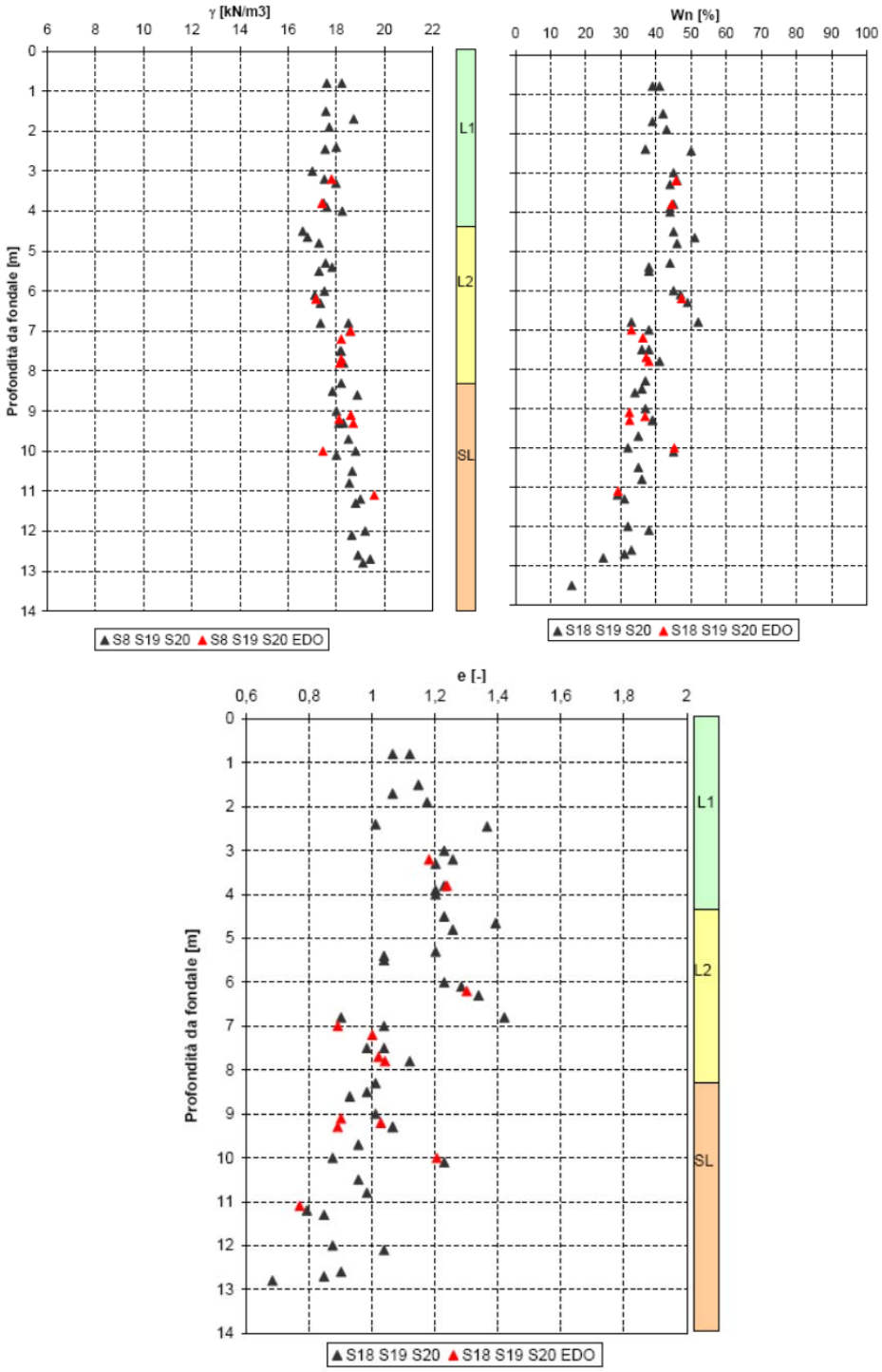


FIG. 9-13- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE EDOMETRICHE E CLASSIFICAZIONI S18 S19 S20

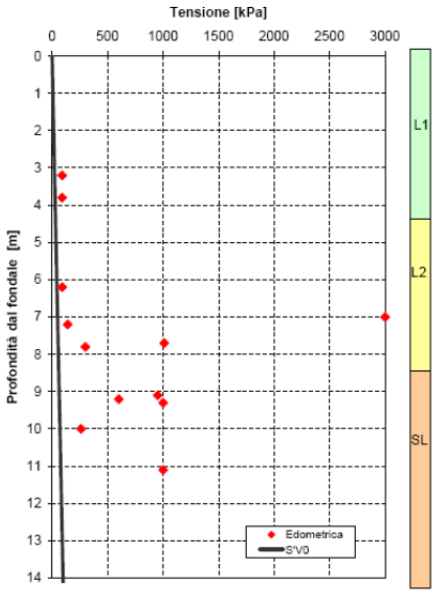


FIG. 9-14 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROVE EDOMETRICHE: TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE CON LA PROFONDITÀ - S18 S19 S20

TAB. 9-10 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDICI DI COMPRESSIBILITÀ S18 S19 S20

CAMPIONE	PROFONDITA' [m da fondale]		Cc	Cr	Cc/Cr	e_0	CR	RR
S18	L1	3,2	0,34	0,04	8,5	1,18	0,15	0,018
	L1	3,8	0,39	0,04	9,75	1,24	0,17	0,017
	L2	6,2	0,45	0,06	7,5	1,3	0,19	0,026
	L2	9,3	0,42	0,04	10,5	0,89	0,22	0,021
	SL	10	0,48	0,05	9,6	1,2	0,22	0,023
S19	L2	7,7	0,45	0,04	11,25	1,02	0,22	0,019
	L2	7,2	0,45	0,04	11,25	1	0,23	0,02
	SL	9,1	0,39	0,025	15,6	0,9	0,21	0,013
S20	L2	7	0,48	0,04	12	0,89	0,25	0,021
	L2	7,8	0,34	0,04	8,5	1,04	0,17	0,019
	SL	9,2	0,42	0,03	14	1,027	0,21	0,015
	SL	11,1	0,3	0,025	12	0,769	0,17	0,014

In conclusione si possono assumere i seguenti valori medi:

L1 Cc = 0.36
Cr = 0.04
L2 Cc = 0.43
Cr = 0.04
SL Cc = 0.39
Cr = 0.03

9.4.2.2 Indagini Progetto Esecutivo

Risultati delle prove edometriche

Nelle figure che seguono si riportano le informazioni relative a contenuto d'acqua, indice dei vuoti e peso di volume, ricavati dalle prove edometriche, confrontati con quelli ottenuti dalle prove di classificazione, rispetto alle quali mostrano un buon accordo.

Dall'interpretazione di tali prove si è poi potuta verificare la presenza di una pre-consolidazione, nonché il rapporto tra Cc e Cr. Le Fig. 9-17 e Fig. 9-18 mostrano il profilo di preconsolidazione ottenuto. Nelle Tab. 9-11 e Tab. 9-12 vengono invece indicati le compressibilità ottenute in ciascuna prova.

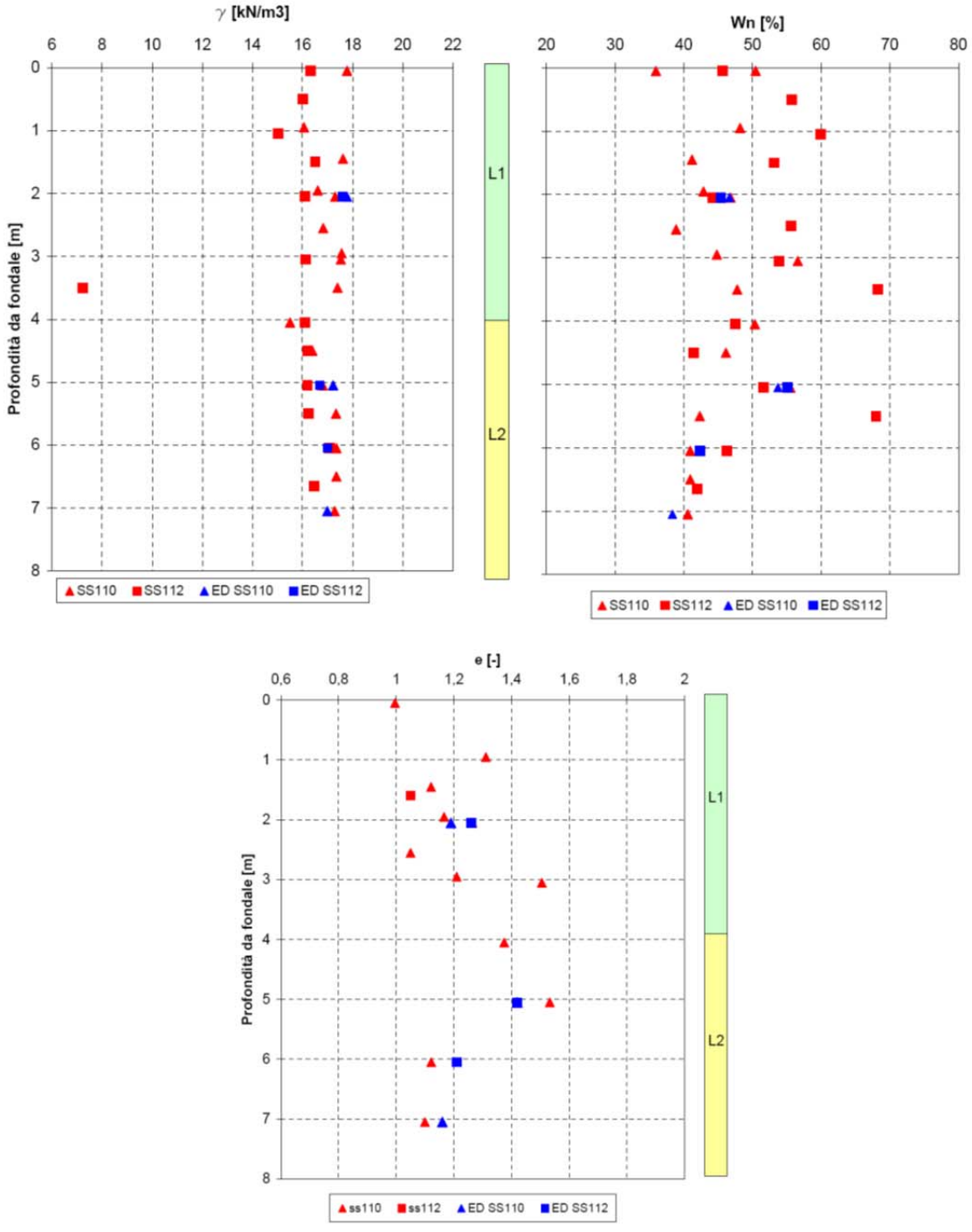


FIG. 9-15- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE EDOMETRICHE E CLASSIFICAZIONI SS110 SS112

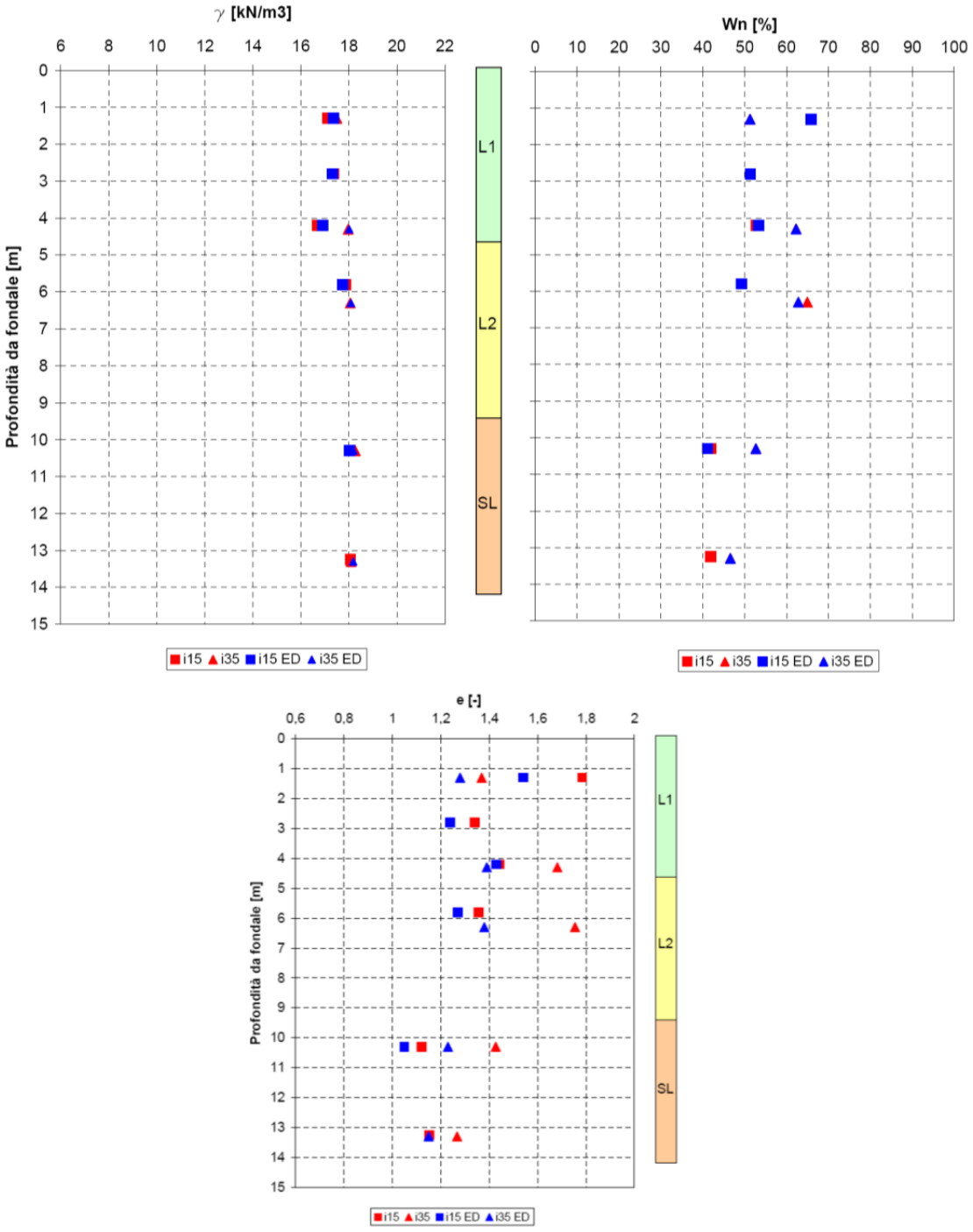


FIG. 9-16 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE EDOMETRICHE E CLASSIFICAZIONI I15 I35

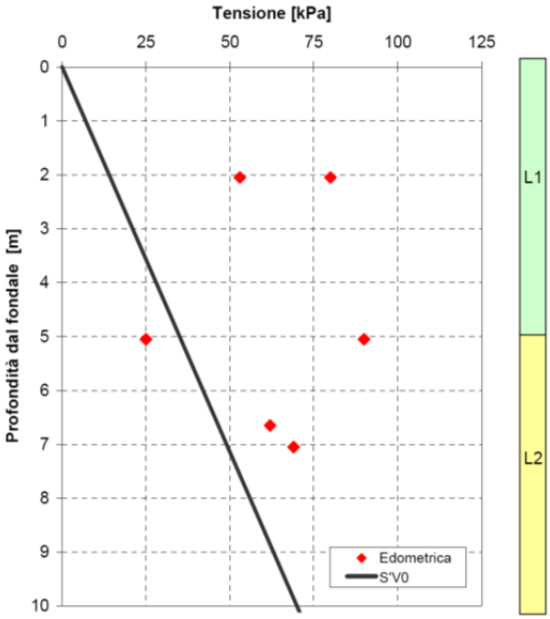


FIG. 9-17 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROVE EDOMETRICHE: TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE CON LA PROFONDITÀ - SS110 SS112

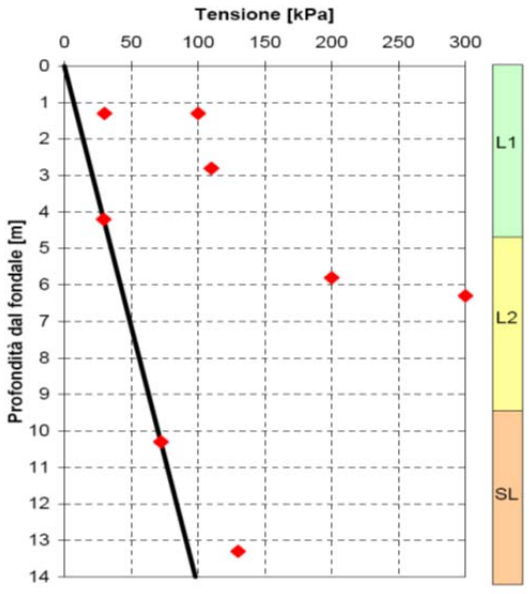


FIG. 9-18 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROVE EDOMETRICHE: TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE CON LA PROFONDITÀ - I15 I35

TAB. 9-11 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDICI DI COMPRESSIBILITÀ SS110 SS112

CAMPIONE	PROFONDITA' [m da fondale]		Cc	Cr	Cc/Cr	e_0	CR	RR
SS110	L1	2	0.270	0.0095	28.42	1.19	0.123	0.0043
	L1	5	0.300	0.0160	18.75	1.42	0.124	0.0066
	L2	7	0.357	0.0240	14.88	1.16	0.165	0.0110
SS112	L1	2	0.234	0.0220	10.64	1.26	0.103	0.0097
	L1	5	0.340	0.0290	11.72	1.42	0.140	0.0120
	L2	6.6	0.236	0.0225	10.49	1.21	0.107	0.0100

TAB. 9-12 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - INDICI DI COMPRESSIBILITÀ I15 I35

CAMPIONE	PROFONDITA' [m da fondale]		Cc	Cr	Cc/Cr	e_0	CR	RR
i15	L1	1.3	0.43	0.015	28.6	1.54	0.17	0.006
	L1	2.8	0.34	0.04	8.5	1.24	0.15	0.018
	L1	4.2	0.3	0.03	10.0	1.43	0.12	0.012
	L2	5.8	0.43	0.04	10.8	1.27	0.19	0.018
	SL	10.3	0.36	0.035	10.2	1.05	0.18	0.017
i35	L1	1.3	0.44	0.04	11.0	1.28	0.19	0.017
	L2	4.3	0.5	0.035	14.2	1.39	0.21	0.015
	L2	6.3	0.42	0.03	14	1.38	0.18	0.013
	SL	10.3	0.42	0.034	12.3	1.23	0.19	0.015
	SL	13.3	0.33	0.018	18.3	1.15	0.15	0.008

In conclusione si possono assumere i seguenti valori medi:

L1	Cc = 0.33	e0 = 1.35	CR = 0.14
	Cr = 0.025	e0 = 1.35	RR = 0.010
L2	Cc = 0.388	e0 = 1.28	CR = 0.17
	Cr = 0.03	e0 = 1.28	RR = 0.013
SL	Cc = 0.37	e0 = 1.20	CR = 0.168
	Cr = 0.025	e0 = 1.20	RR = 0.011

Risultati delle prove triassiali isotrope

Si sono lasciati scongelare i provini naturalmente prevedendo un solo ciclo di carico/scarico/ricarico per ogni prova, a partire di volta in volta da una diversa tensione.

La tensione efficace agente nel terreno di fondazione per effetto del solo peso proprio del rilevato è dell'ordine dei 100 kPa.

Per questo tutti i cicli di carico-scarico sono riferiti a tale tensione con l'intento di simulare i cicli di carico-scarico relativi ai carichi variabili agenti sull'opera.

Ovvero i cicli di carico partono da 100 kPa, raggiungono tensioni diverse e gli scarichi vengono eseguiti nuovamente fino a 100 kPa, in modo da simulare la rimozione totale del sovraccarico variabile.

L'intento è simulare le diverse intensità di sovraccarico che agiranno sul rilevato/cassoni e la relativa rimozione dello stesso al fine di verificare che i rapporti tra moduli di carico-scarico-ricarico si mantengano ragionevolmente costanti all'interno dell'intervallo di pressioni considerato.

Le Fig. 9-19 e Fig. 9-20 riportano l'andamento dell'OCR con la profondità.

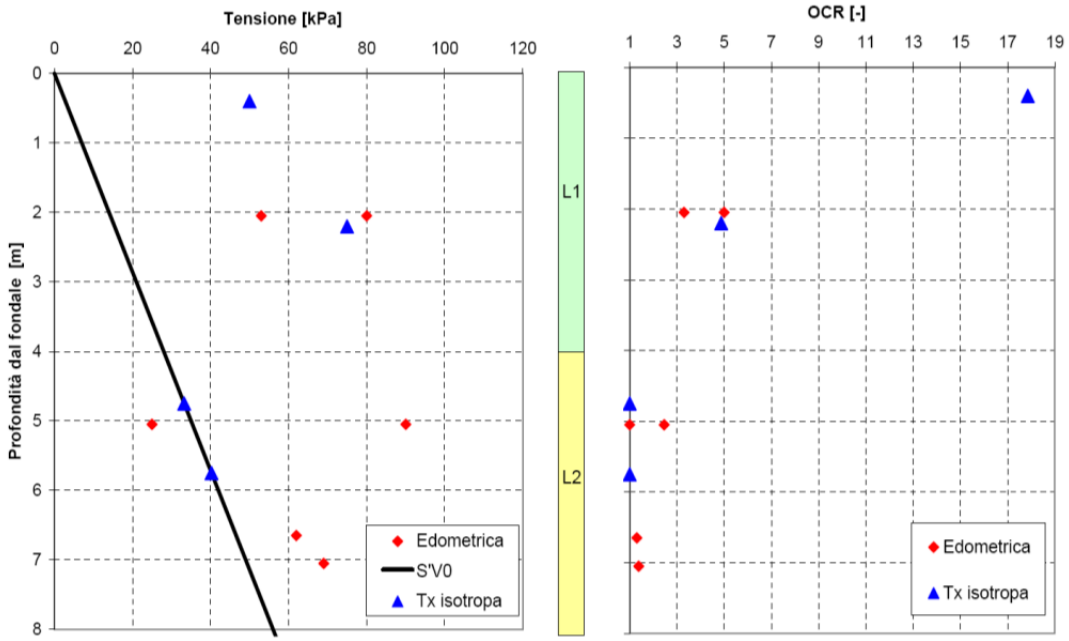


FIG. 9-19 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROVE EDOMETRICHE E TRIASSIALI: TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE E OCR - SS110 SS112

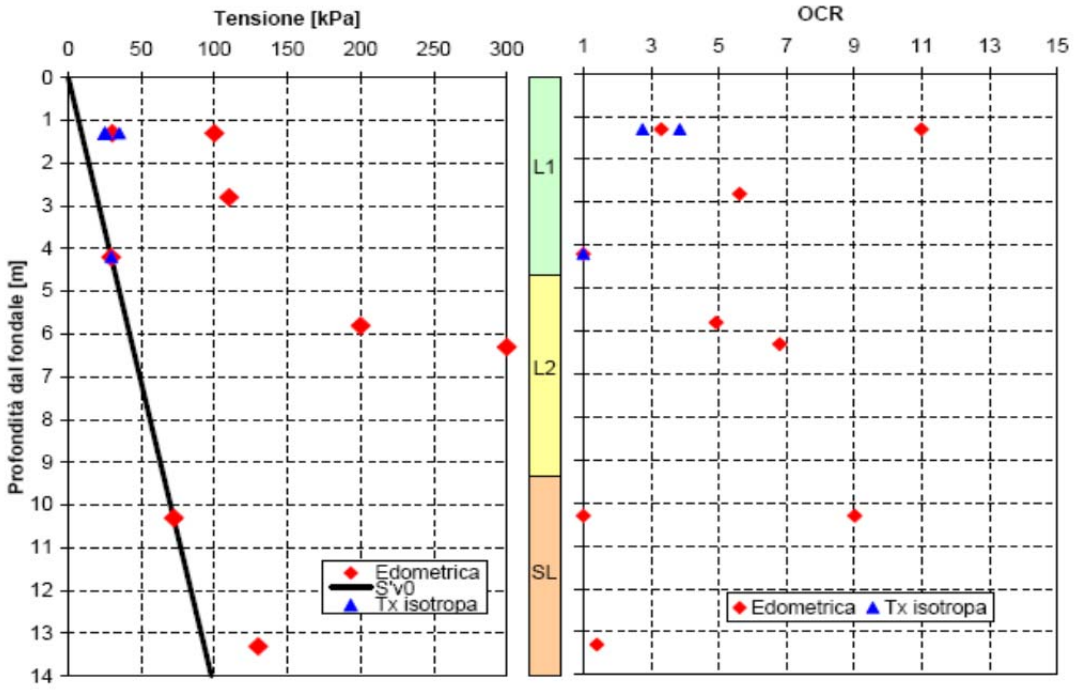


FIG. 9-20 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROVE EDOMETRICHE E TRIASSIALI: TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE E OCR - I15 I35

9.4.2.3 Interpretazione dei risultati e considerazioni sul profilo di OCR

Ci si riferisce, in questo paragrafo, ai livelli L1 ed L2, ovvero ai primi 8 - 9 metri dal fondale, che come detto sono limi a bassa plasticità e a bassa consistenza.

L'andamento di contenuto d'acqua e peso di volume sembrerebbero testimoniare una preconsolidazione dei primi 3 metri di terreno sotto il fondale. Si cerca riscontro di detta preconsolidazione nelle prove edometriche e nelle triassiali isotrope eseguite.

Si riportano di seguito i diagrammi della tensione di preconsolidazione σ'_p confrontata con la σ'_{v0} con la profondità ed il relativo andamento dell'OCR, definito come $OCR = \frac{\sigma'_P}{\sigma'_{v0}}$, così come ricavati dalle prove edometriche.

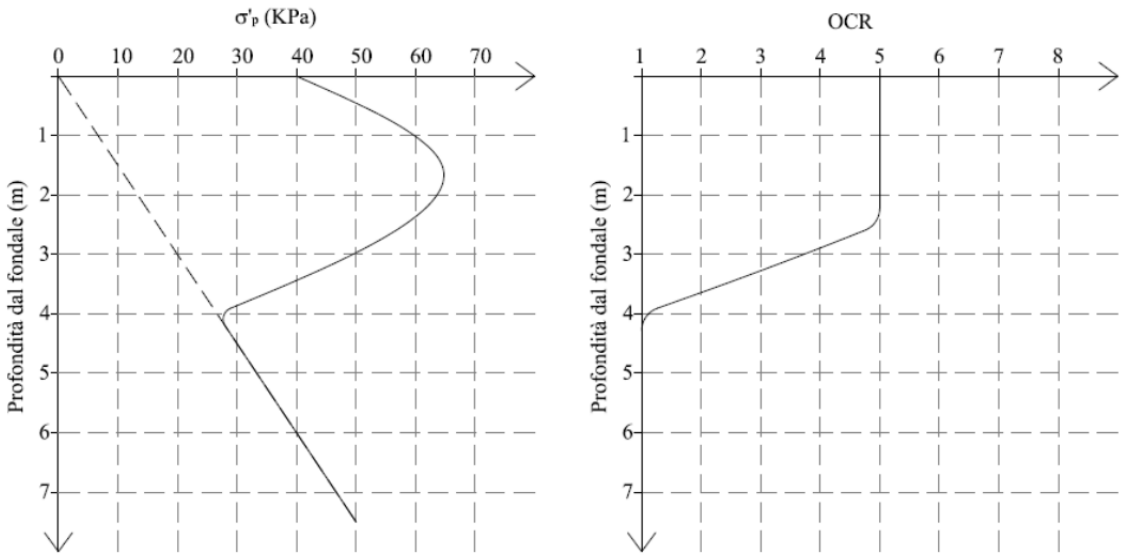


FIG. 9-21- VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DELLA TENSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE E DELL'OCR CON LA PROFONDITÀ

In effetti anche le prove di laboratorio restituiscono un profilo di preconsolidazione normal-consolidato al di sotto dei 4 metri dal fondale, con un valore di OCR che, invece, arriva a 5 tra il fondale e i 4 metri di profondità.
Facendo riferimento alla stratigrafia media vuol dire che il livello L1 di fatto è sovraconsolidato, mentre il livello L2 è normal-consolidato.

9.4.3. Resistenza dei terreni di fondazione

9.4.3.1 Indagini Progetto Definitivo - Risultati delle prove triassiali

Si riportano in questo paragrafo i risultati delle prove triassiali. Dapprima si riporta il confronto tra pesi di volume, contenuti d'acqua ed indice dei vuoti ricavati dalle triassiali con quelli ricavati dalle prove di classificazione, rispetto alle quali si ha un buon accordo, Fig. 9-22.
Di seguito vengono riportati gli inviluppi a rottura ricavati dalle prove triassiali stesse, figure da Fig. 9-23 a Fig. 9-27.
Le prove hanno quindi permesso di valutare i valori dell'angolo d'attrito allo stato critico ed il profilo di cu/σ'_v che vengono sintetizzati nei paragrafi seguenti.

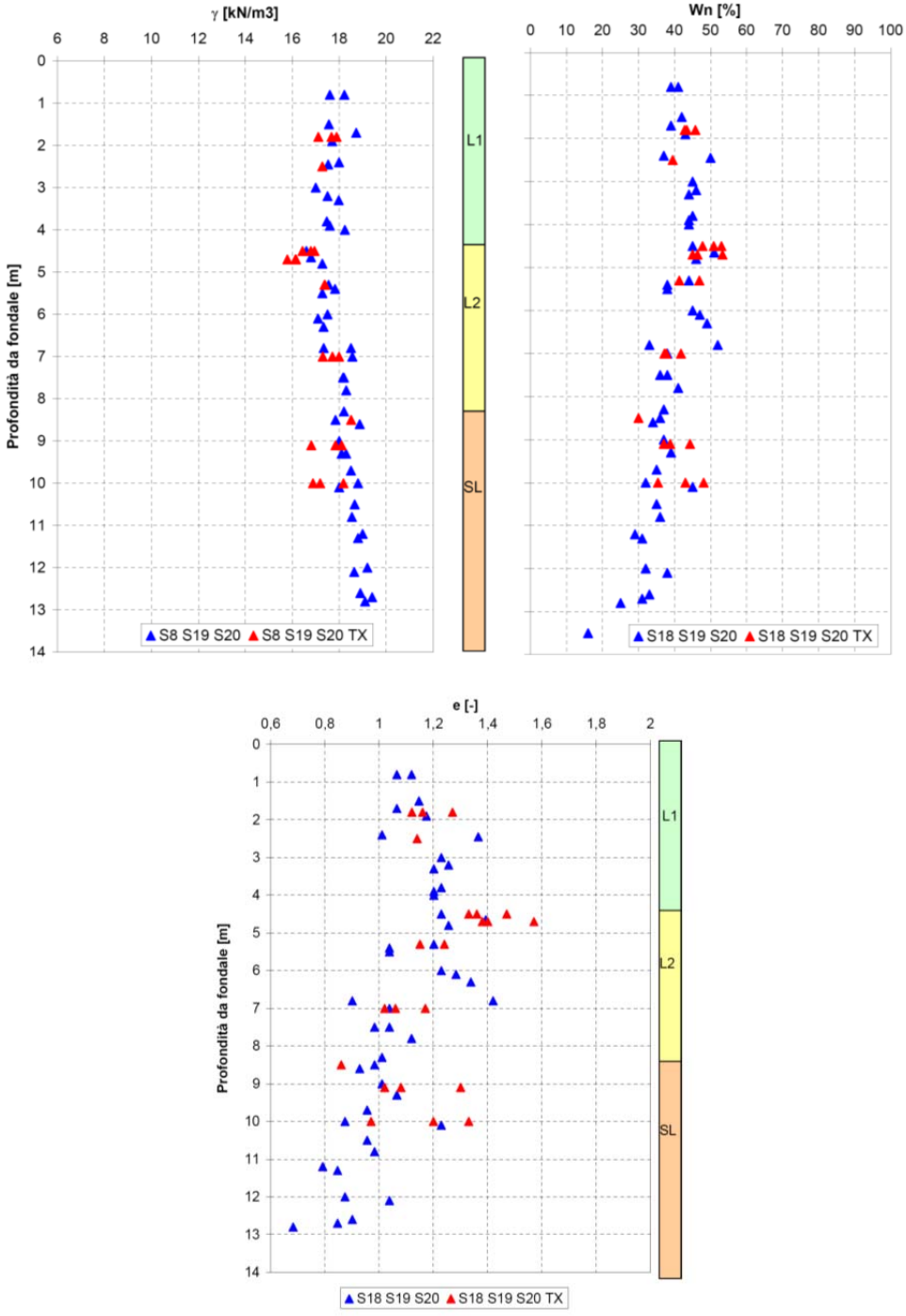
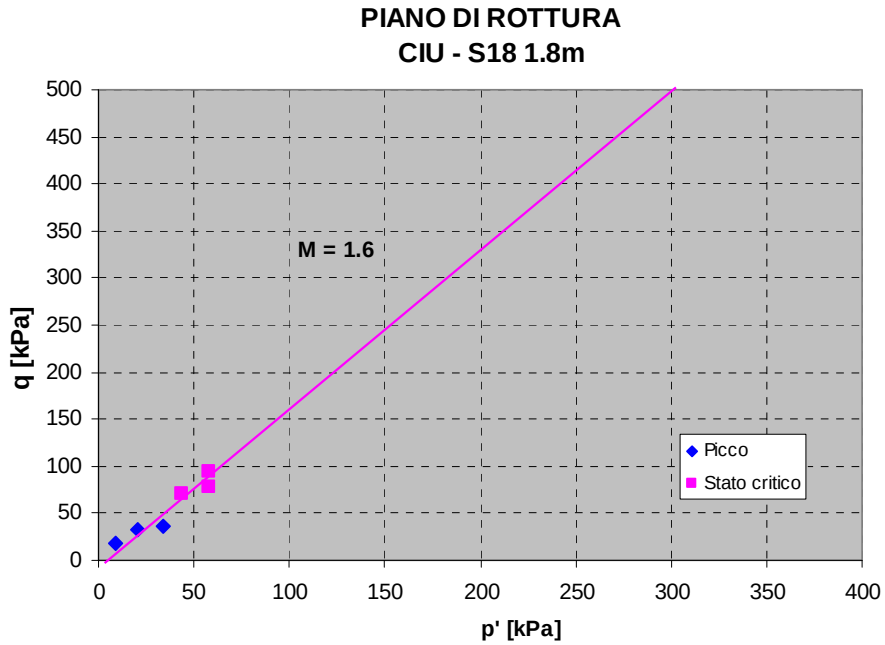


FIG. 9-22 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - PESO DI VOLUME, CONTENUTO D'ACQUA E INDICE DEI VUOTI - S18 S19 S20



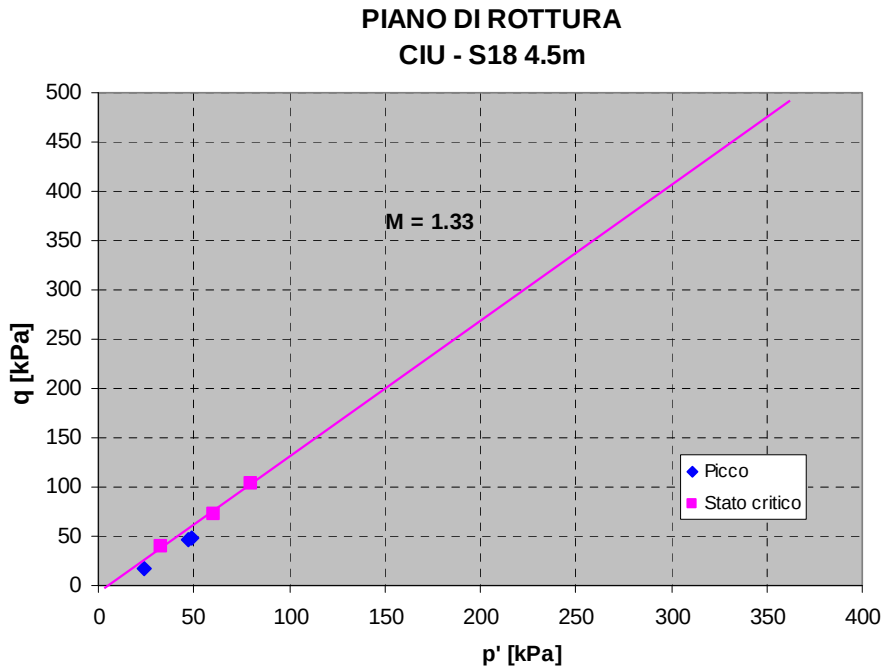
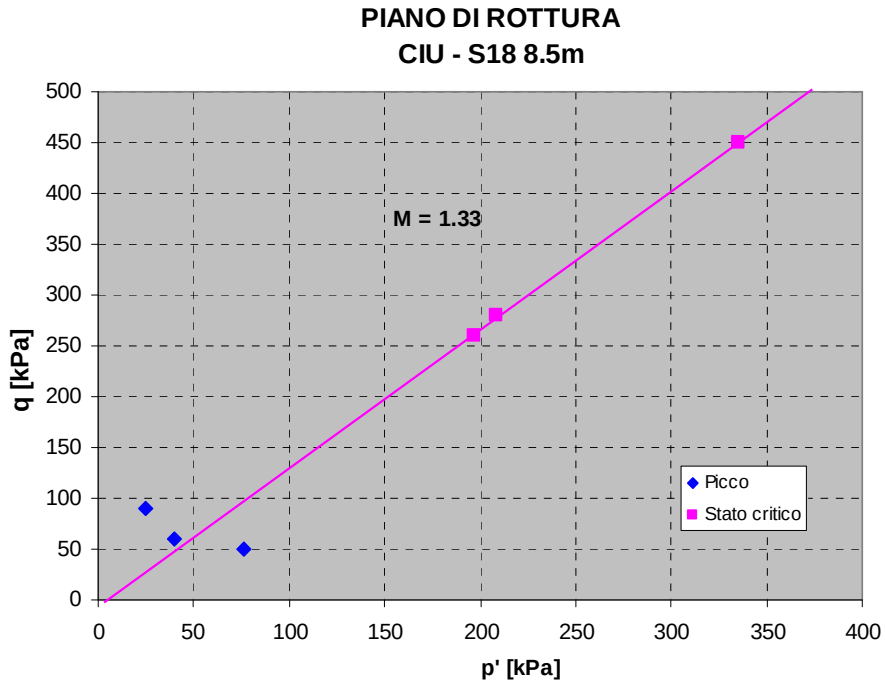


FIG. 9-23 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA S18 1.8 E 4.5 M



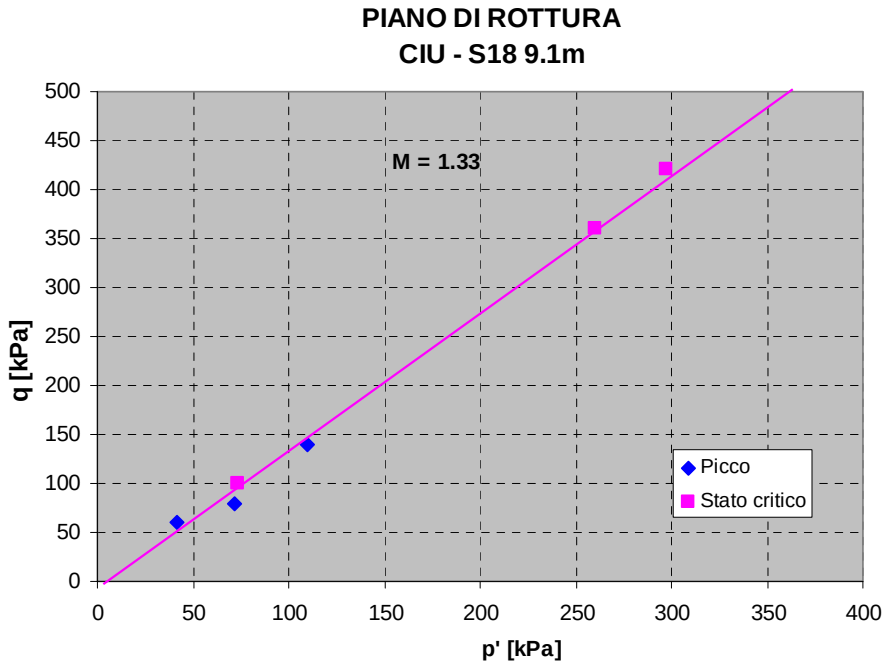


FIG. 9-24 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA S18 8.5 E 9.1 M

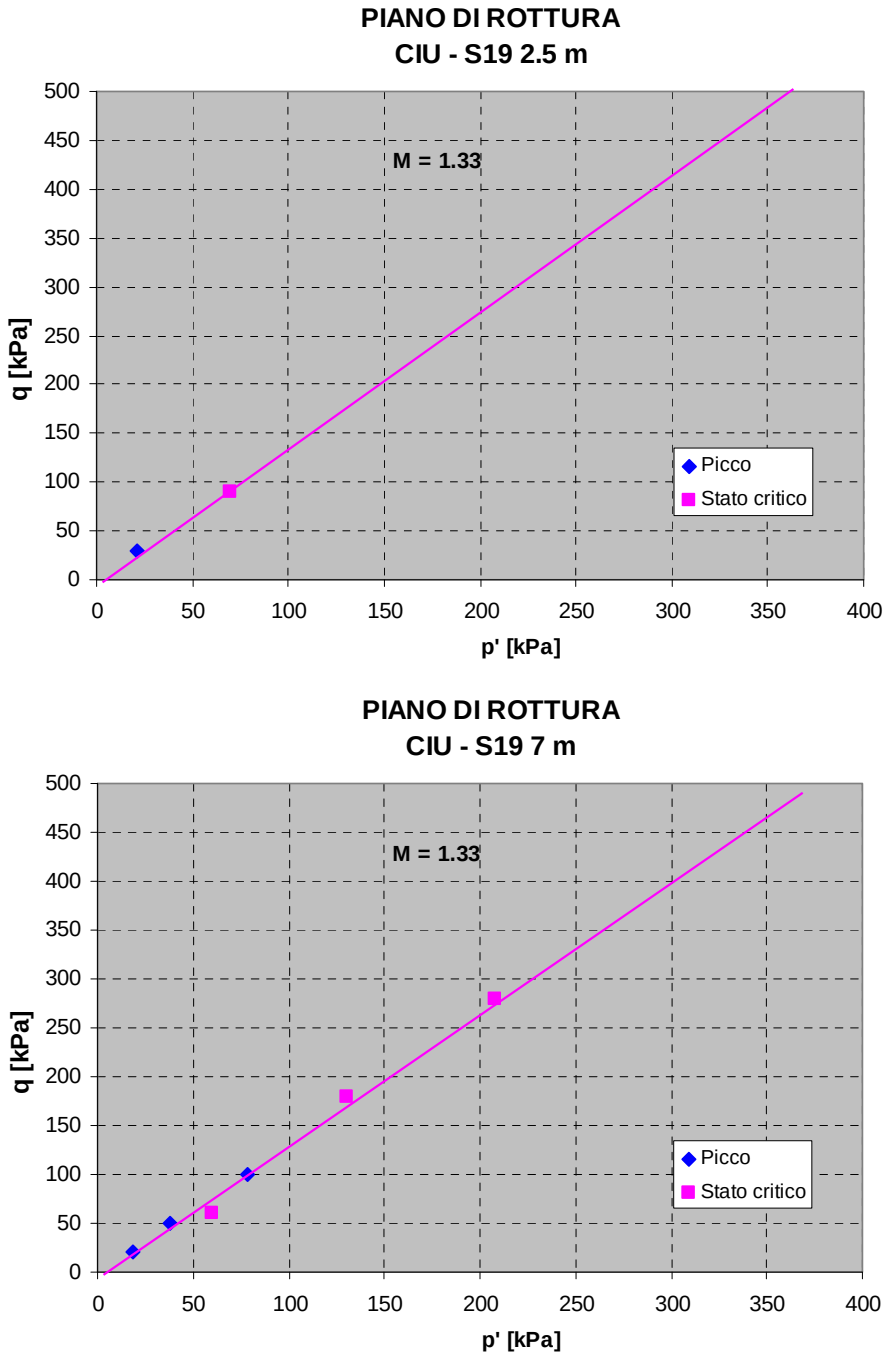


FIG. 9-25 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA S19 2.5 E 7 M

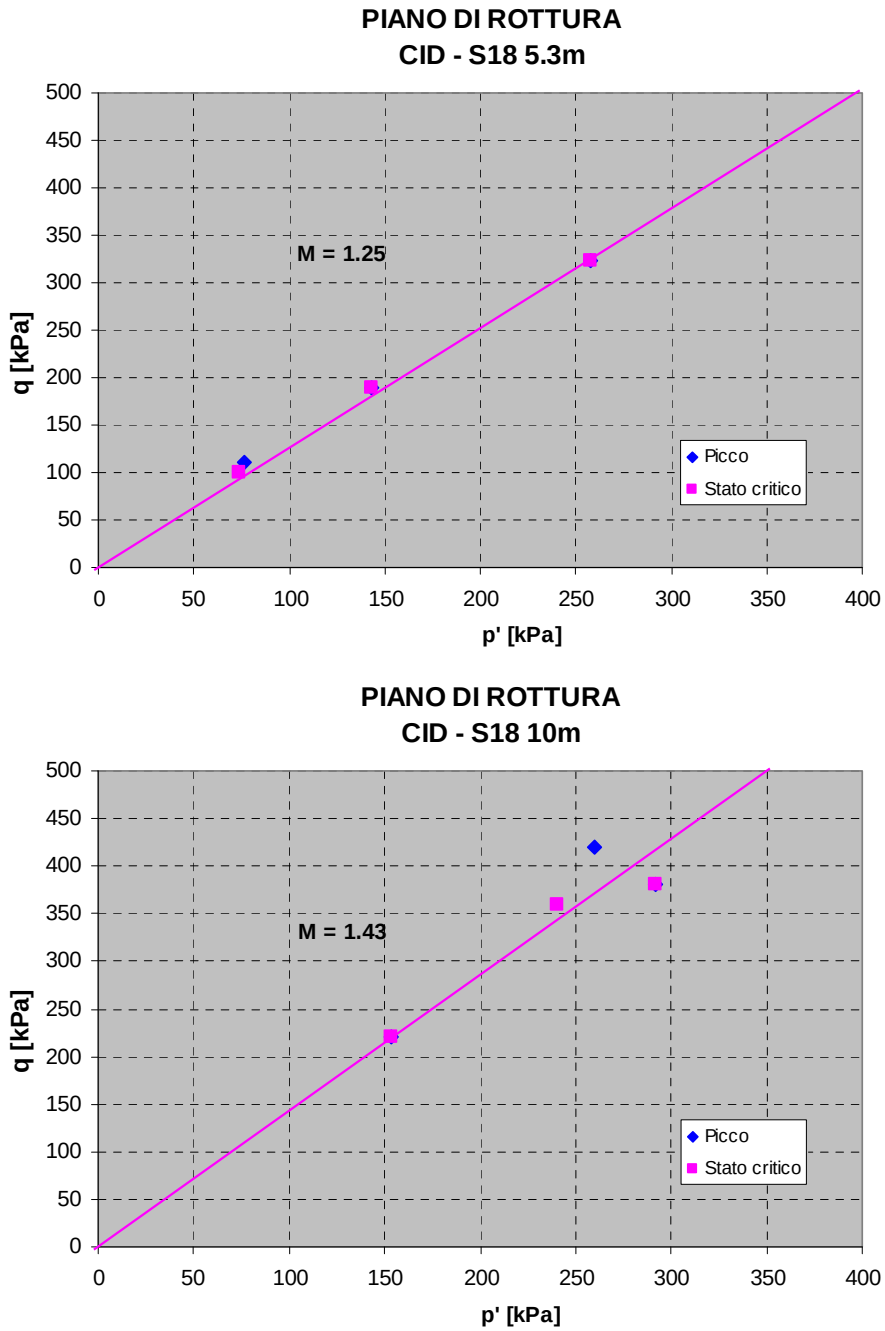


FIG. 9-26 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA S18 5.3 E 10 M

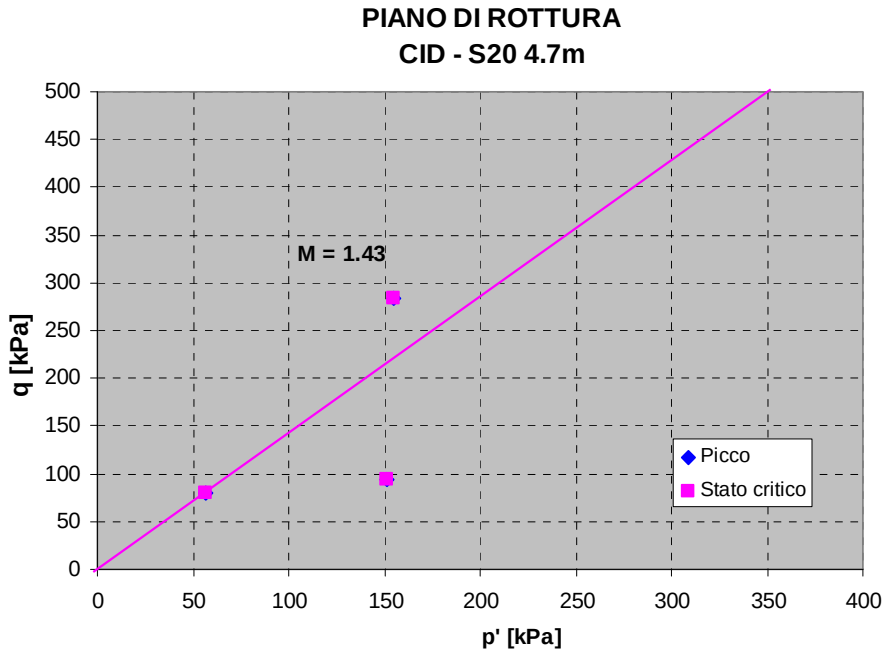


FIG. 9-27 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA S20 4.7M

9.4.3.2 Indagini Progetto Esecutivo - Risultati delle prove triassiali

Si riportano in questo paragrafo i risultati delle prove triassiali. Dapprima si riporta il confronto tra pesi di volume, contenuti d'acqua ed indice dei vuoti ricavati dalla triassiali con quelli ricavati dalle prove di classificazione, rispetto alle quali si ha un buon accordo, Fig. 9-28 e Fig. 9-29.

Di seguito vengono riportati gli inviluppi a rottura ricavati dalle prove triassiali stesse, figure da Fig. 9-30 a Fig. 9-39.

Le prove hanno quindi permesso di valutare i valori dell'angolo d'attrito allo stato critico ed il profilo di cu/σ'_v che vengono sintetizzati nei paragrafi seguenti.

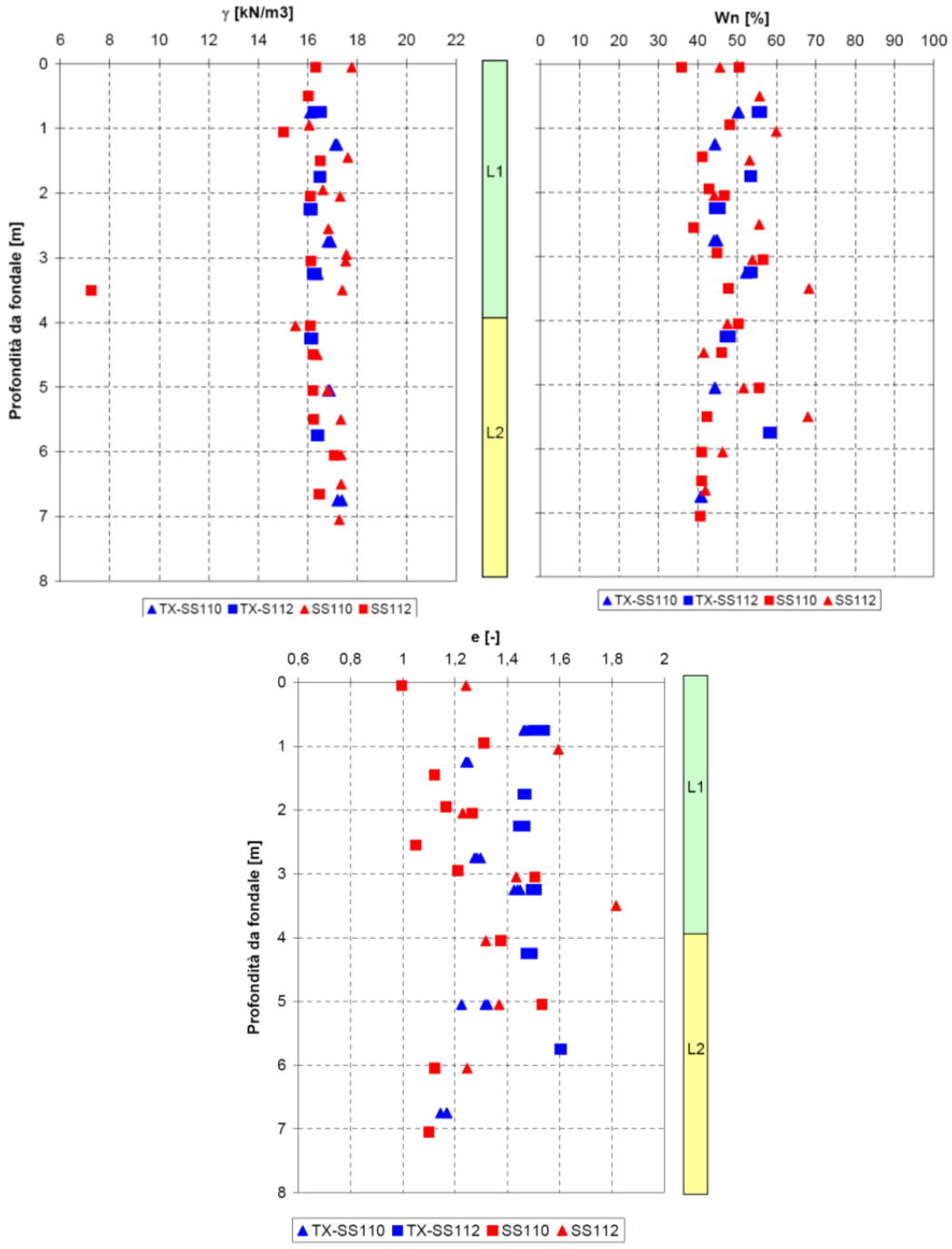


FIG. 9-28 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - PESO DI VOLUME, CONTENUTO D'ACQUA E INDICE DEI VUOTI - SS110 SS112

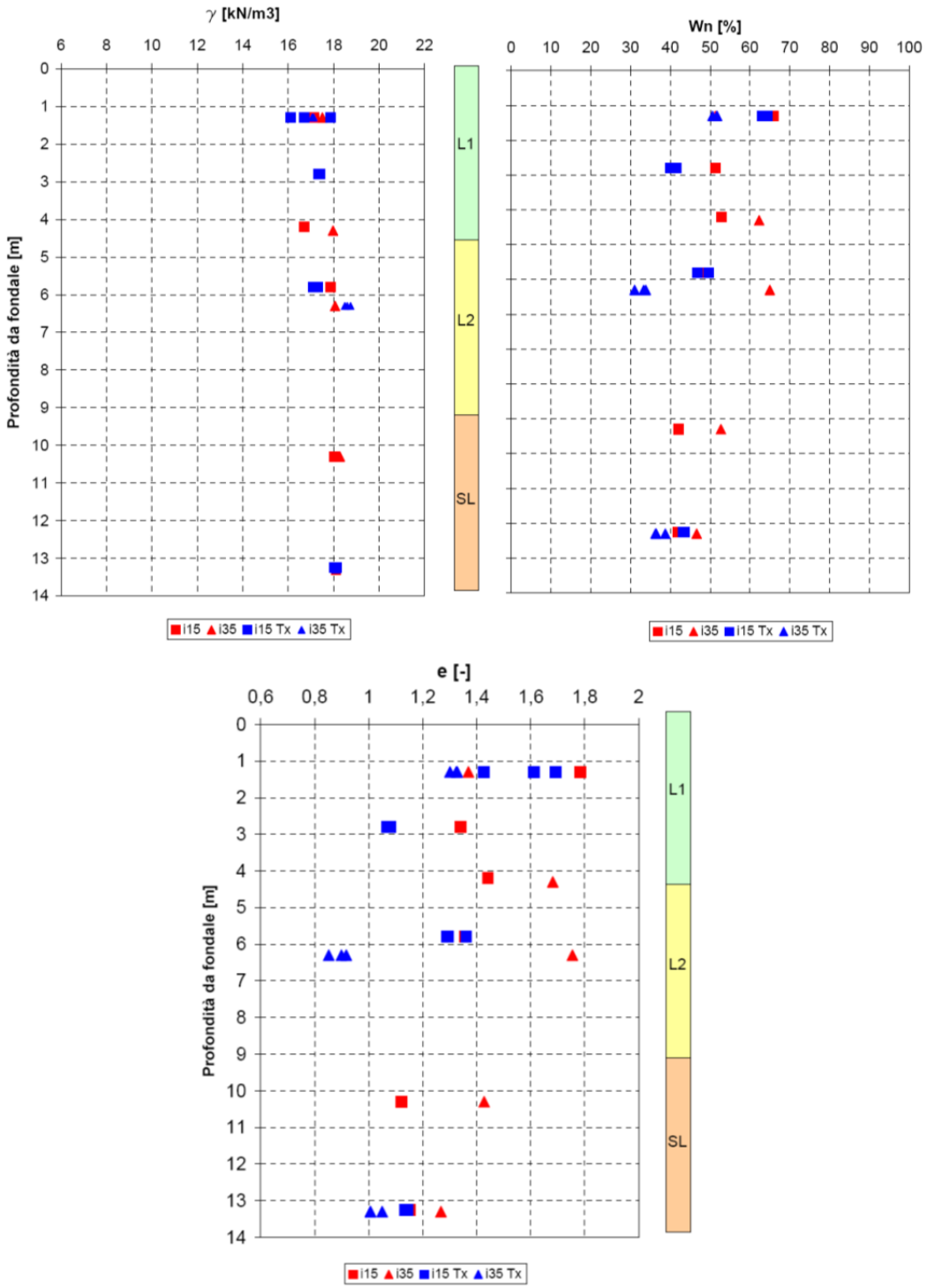


FIG. 9-29 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - PESO DI VOLUME, CONTENUTO D'ACQUA E INDICE DEI VUOTI - I15 I35

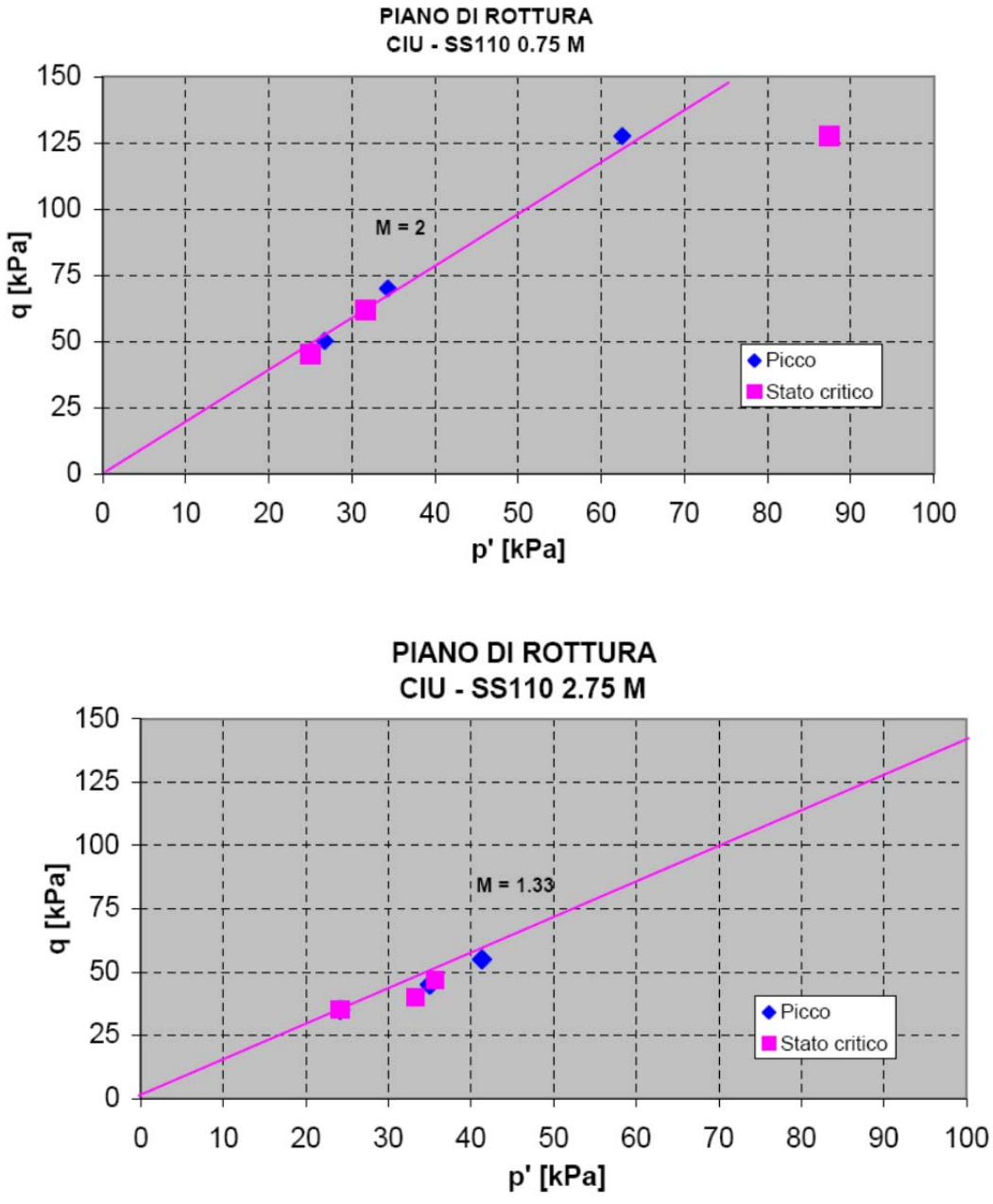


FIG. 9-30 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS110 0.75 E 2.75 M

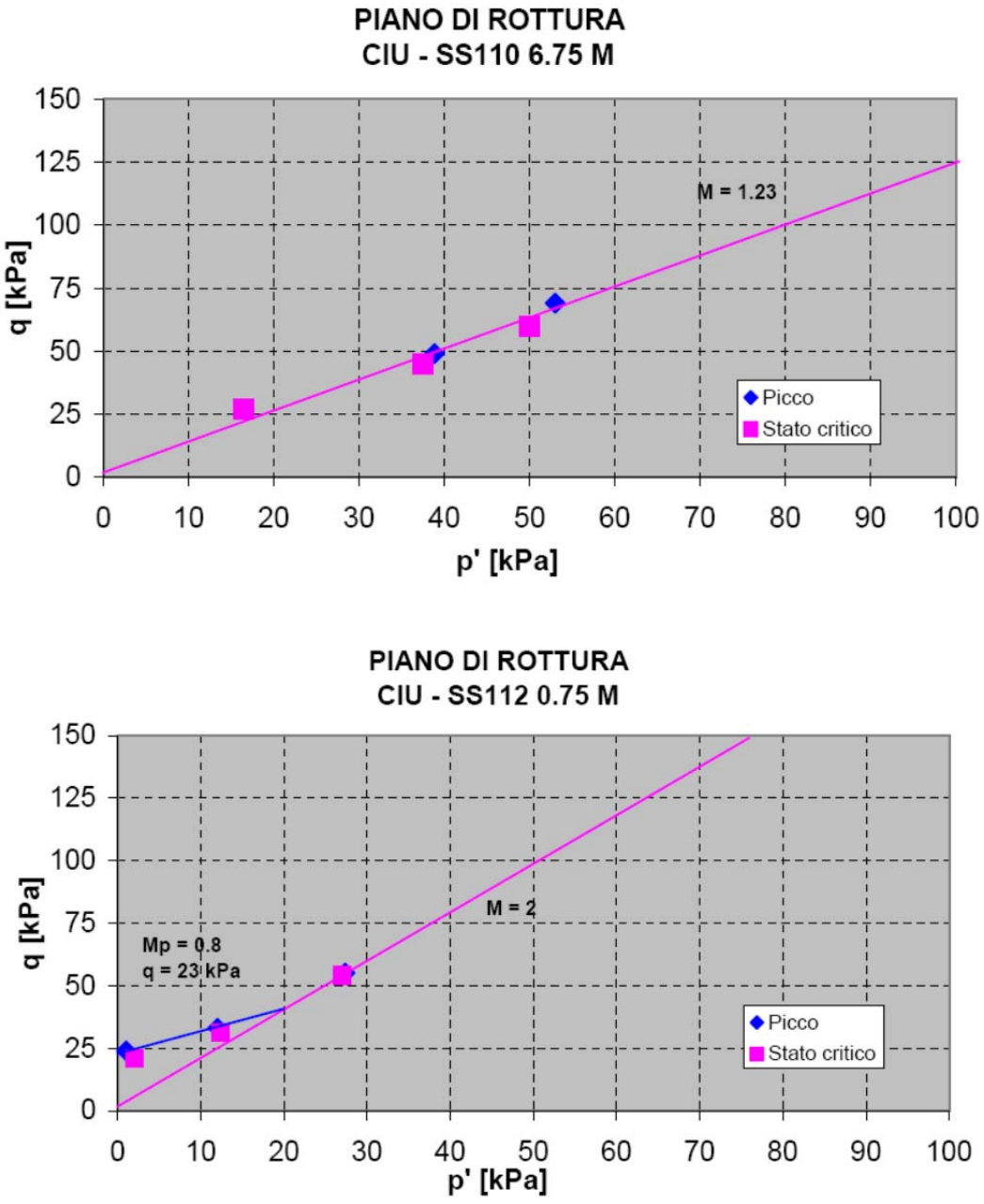


FIG. 9-31 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS110 6.75 E SS112 0.75 M

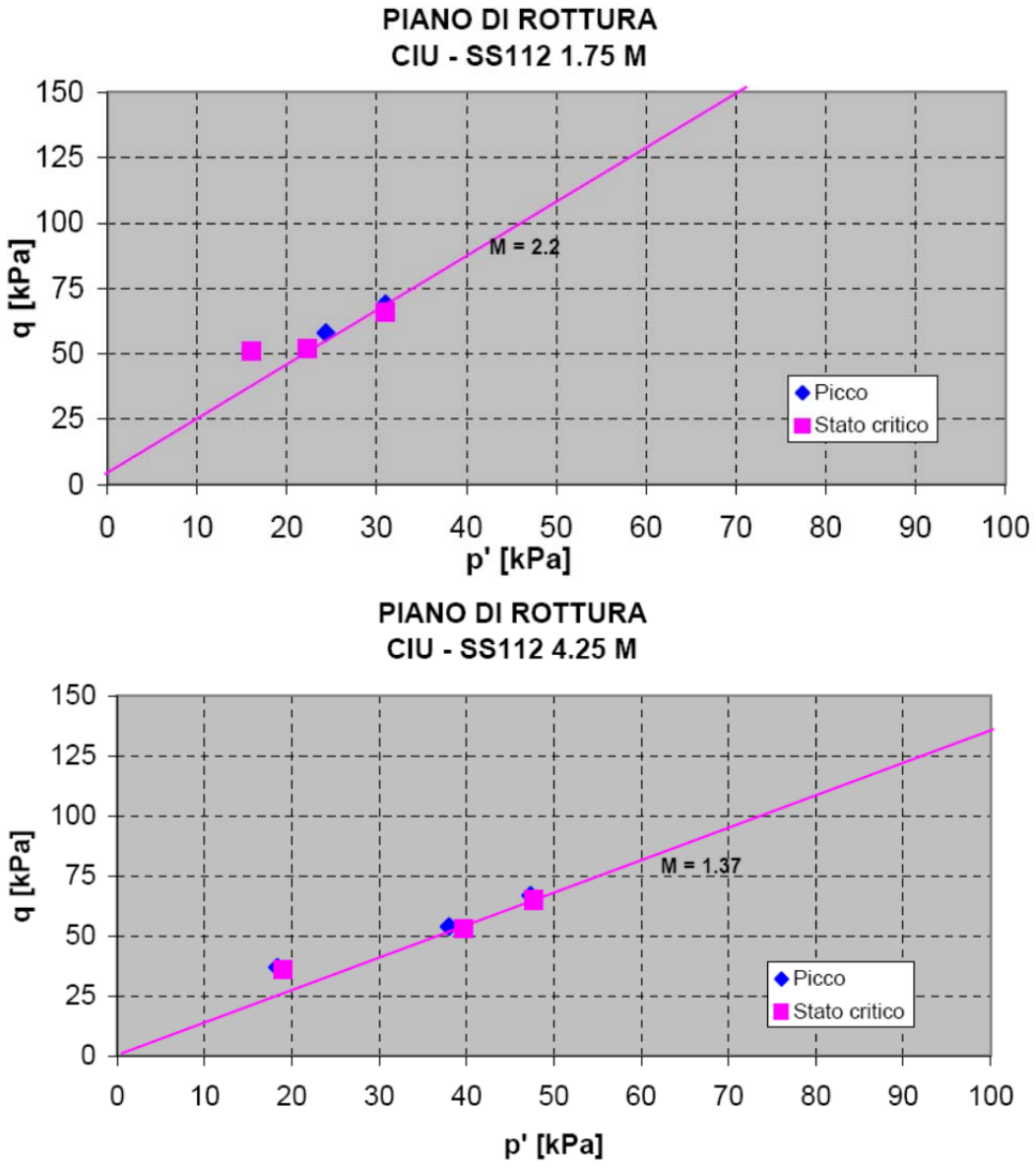


FIG. 9-32 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS112 1.75 E 4.25 M

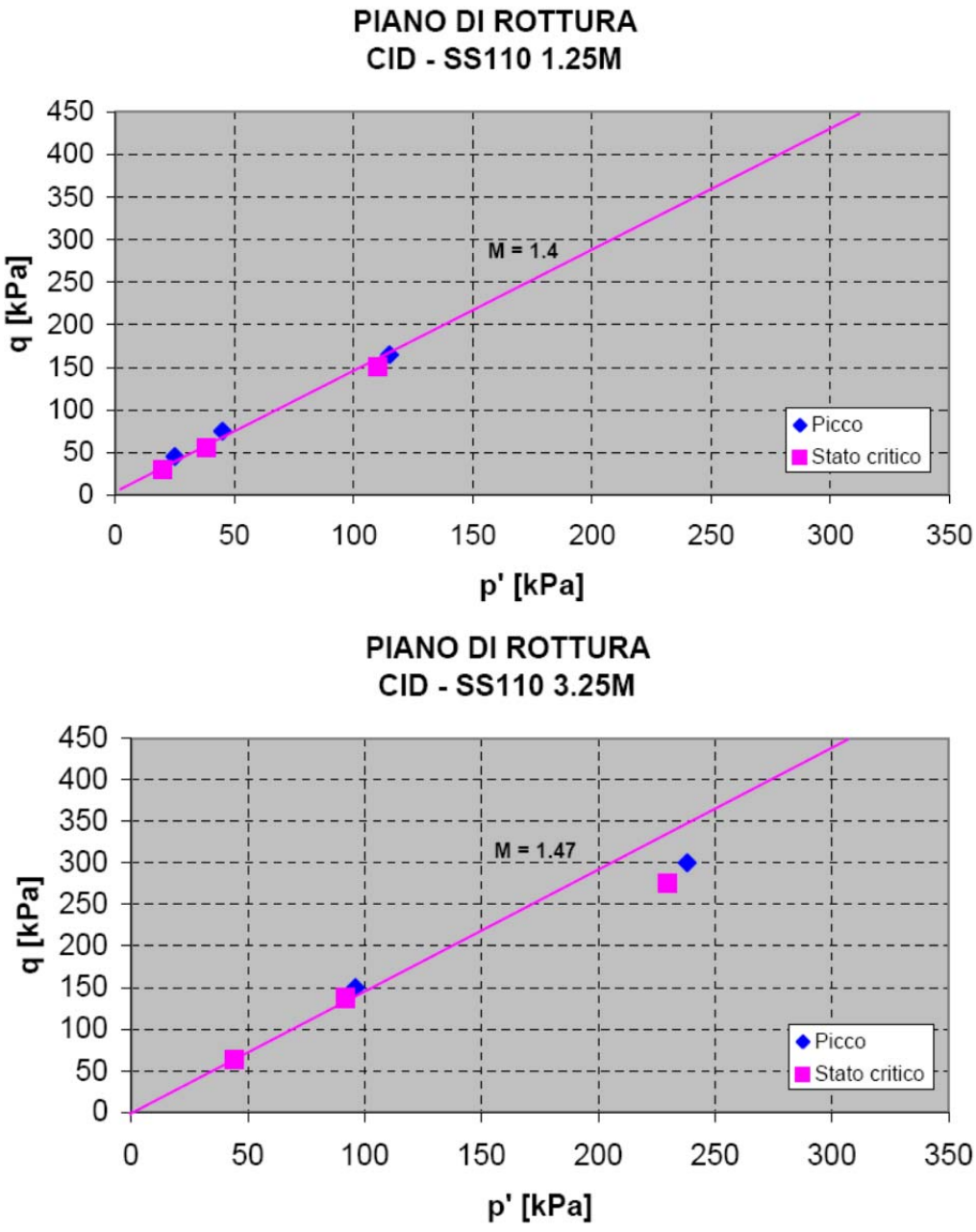


FIG. 9-33 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS110 1.25 E 3.25 M

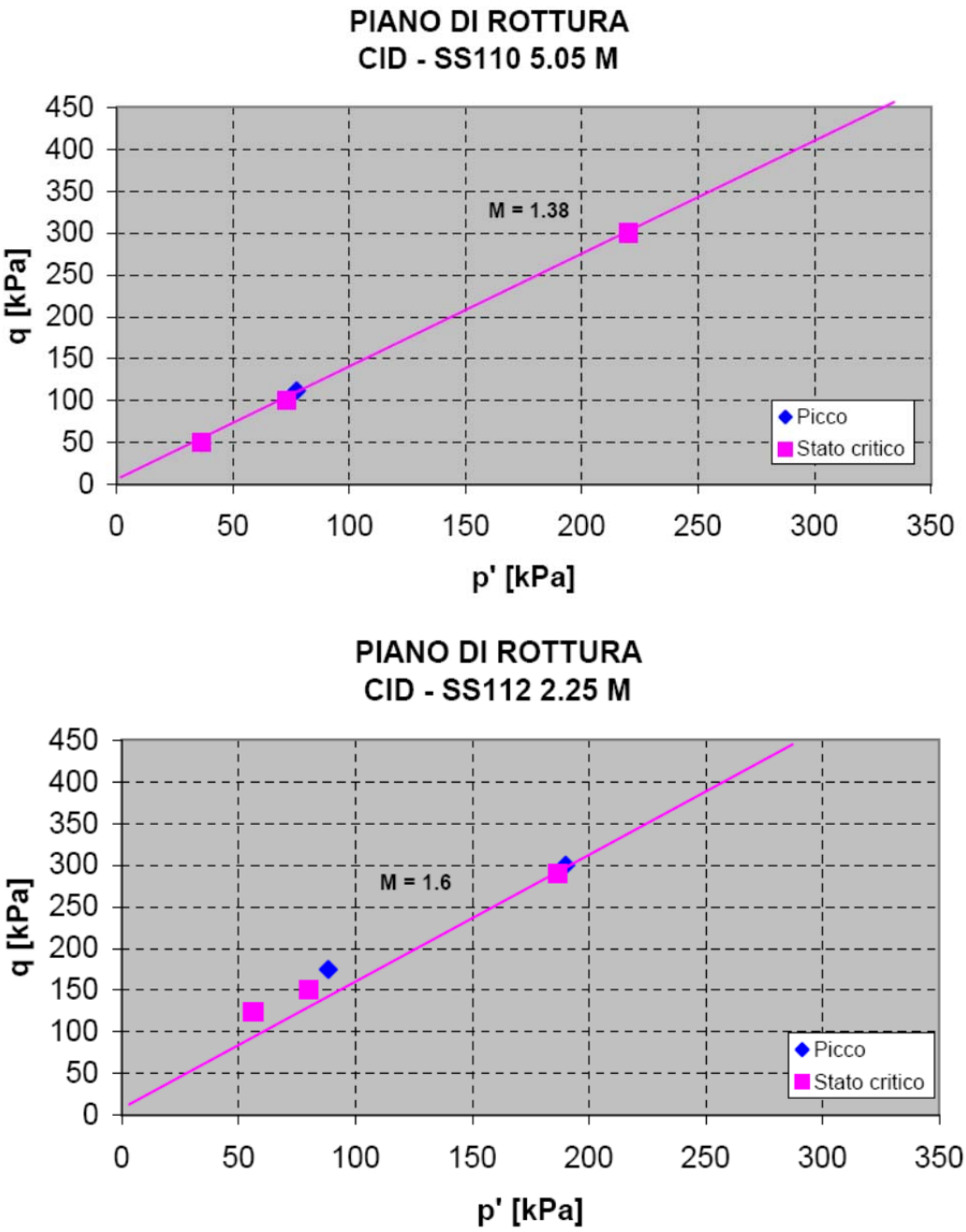


FIG. 9-34 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS110 5.05 E SS112 2.25 M

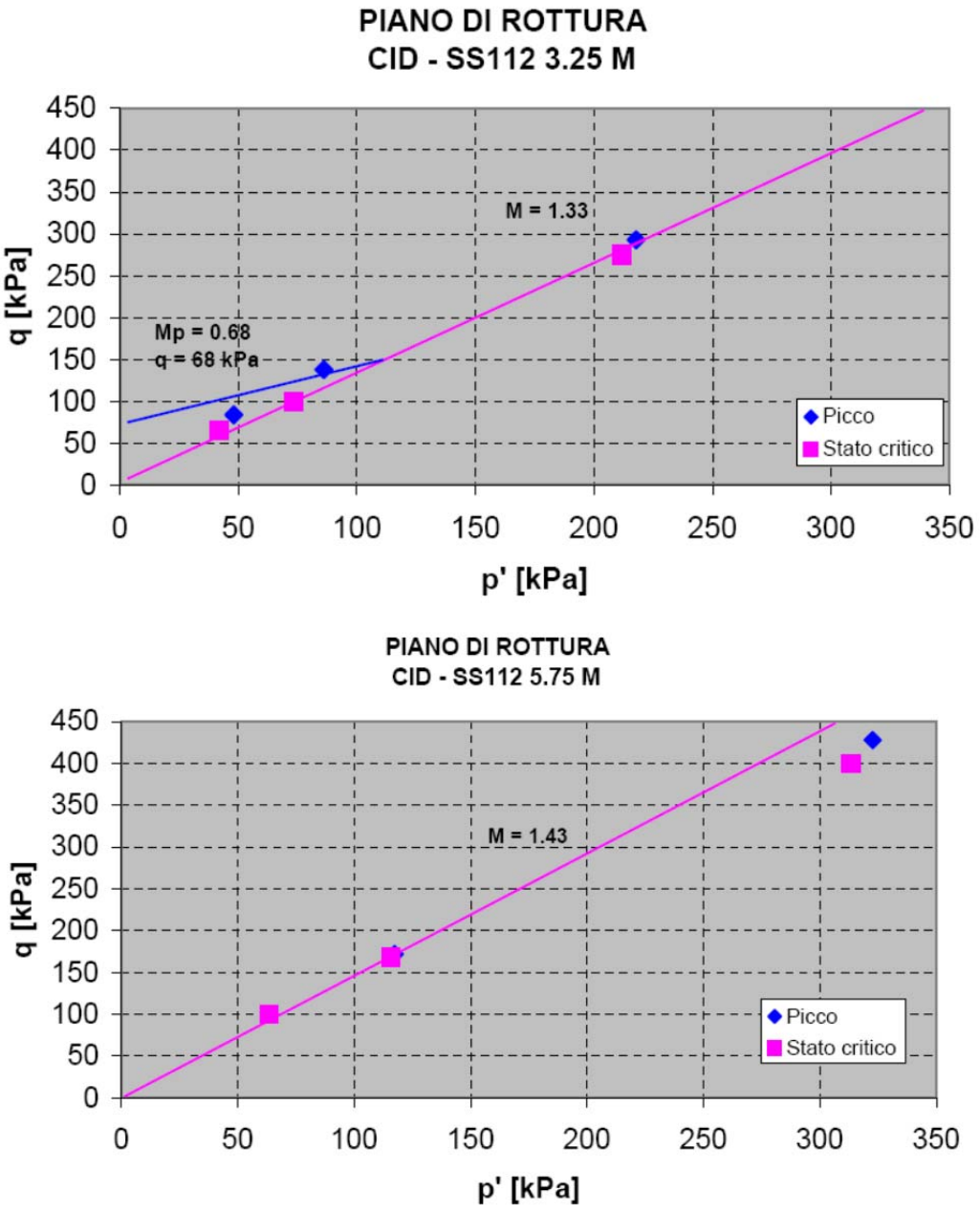


FIG. 9-35 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA SS112 3.25 E 5.75 M

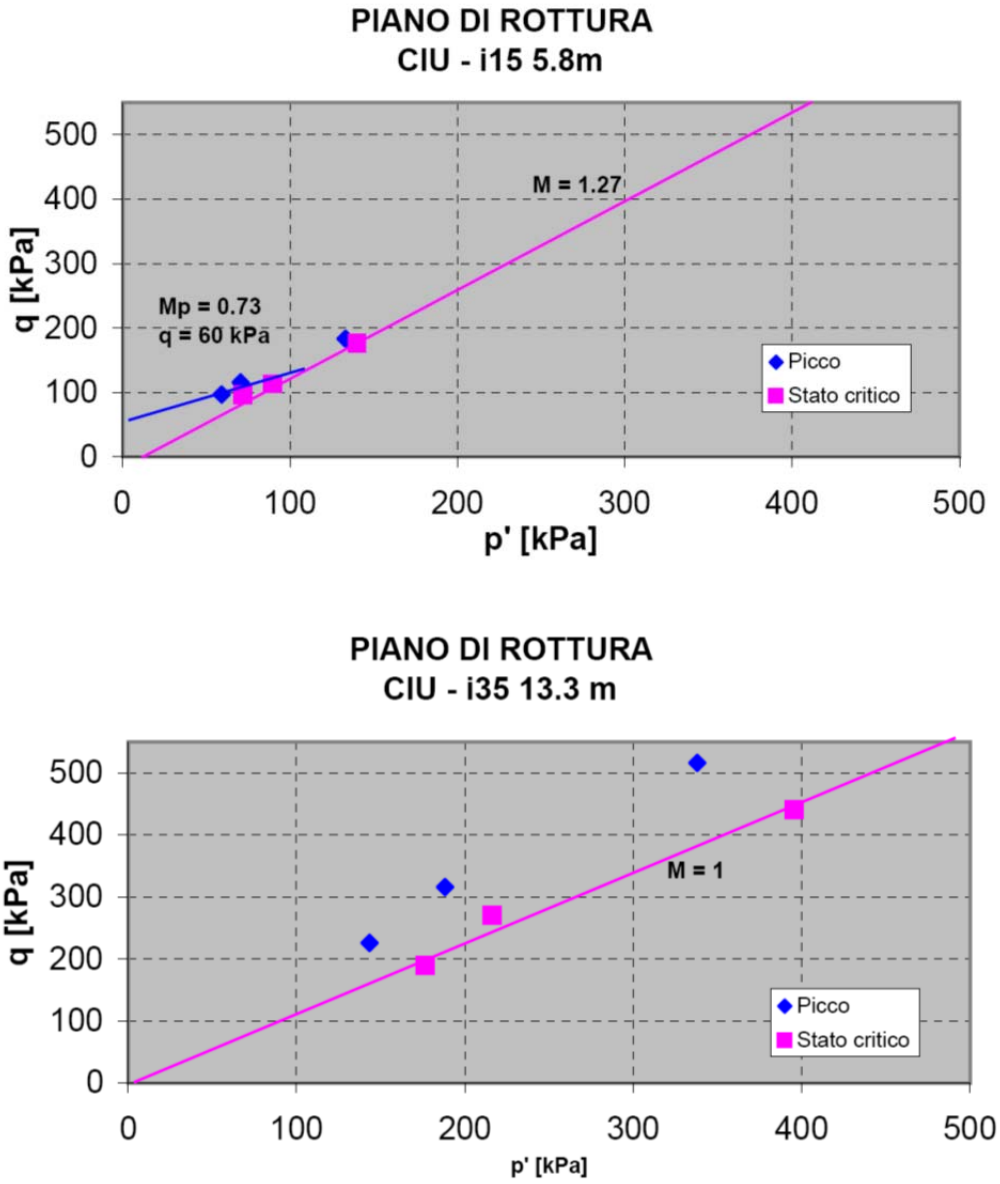


FIG. 9-36 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA I15 5.8 M E I/35 13.3 M

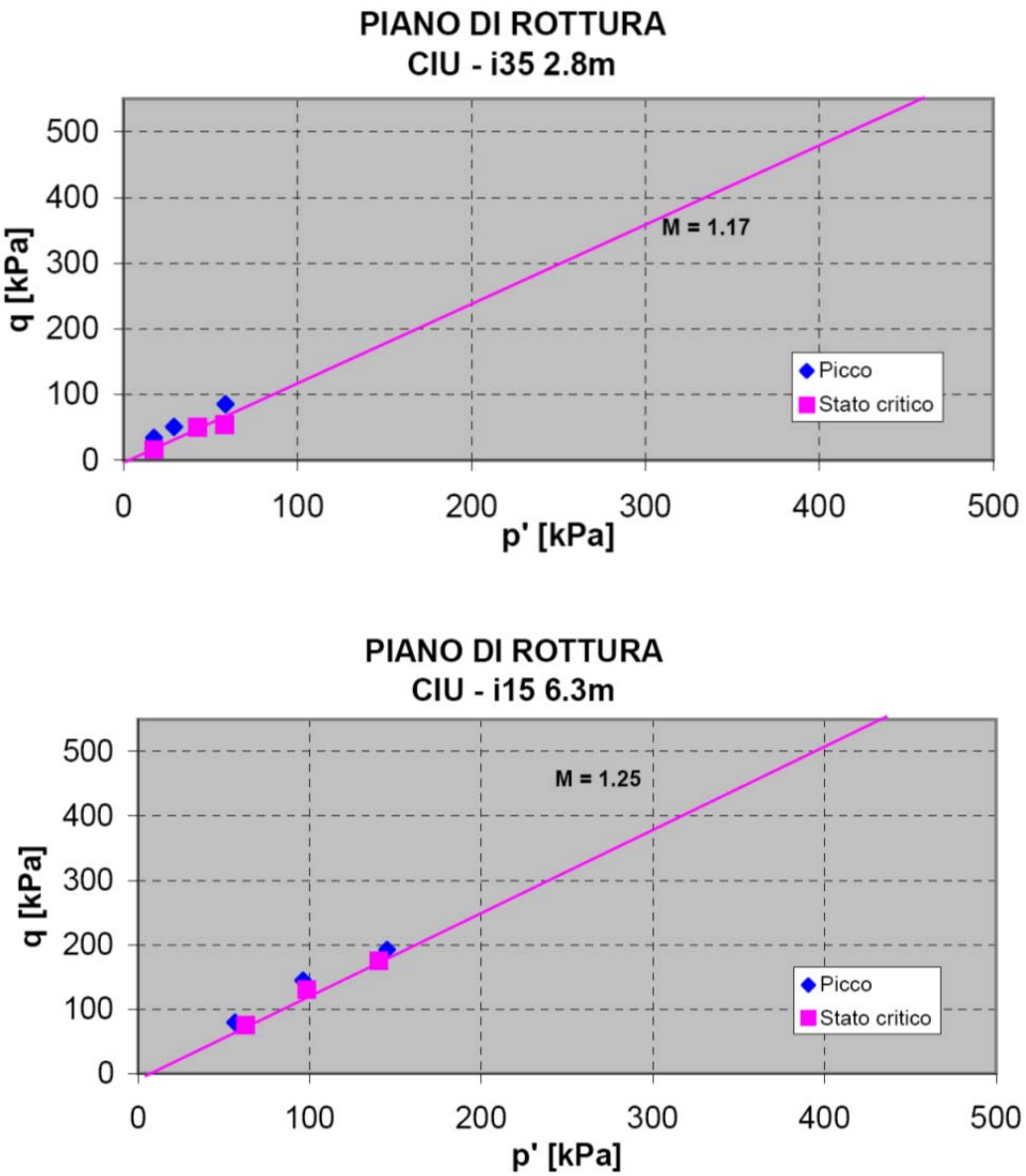


FIG. 9-37 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA I35 2.8 M E I15 6.3 M

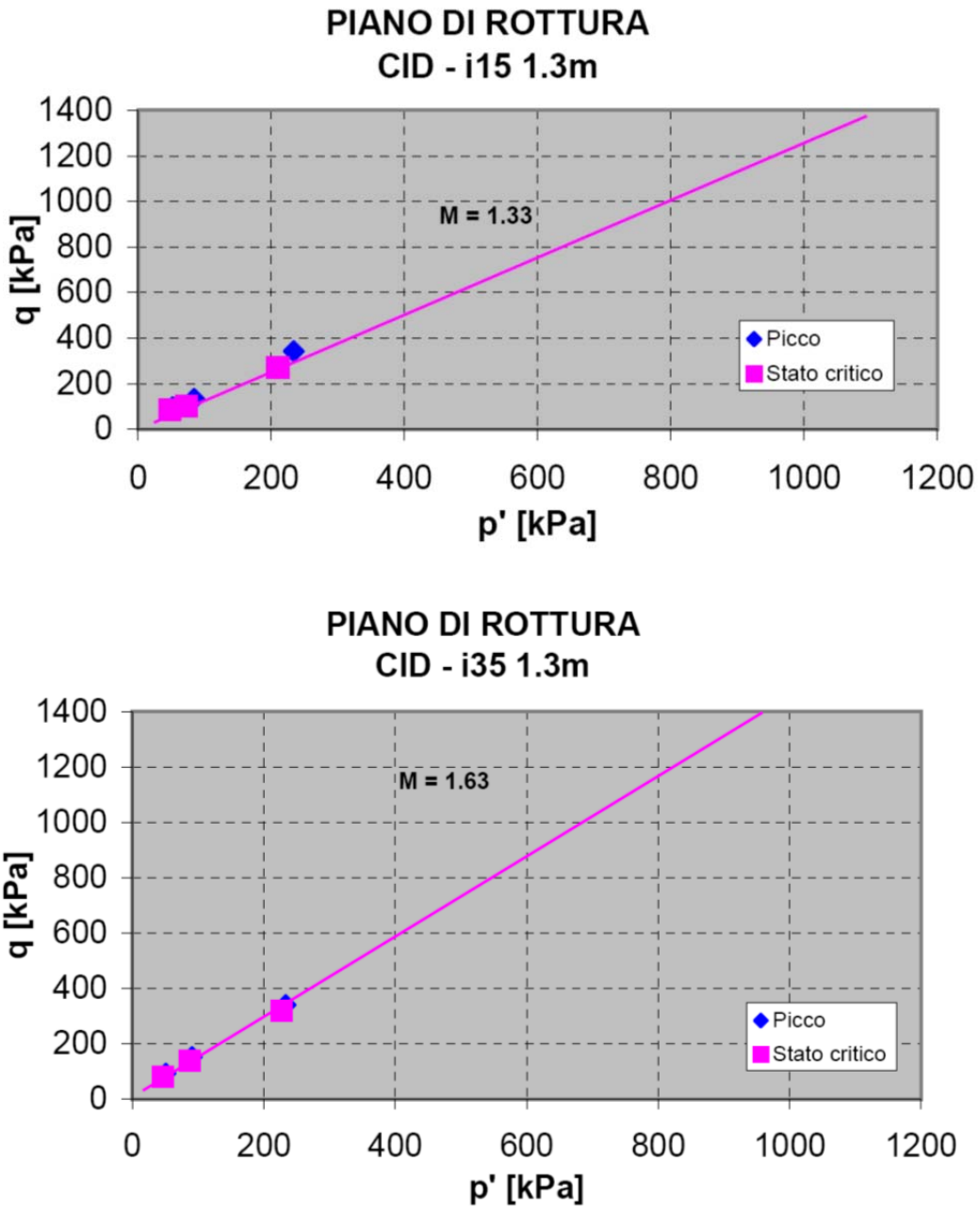


FIG. 9-38 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA I15 1.3 M E I35 1.3M

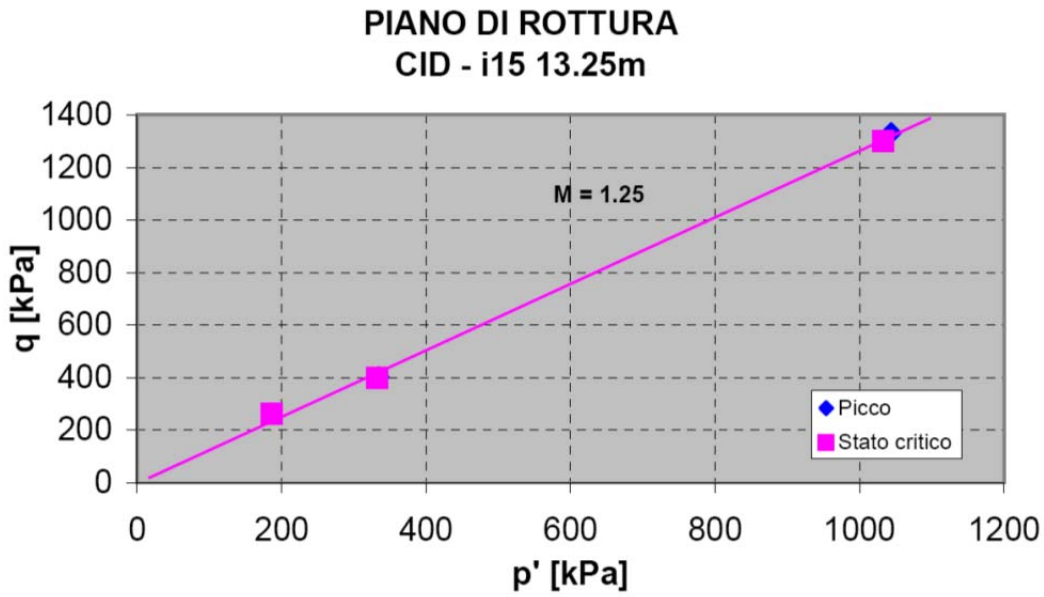


FIG. 9-39 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI - INVILUPPO A ROTTURA I15 13.25 M

9.4.3.3 Resistenza drenata: sintesi dei risultati

Le prove triassiali sono state interpretate al fine di ricavare l'angolo d'attrito dei limi allo stato critico.

Si riepilogano di seguito i valori di Φ_{cs} ricavati dalle varie prove, avendo scartato i valori (pochi) ritenuti più anomali.

TAB. 9-13 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANGOLO D'ATTRITO DALLE PROVE TRIASSIALI

CAMPIONE	Φ_{cs}	LIVELLO
SS110 - 1.25 m	34.5°	L1
SS110 - 2.75 m	33.0°	L1
SS110 - 3.25 m	36.0°	L1
SS110 - 5.05 m	34.2°	L2
SS110 - 6.75 m	30.7°	L2
SS112 - 3.25 m	33.0°	L1
SS112 - 4.25 m	33.9°	L1
SS112 - 5.75 m	35.3°	L2
i/15 - 3.00 m	33.0°	L1
i/15 - 13.25 m	29.7°	SL
i/15 - 5.80 m	31.6°	L2
i/15 - 2.80 m	29.3°	L1
i/35 - 6.30 m	31.0°	L2
S18 - 1.80 m	39.0°	L1
S18 - 4.50 m	33.0°	L1
S18 - 8.50 m	33.0°	L2
S18 - 9.10 m	33.0°	SL
S19 - 2.50 m	33.0°	L1
S19 - 7.00 m	33.0°	L2
S18 - 5.30 m	31.0°	L2
S18 - 10.00 m	35.0°	SL
S20 - 4.70 m	35.0°	L2

Si può pertanto assumere:
$\Phi'_{cs,\,L1} = 33°$
$\Phi'_{cs,\,L2} = 32°$
$\Phi'_{cs,\,SL} = 32°$

9.4.3.4 Resistenza non drenata: sintesi dei risultati

Dalle prove CIU è stato possibile ricavare una stima della coesione non drenata, ed in particolare del rapporto C_u/σ'_{vc}, essendo σ'_{vc} la tensione di consolidazione.

In generale si ha che:

$$\frac{Cu}{\sigma'_{vc}} = S \cdot OCR^{m}$$

dove *S* è il rapporto C_u/σ'_{vc} per OCR = 1, mentre *m* è la pendenza del diagramma (C_u/σ'_{vc}, OCR) in scala bilogaritmica.

Dall'analisi delle prove triassiali si è ricavato:

S = 0.46
m = 0.7.

Si ottiene quindi:

$$\frac{Cu}{\sigma'_{vc}} = 0.46 \cdot OCR^{0.7}.$$

9.4.4. Prove triassiali cicliche

9.4.4.1 Indagini del Progetto Definitivo

Con riferimento alla verticale S19, sono state eseguite 6 prove triassiali cicliche in condizioni anisotrope di cui 3 alla profondità di 16 m l.m.m. e 3 a 21 m l.m.m., rispettivamente in L2 ed SL.

Le prove sono state eseguite consolidando i campioni in maniera anisotropa con un coefficiente K0 = 0.5.

Terminata la fase di consolidazione è stato applicato il carico ciclico in condizioni non drenate misurando l'accumulo di sovrappressione neutra al procedere dei cicli. Il carico ciclico SR è stato compreso tra 0.02 e 0.1, con una frequenza di 2 Hz. I due depositi hanno manifestato comportamenti simili. Andando a definire il rapporto $R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}}$, dove Δu è l'accumulo di sovrappressione neutra al ciclo i-esimo e σ'_{vc} è la tensione di consolidazione, si ottengono i risultati riportati nella seguente tabella.

Campione	SR [-]	σ'_{vc} [kPa]	Δu [kPa]	N [-]	Ru [-]
S19 - CI5 16.2 m l.m.m.	0.02	65	3.5	300	0.053
S19 - CI5 16 m l.m.m.	0.05	65	17	300	0.26
S19 - CI5 16 m l.m.m.	0.10	65	23	300	0.35
S19 - CI12 21 m l.m.m.	0.02	100	5	300	0.05
S19 - CI12 21.3 m l.m.m.	0.045	100	17	300	0.17
S19 - CI12 21.2 m l.m.m.	0.10	99.8	49	300	0.49

Le prove sono state condotte a frequenze che possono considerarsi rappresentative del terremoto di progetto fornendo valori di Ru a 300 cicli non superiori al 50 %. Considerando che il numero di cicli rappresentativi del sisma di progetto per Vado Ligure è pari a 6 si deduce come non vi siano accumuli di pressioni neutre significativi nei terreni indagati.

9.4.4.2 Indagini Progetto Esecutivo

Sono state eseguite 6 prove triassiali cicliche in condizioni anisotrope di cui 3 alla profondità di 6 m dal fondale, quindi in L2, e 3 a 10 m di profondità, quindi in SL. Le prove sono state eseguite consolidando i campioni in maniera anisotropa con un coefficiente k_0 = 0.52. Terminata la fase di consolidazione è stato applicato il carico ciclico in condizioni non drenate, misurando l'accumulo di sovrappressione neutra al procedere dei cicli di carico/scarico. Il carico ciclico applicato SR è stato compreso tra 0.10 e 0.20, con una frequenza di 0.2 Hz.

Le due tipologie di deposito hanno manifestato due comportamenti diversi in queste prove. In particolare L2 ha mostrato un accumulo progressivo di sovrappressioni al procedere dei cicli, mentre SL ha mostrato un accumulo molto basso.

Andando a definire il rapporto $R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}}$, dove Δu è l'accumulo di sovrappressione neutra al ciclo i-esimo e σ'_{vc} è la tensione di consolidazione, si ottengono i risultati riportati nella seguente tabella.

Campione	SR [-]	σ'_{vc} [kPa]	Δu [kPa]	N [-]	Ru [-]
i35 CI3 6m	0.10	21	16	15	0.76
i35 CI3 6m	0.15	21	17	7	0.80
i35 CI3 6m	0.15	100	90	4	0.90
i15 CI6 10m	0.10	35	5	50	0.14
i15 CI6 10m	0.15	38	10	50	0.26
i15 CI6 10m	0.20	39	15	50	0.38

Le prove sono state eseguite a delle frequenze inferiori rispetto a quelle tipiche del terremoto, portando di fatto ad un accumulo di sovrappressione con l'incrementare dei cicli, sicuramente superiore rispetto a quelle che un sisma può indurre. In ogni caso si evidenzia come la sabbia non mostri accumuli di sovrappressioni significativi nemmeno a 50 cicli di carico, mentre i limi si mostrano essere, come del resto già noto, più suscettibili all'accumulo di Δu in cicli di carico non drenati. Si raggiungono comunque valori del parametro Ru maggiori o uguali all'80% a un numero di cicli mediamente superiore a 6, valore del numero di cicli rappresentativo di un sisma di magnitudo 6, come nel caso di Vado Ligure.

Sono state successivamente eseguite ulteriori 9 prove triassiali cicliche in condizioni anisotrope a profondità comprese tra i 3 e i 5 m dal fondale, ossia all'interno di L1.

Le prove sono state eseguite consolidando i campioni in maniera anisotropa con un coefficiente k_0 = 0.5. Terminata la fase di consolidazione è stato applicato il carico ciclico in condizioni non drenate, misurando l'accumulo di sovrappressione

neutra al procedere dei cicli di carico/scarico. Il carico ciclico applicato SR è stato compreso tra 0.10 e 0.30, con una frequenza variabile tra 1.5 e 2 Hz.

Andando a definire il rapporto $R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}}$, dove Δu è l'accumulo di sovrappressione neutra al ciclo i-esimo e σ'_{vc} è la tensione efficace di consolidazione, si ottengono i risultati riportati nella seguente tabella. Si riporta anche il numero di cicli N a cui è riferita la misura del parametro Ru.

Campione	SR [-]	Frequenza [Hz]	σ'_{vc} [kPa]	Δu [kPa]	N [-]	Ru [-]
S102 3.3m	0.10	2.00	100	2	39	0.02
S102 3.3m	0.15	2.00	100	10	50	0.10
S102 3.3m	0.20	2.00	100	6	50	0.06
S102 4.5m	0.10	1.50	350	14	50	0.04
S102 4.6m	0.15	1.50	350	12	50	0.03
S102 4.7m	0.20	1.50	350	15	50	0.04
S102 4.8m	0.10	2.00	700	16	50	0.02
S102 4.9m	0.20	2.00	700	43	50	0.06
S102 5.0m	0.30	2.00	700	130	50	0.18

Le prove sono state eseguite a delle frequenze rappresentative dell'amplificazione data dal terreno di fondazione tipico nella zona di Vado Ligure. In generale in tutti casi si osserva come i provini non arrivino a rottura neanche dopo 50 cicli, indicando una non suscettibilità alla liquefazione, con valori di Ru tra 0.02 e 0.18.

9.4.5. Misura della velocità delle onde di taglio

9.4.5.1 Profilo della velocità delle onde di taglio con la profondità

Si riporta nella seguente Fig. 9-40 l'andamento delle Vs, ricavato dalle CPTU eseguite nel Progetto Preliminare, in aggiunta a quelle ricavate dall'indagine del

Campo Prova area rilevato (Vs eseguite in cella triassiale, Vs misurate con il cono sismico e Vs da prove CPTU).

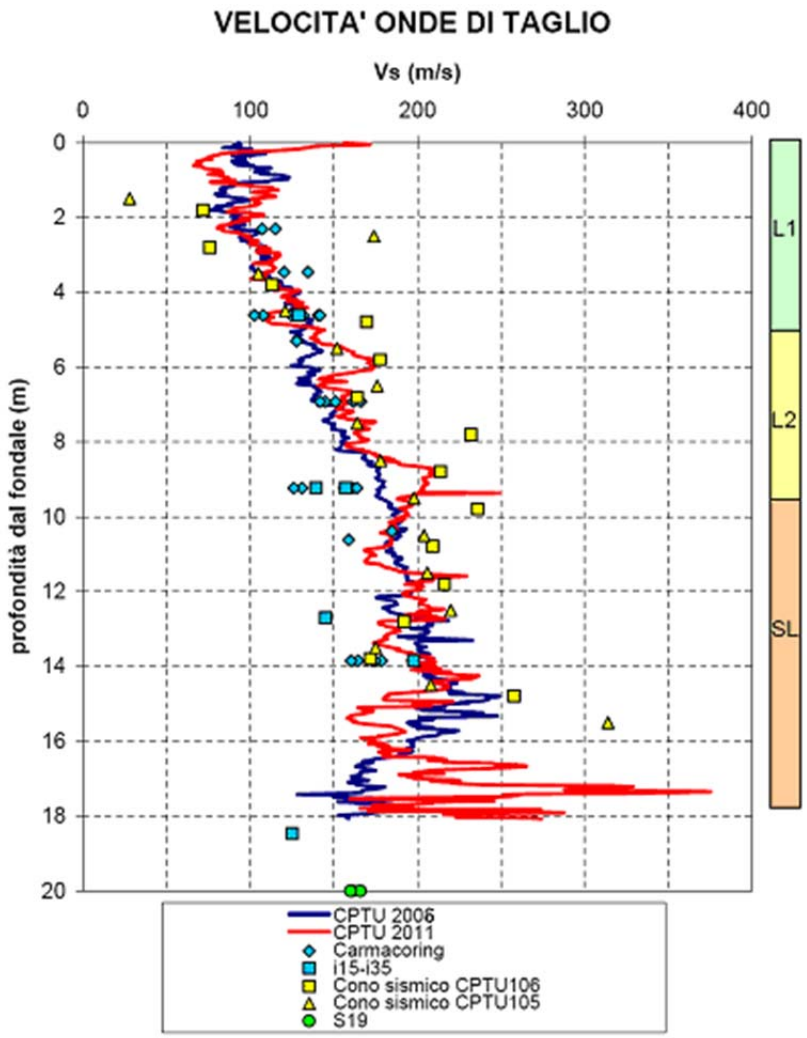


FIG. 9-40 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - MISURA E STIMA DELLE VS

Come si osserva vi è un buon accordo tra tutte le misure della Vs. A 18 metri di profondità si incontra la ghiaia dove le prove penetrometriche vanno a rifiuto e la velocità delle onde di taglio ha un picco.

In generale si può assumere un valore compreso tra i 75 m/s sul fondale e i 175 m/s al letto di L2 fino a 225 m/s al tetto del livello in ghiaia.
Con riferimento ai singoli livelli deposizionali si può considerare:

LIVELLO	**PROFONDITÀ (m dal fondale)**	**Vs (m/s)**
L1	0 - 4	100
L2	4 - 8.5	150
SL	8.5 - 18	200

In termini di media pesata sui 18 metri di spessore si ottiene un valore di V_s pari a:

$$V_s = \frac{100m/s \cdot 4m + 150m/s \cdot 4.5m + 200m/s \cdot 9.5m}{18m} = 165m/s$$

9.4.5.2 Considerazioni sulla qualità del campionamento
In letteratura, molto spesso, si fa riferimento al rapporto tra la velocità delle onde di taglio misurata in laboratorio, $V_{s,lab}$, e quella misurata in situ con, per esempio, cono sismico, V_{SCPTU}, come indicatore del grado di disturbo arrecato al terreno dal campionamento, Landon et al.(2007).
Questo perché la velocità delle onde di taglio è correlata all'indice dei vuoti, allo stato di sforzo efficace e alla struttura del terreno.
Un cambio nel valore di V_s può essere indicativo di due circostanze: (1) cambio dello stato di sforzo da anisotropo in situ a isotropo dopo campionamento; (2) cambi irreversibili nella struttura dello scheletro solido. Non c'è nessun metodo, ovviamente, per scorporare i due effetti, infatti l'effetto (1) sarà sempre e comunque presente anche nel caso di perfetto campionamento per il semplice fatto di aver prelevato il campione.
Ad ogni modo un'indicazione della qualità dei campioni è certamente ricavabile dall'esame del rapporto $V_{s,lab}/V_{SCPTU}$.
Per quanto sopra detto e dal confronto tra sito e laboratorio in occasione del Campo Prova area rilevato riportato nella Fig. 9-40, si evince come in quel caso il

buon riscontro tra valori in laboratorio ed in situ sia testimone di un campionamento efficace, che ha ridotto al minimo il disturbo sul terreno. I campioni di laboratorio sono quindi di ottima qualità e di conseguenza anche le considerazioni che derivano dall'interpretazione delle prove di laboratorio sono effettivamente rappresentative dello stato dei terreni in sito.

9.4.6. Deformabilità dei terreni

9.4.6.1 Definizione del profilo di modulo elastico con la profondità

Dal profilo delle velocità delle onde di taglio è possibile ricavare l'andamento del modulo elastico di taglio alle piccole deformazioni, G_{max}.

In particolare:

$G_{max} = \gamma/g \, V_s^2$

Essendo γ il peso di volume del terreno e *g* l'accelerazione di gravità. Il profilo di G_{max} che si ricava è di seguito riportato, vd. Fig. 9-41.

In laboratorio sono state eseguite prove in colonna risonante che permettono di valutare il decadimento del modulo elastico con la deformazione di taglio applicata.

Il risultato di tali prove è riportato nella Fig. 9-42. Segue che il modulo elastico corrispondente al livello deformazionale indotto nel terreno dalle opere è ricavabile a partire dal valore di G_{max} ridotto per il coefficiente di decadimento ricavabile dal laboratorio, ξ.

$G = G_{max} \, \xi.$

Ovviamente si tiene conto che il grado di mobilitazione per i limi sarà superiore di quello delle sabbie e quindi il valore di G_{max} per L1 ed L2 viene maggiormente abbattuto rispetto a quello di SL.

Dal valore del modulo G è possibile ricavare poi l'andamento del modulo elastico E secondo la relazione:

$E = G * 2 * (1+\nu)$

Vedasi pertanto l'andamento riportato in Fig. 9-43.

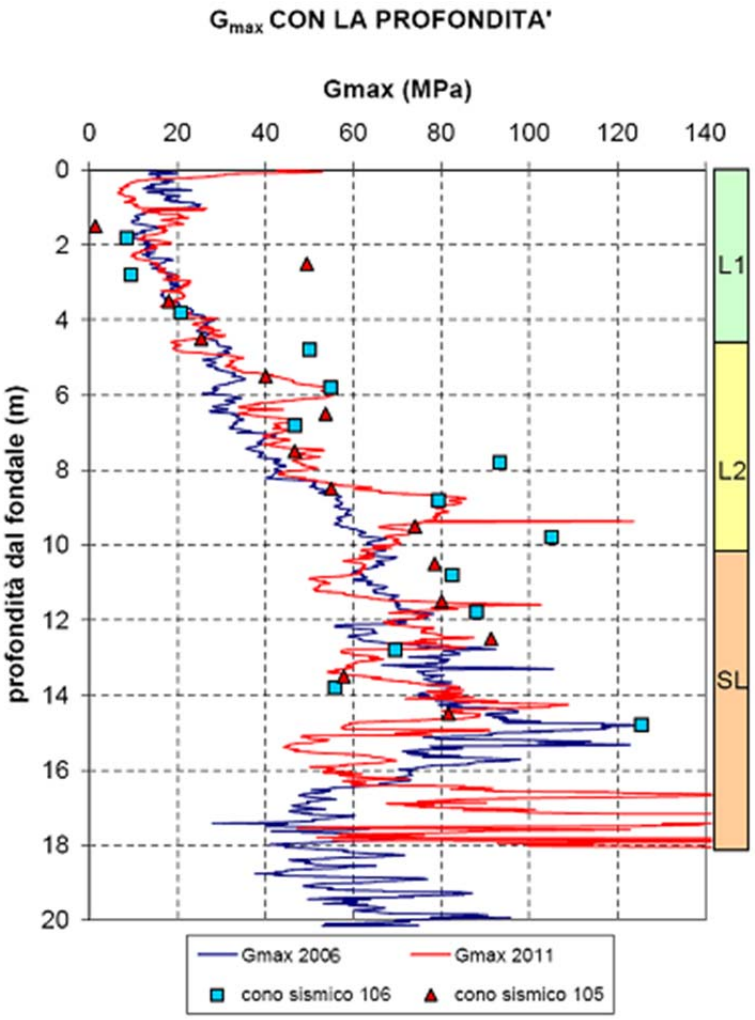


FIG. 9-41 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PROFILO DI G_{MAX} CON LA PROFONDITÀ

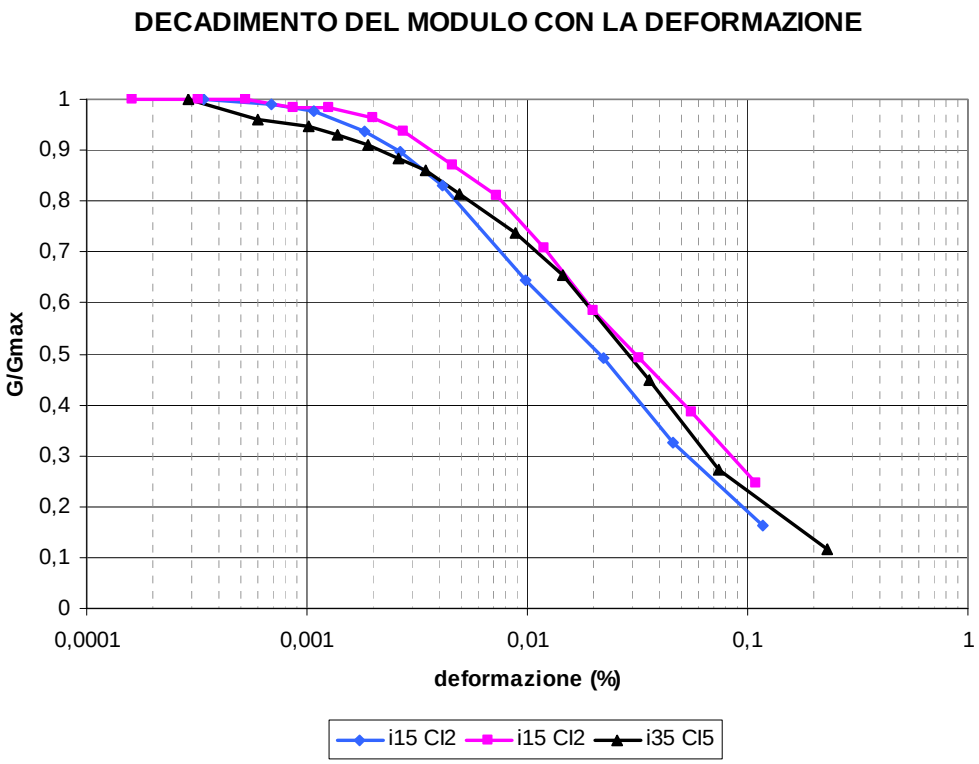


FIG. 9-42 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - DECADIMENTO DEL MODULO CON LA DEFORMAZIONE

Il valore di modulo elastico così ottenuto viene confrontato con quello calcolato dalle prove penetrometriche statiche sfruttando le correlazioni riportate al paragrafo 8.1.1.

Il confronto è riportato nella figura che segue Fig. 9-44.

Come si vede vi è un ottimo accordo tra i valori ricavati con le due diverse metodologie che pertanto si validano a vicenda. Il salto che si osserva nel caso di moduli ricavati dalle Vs in corrispondenza del tetto di SL è dovuto all'aver assunto un diverso grado di mobilitazione del terreno da quel punto in poi, mentre le CPTU raccordano meglio i valori di modulo di L2 con quelli di SL.

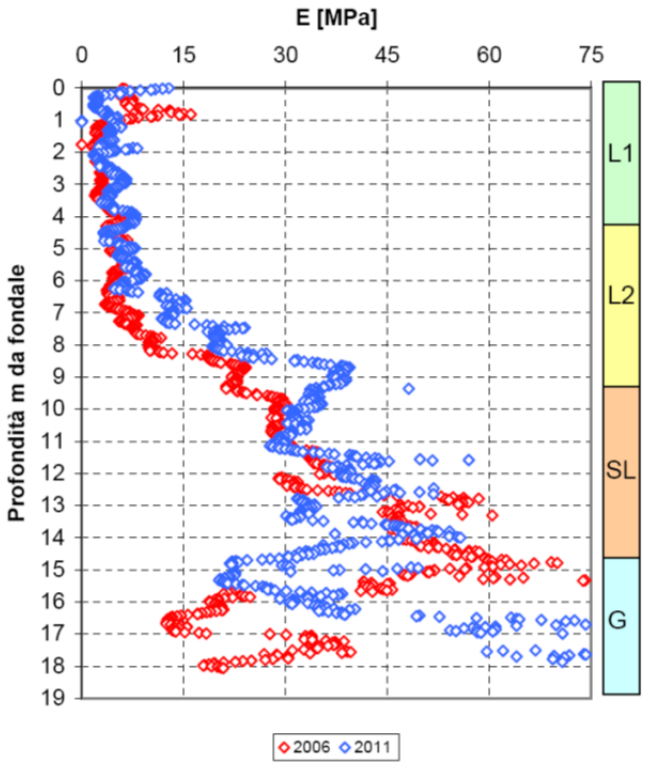
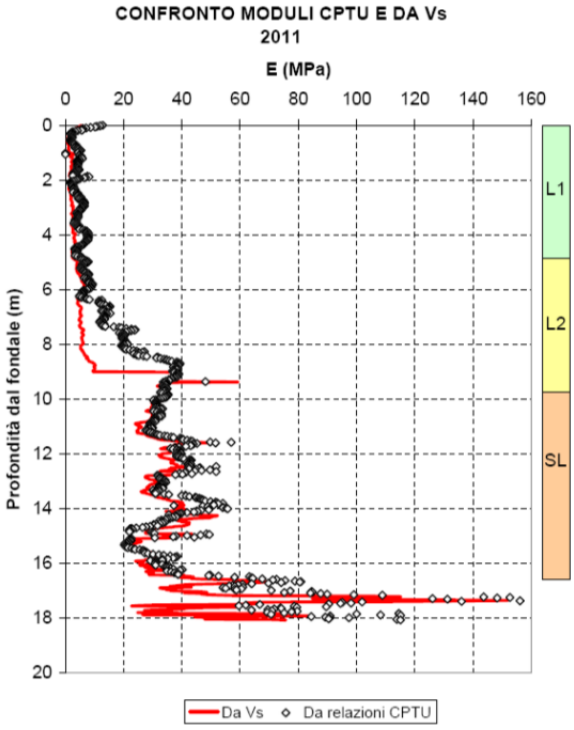


FIG. 9-43 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DEL MODULO ELASTICO E CON LA PROFONDITÀ



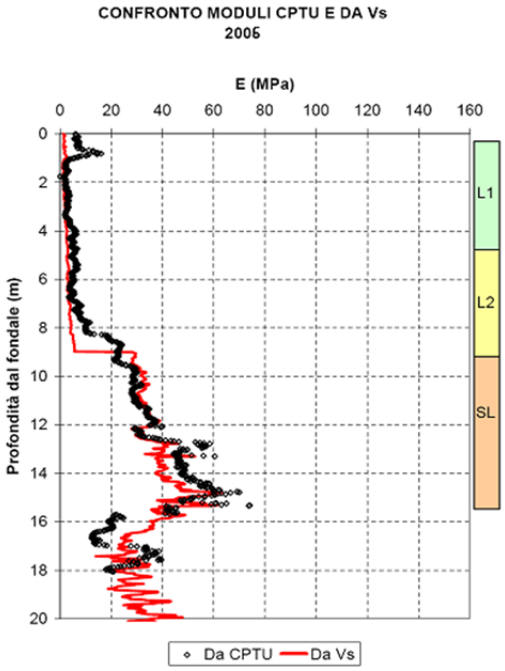


FIG. 9-44 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DEL MODULO ELASTICO E CON LA PROFONDITÀ - CONFRONTO TRA I VALORI DA CPTU E I VALORI DA VS

9.4.6.2 Rapporto tra modulo di scarico e modulo vergine

Le Fig. 9-45 e la Fig. 9-46 mostrano il bulk modulus ottenuto dalle prove di compressione triassiale isotropa nel tratto in carico vergine e nel tratto in scarico/ricarico al variare dello stato tensionale.

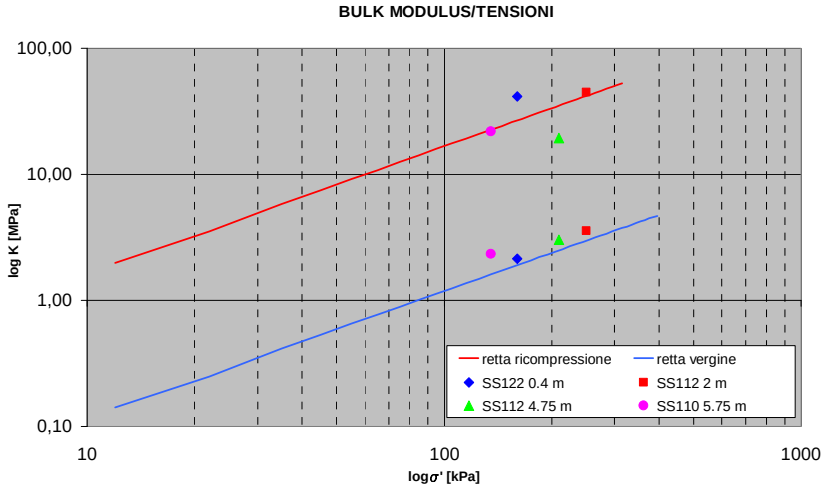


FIG. 9-45 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CONSOLIDAZIONE IN CELLA TRIASSIALE - BULK MODULUS CON LE TENSIONI - SS110 SS112

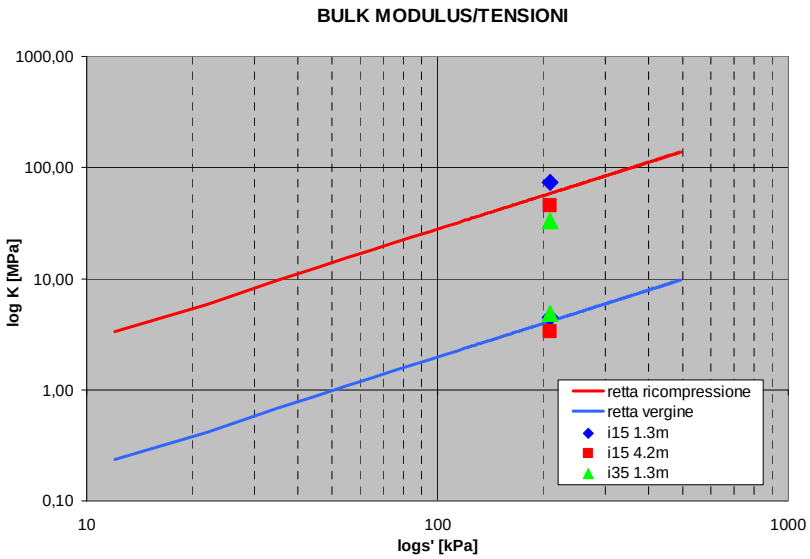


FIG. 9-46 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE DI CONSOLIDAZIONE IN CELLA TRIASSIALE -BULK MODULUS CON LE TENSIONI - I15 I35

Le rette rossa e blu rappresentano l'andamento del bulk modulus sulla base dei valori medi di CR ed RR ricavati dalle prove edometriche, il cui rapporto è pari a 15. Tale rapporto si è infatti ricavato dalle prove edometriche eseguite nelle varie campagne di indagine, vedasi Fig. 9-38.

Come si osserva vi è un buon accordo tra l'andamento previsto dalle rette ed i valori sperimentali misurati, confermando anche per le prove triassiali la stessa legge di variazione del modulo con gli sforzi efficaci ricavabile dalle prove edometriche, nonché confermando anche il rapporto tra modulo di carico e scarico pari a 15.

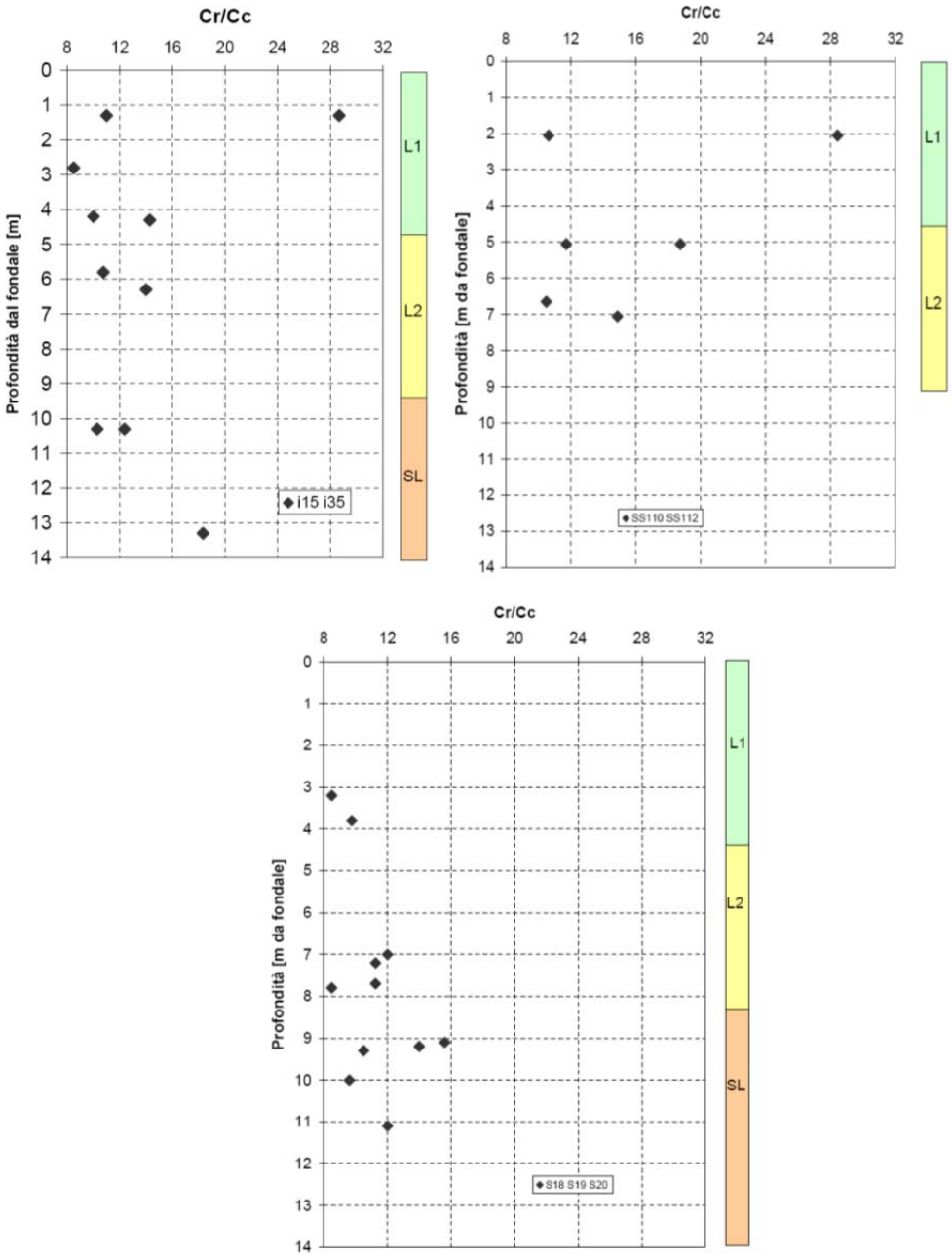


FIG. 9-47 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - RAPPORTO TRA CC E CR DALLE PROVE DI LABORATORIO

Sono inoltre state eseguite 3 diverse prove triassiali in condizioni k_0. La prima è stata portata a rottura, così da poter definire il valore del deviatorico a rottura, Fig. 9-48.

La seconda e la terza sono poi state portate a circa l'80% della rottura e a quel punto scaricate.

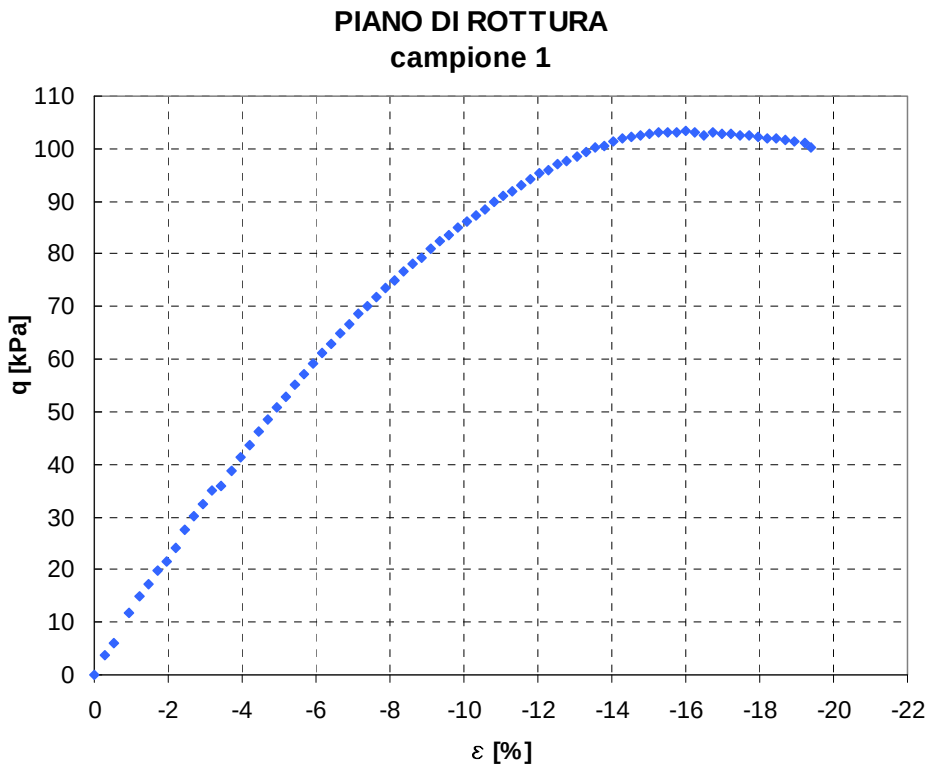


FIG. 9-48 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI IN CONDIZIONI K_0 - CAMPIONE 1 - PIANO DI ROTTURA

Di queste due la prima, come evidenziato dalla sua rappresentazione nel piano di compressione, Fig. 9-49, mostra già un inizio di rottura, avendo infatti iniziato a dilatare prima dell'inizio dello scarico, per questo motivo non viene presa in considerazione.

Il terzo provino invece, mostra dei risultati migliori, vedasi Fig. 9-50. Il provino infatti contrae per tutta la fase di carico.

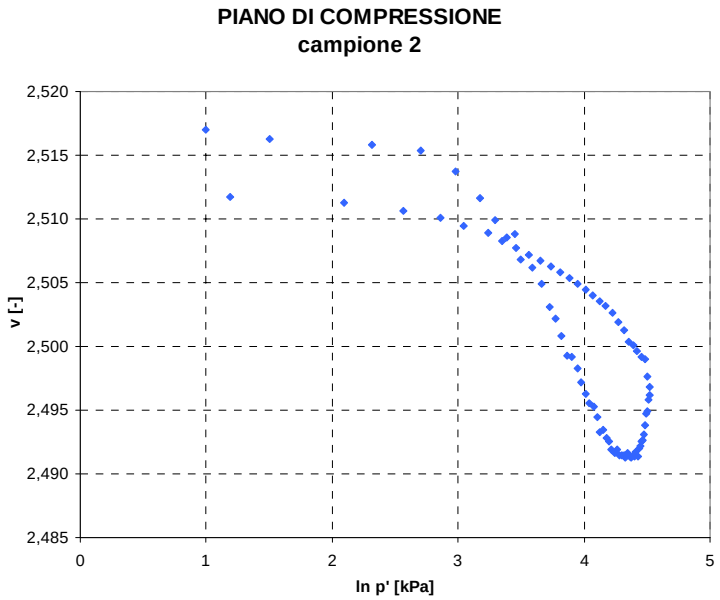


FIG. 9-49 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI IN CONDIZIONI K_0 - CAMPIONE 2 - PIANO DI COMPRESSIONE

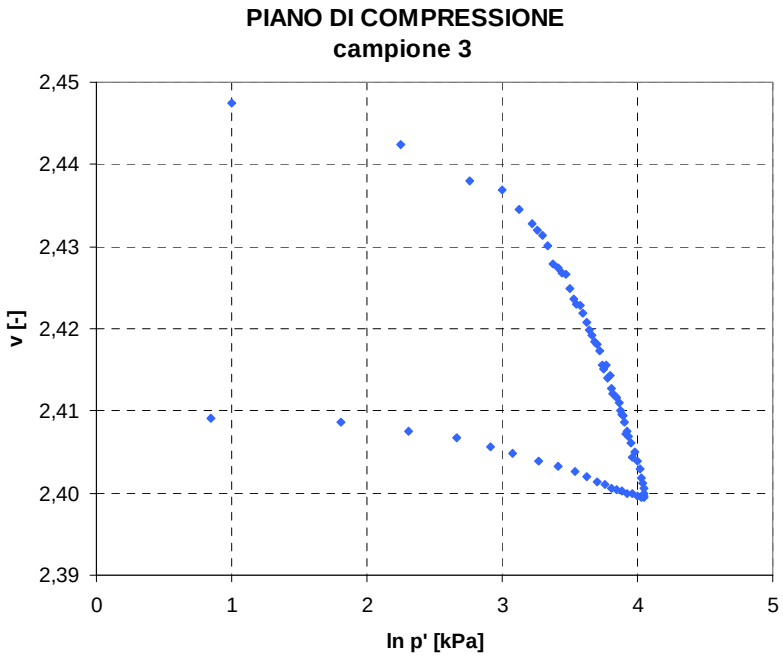


FIG. 9-50 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PROVE TRIASSIALI IN CONDIZIONI K_0 - CAMPIONE 3 - PIANO DI COMPRESSIONE

E' possibile pertanto, con riferimento al campione 3, prelevato a 2 m di profondità dal fondale, valutare le pendenze in carico vergine e in scarico, tenendo in considerazione la presenza di una tensione di preconsolidazione. Il rapporto che si ottiene tra le due pendenze risulta pari a 17, in linea quindi con il valore di 15 ricavato con le precedenti prove.

In conclusione quindi si adotta, tanto per L1 che per L2, un valore del rapporto tra moduli di ricarico e moduli vergini pari a 15.

9.4.7. Stima della permeabilità

La stima della permeabilità dei terreni di fondazione avviene dall'interpretazione delle seguenti prove:

- Permeabilità verticale:
  - Prove edometriche;
  - Permeabilità in cella triassiale.
- Permeabilità orizzontale:
  - Prove di dissipazione.

La permeabilità è tra i parametri più difficili da misurare per tanto in questo capitolo si parla di "stima" piuttosto che di "misura" della permeabilità.
Si riportano, nella Fig. 9-51 che segue, i valori di permeabilità K_v e K_h ricavati dalle prove eseguite e prima elencate.
La permeabilità verticale è dell'ordine di $K_v = 6x10^{-9}$ m/s per L1, $K_v= 5x10^{-9}$ m/s per L2, mentre è di $K_v = 8x10^{-9}$ m/s per SL.
La permeabilità orizzontale risulta superiore a quella verticale ed è pari a $K_h = 3x10^{-8}$ m/s per L1 ed L2 e $K_h= 2x10^{-8}$ m/s per SL.
Il rapporto tra le permeabilità è $K_h/K_v = 5$ per L1, 6 per L2 e 2.5 per SL.

LIVELLO	K_v (m/s)	K_h (m/s)
L1	$6x10^{-9}$	$3x10^{-8}$
L2	$5x10^{-9}$	$3x10^{-8}$
SL	$8x10^{-9}$	$2x10^{-8}$

Il valore di permeabilità ottenuto per SL non appare essere rappresentativo della natura dello strato, probabilmente il campione provato in laboratorio ha una componente fine elevata e conseguentemente una permeabilità più bassa.
Dalle prove di dissipazione è stato inoltre possibile ricavare il coefficiente di consolidazione dei terreni che è risultato essere $5x10^{-6}$ per L1 e $2x10^{-5}$ per L2.

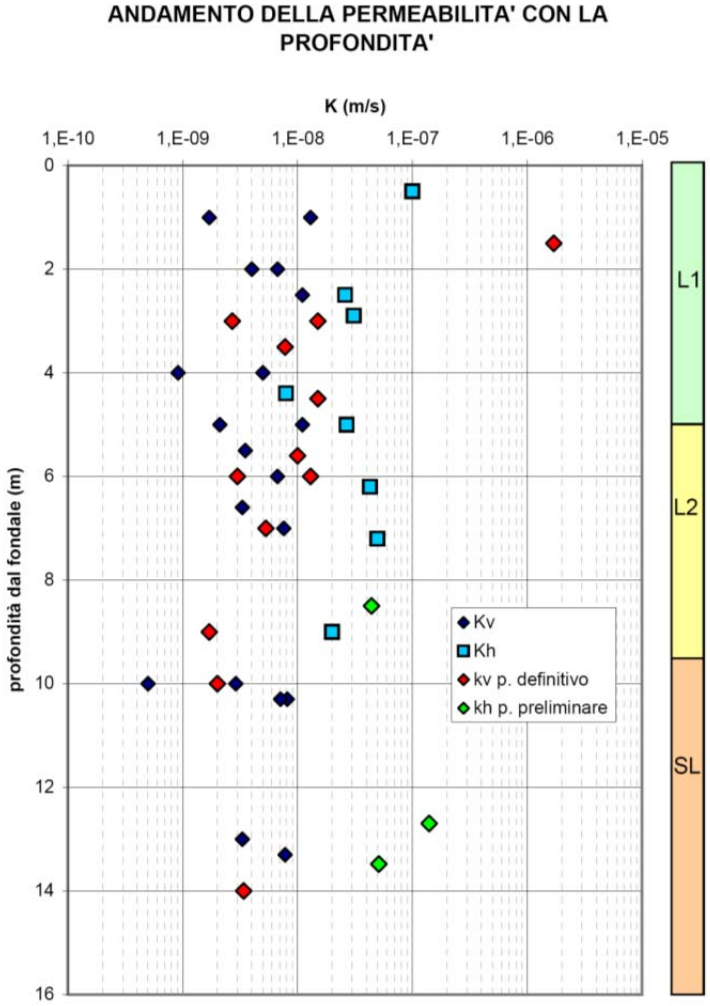


FIG. 9-51 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - ANDAMENTO DELLA PERMEABILITÀ CON LA PROFONDITÀ

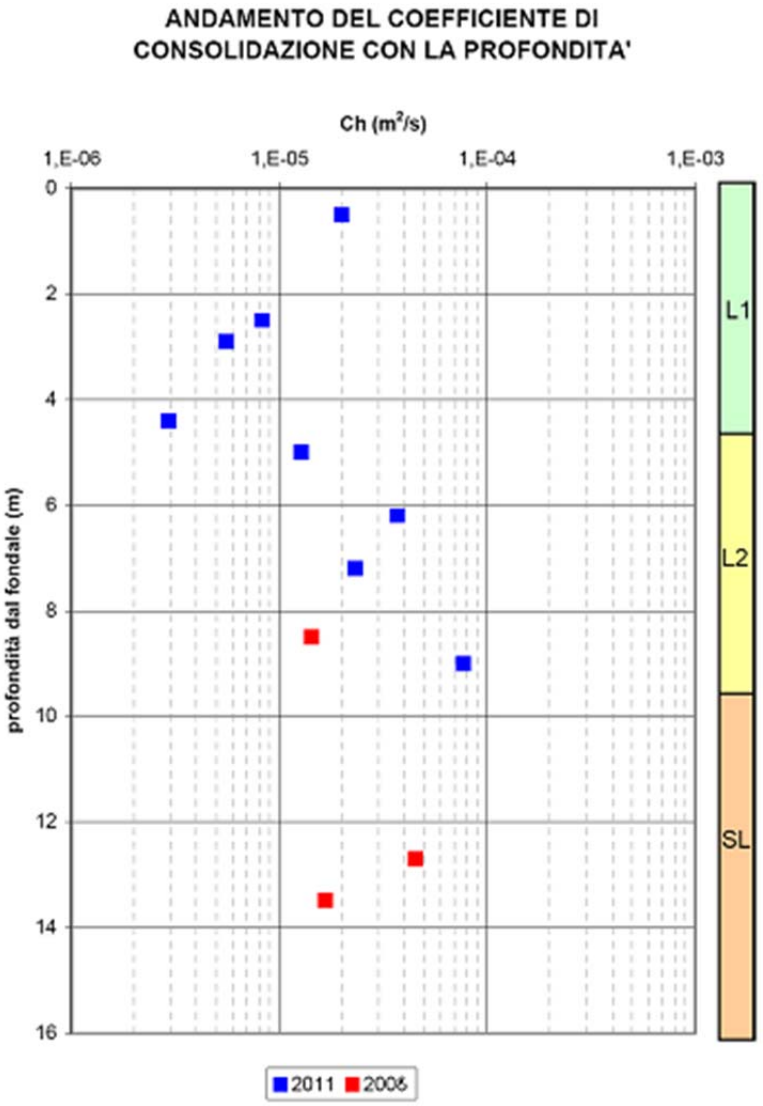


FIG. 9-52 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - MISURA DEL COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE DALLE PROVE CPTU

9.5. Argilla di base

Le prove di laboratorio che hanno permesso la caratterizzazione dell'argilla pliocenica di base sono quelle relative ai campioni prelevati durante la campagna di indagine del Progetto Preliminare.

Tali indagini hanno permesso la classificazione del materiale, individuandone le caratteristiche granulometriche, peso di volume, contenuto d'acqua ed indice dei vuoti. Se ne sono poi potute valutare resistenza e compressibilità.

9.5.1. Classificazioni

In Fig. 9-53 si riporta la granulometria che indica un limo con argilla. Il contenuto d'acqua risulta nell'ordine del 35 %, molto prossimo ad LP, indicando una pre-consolidazione dello strato.

Posizionando le misure sulla carta di plasticità di Fig. 9-54 si osserva come questi si dispongano all'incirca lungo la retta A, tra le argilla inorganiche di media-bassa plasticità ed i limi inorganici.

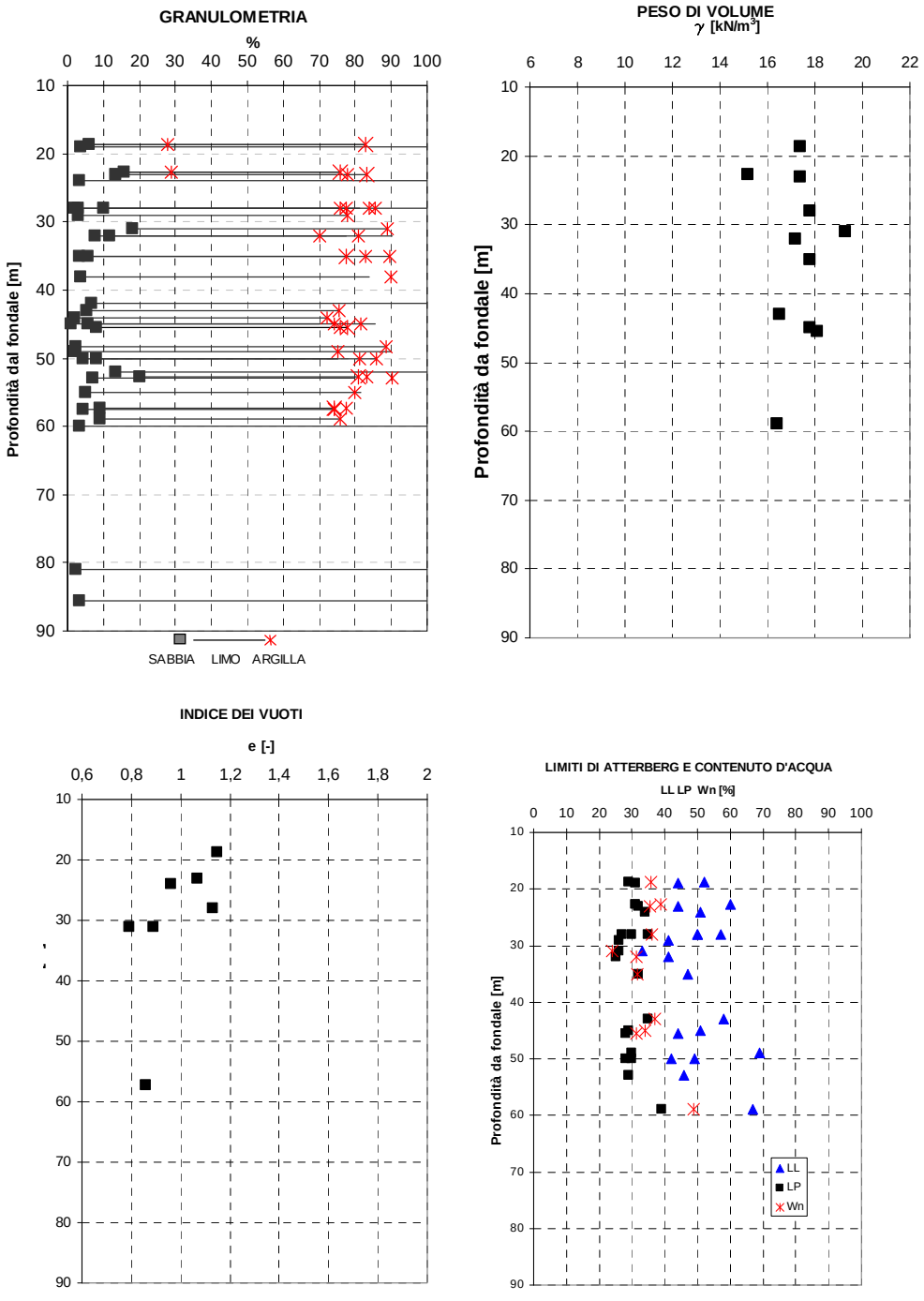


FIG. 9-53 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - RISULTATI PROVE DI CLASSIFICAZIONE ARGILLA PLIOCENICA

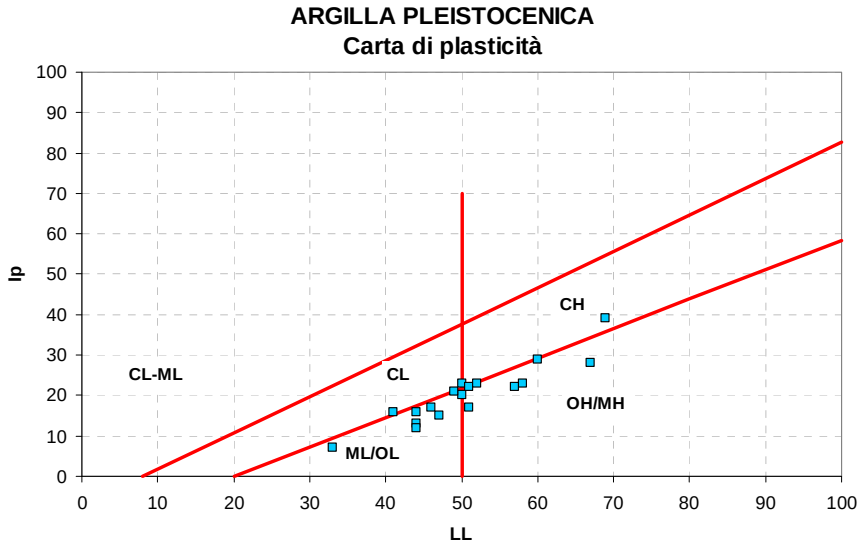


FIG. 9-54 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CARTA DI PLASTICITÀ ARGILLA PLIOCENICA

9.5.2. Resistenza e compressibilità

Interpretando i risultati delle prove edometriche si è potuto valutare l'OCR, Fig. 9-55, che risulta superiore a 3. Da queste poi si è valuta la compressibilità in termini di CR ed RR, che risultano rispettivamente 0.25 e 0.025.

In termini di permeabilità si osserva invece un coefficiente di consolidazione dell'ordine di 2E-6 m^2/s, cui corrisponde una permeabilità di 1E-9 m/s.

Per quanto concerna la resistenza, Fig. 9-56, si ottiene una resistenza drenata di 27°, ed una Cu di 200 kPa.

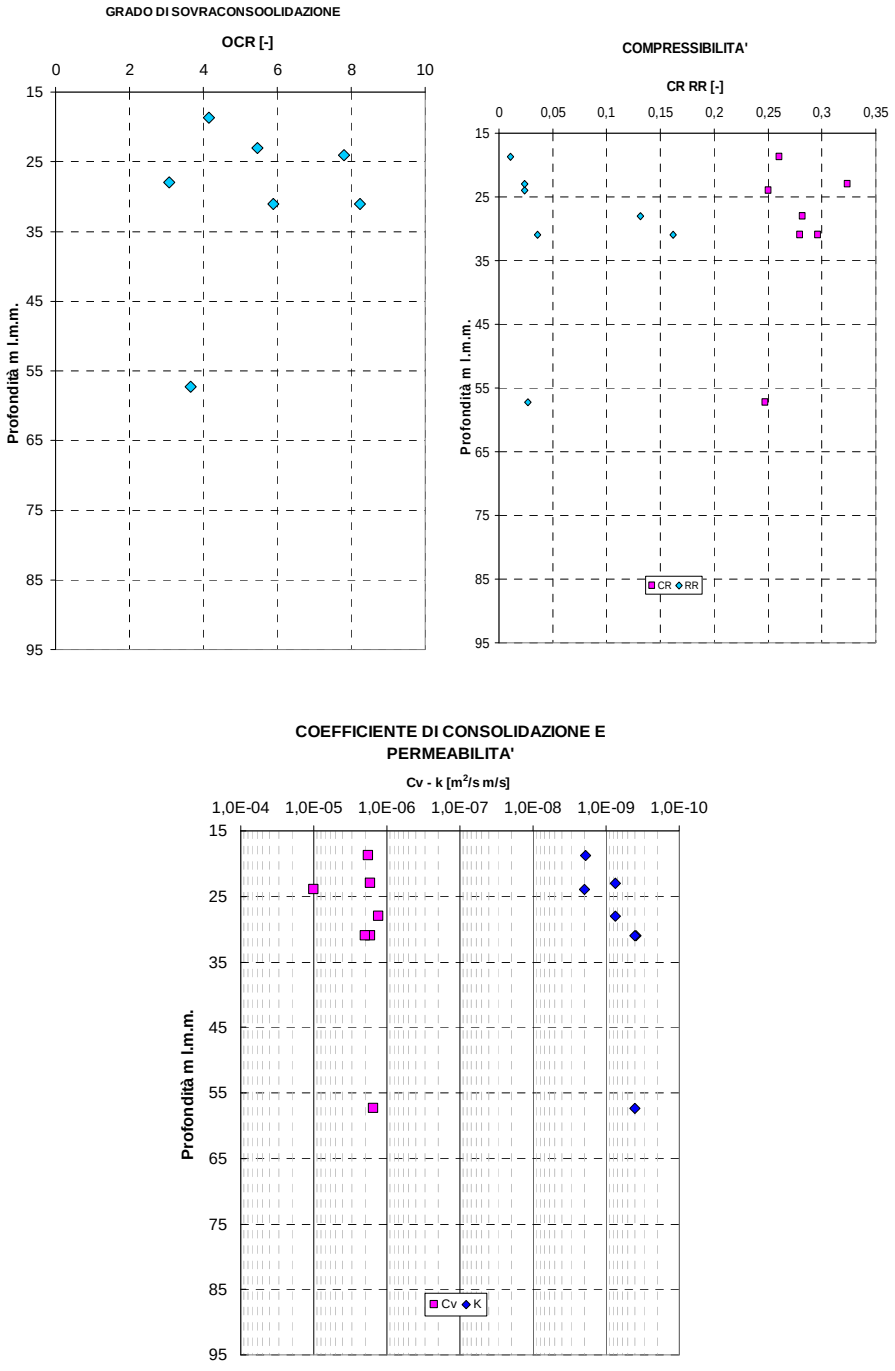


FIG. 9-55 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE -OCR E COMPRESSIBILITÀ ARGILLA PLIOCENICA

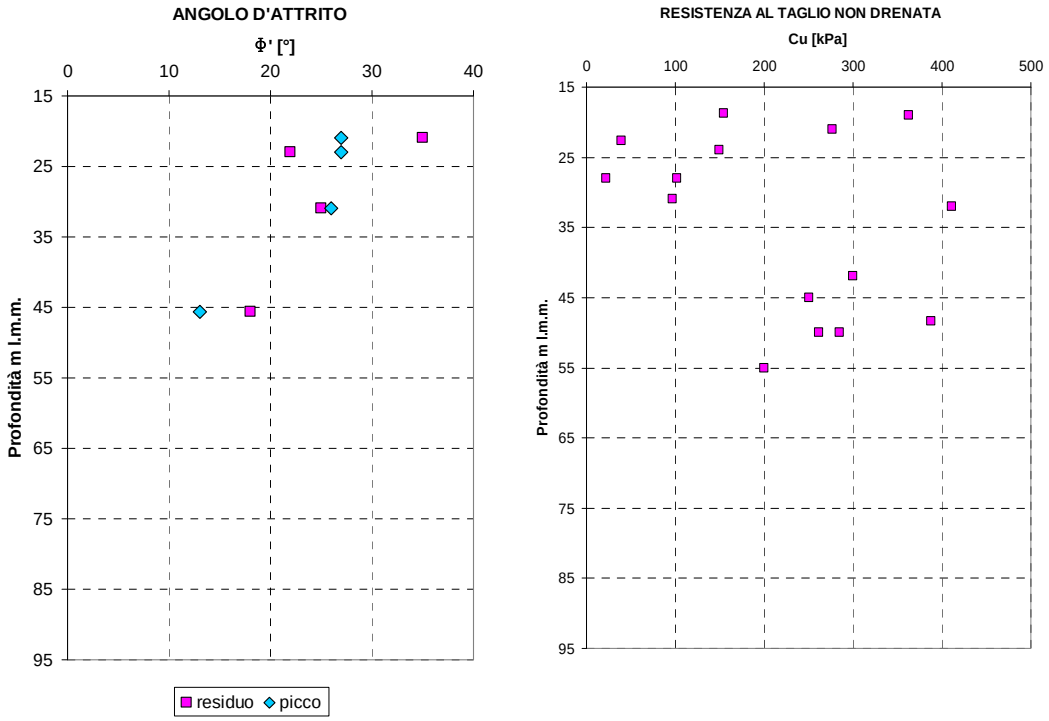


FIG. 9-56 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - RESISTENZA ARGILLA PLIOCENICA

9.6. Nuova diga foranea

Nell'ambito della nuova diga foranea sono state eseguite delle indagini nel 2014 che hanno fornito alcuni campioni, che sono stati testati in laboratorio tramite prove di classificazione. I risultati di tali analisi si riportano nel seguito.

In particolare la Fig. 9.57 mostra i risultati delle granulometrie delle indagini lungo l'asse della futura diga. Queste interessano soltanto i primi 3 m da fondale, confermando la presenza di L1, ossia di uno strato di limo sabbioso, con una percentuale di sabbia di cica il 20 %, che tende ad incrementarsi con la profondità a circa il 30%.

I sondaggi S1 ed S2 attraverso la diga esistente mostrano invece una maggiore presenza di sabbia fin dai primi metri ed un rapido incremento della componente

ghiaiosa a partire da 5 m dal fondale naturale. Questo è in accordo con le stratigrafie che mostrano come lo strato di ghiaia G sia piuttosto superficiale.

Per quanto concerne i Limiti di Atterberg, nei campioni superficiali in L1, Fig. 9.59, si osserva un indice plastico tra 15 e 18, con valori di contenuto d'acqua uguali o superiori al limite liquido, confermando la natura molto sciolta dello strato di limo superficiale.

I campioni nei sondaggi S1 ed S2, Fig. 9.60, mostrano invece valori di indice plastico molto bassi, così come i valori di contenuto d'acqua. Questo perché tali campioni sono più profondi, all'interno degli strati sabbioso/ghiaiosi. I valori non del tutto nulli di indice plastico sono comunque relativi all'aliquota più fine, sempre comunque presente anche negli strati più grossolani.

Per tutti i metri più superficiali si osserva un peso specifico dei grani di circa 2.77, molto simile a quanto già osservato nell'area della Piastra, Fig. 9.61.

Questi risultati sono pressochè in accordo che quelli ottenuti dalle indagini della Piastra.

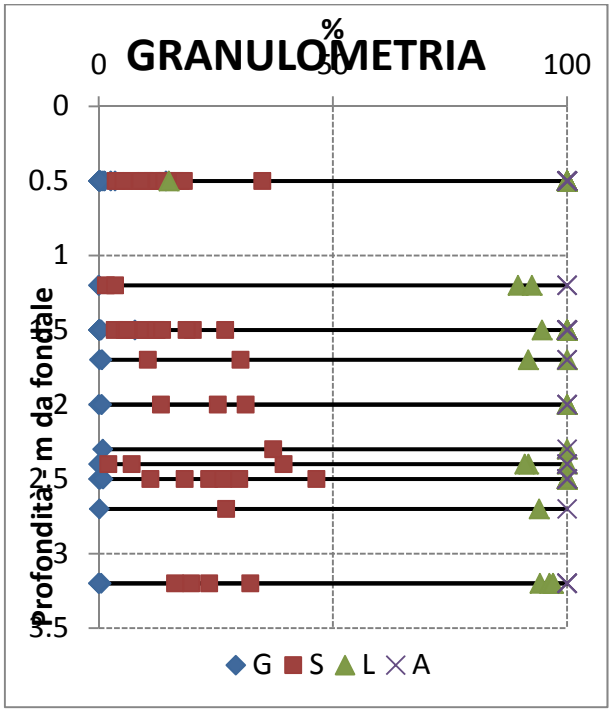


FIG. 9.57 - VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – INDAGINI DIGA FORANEA - GRANULOMETRIA VIBROCORE

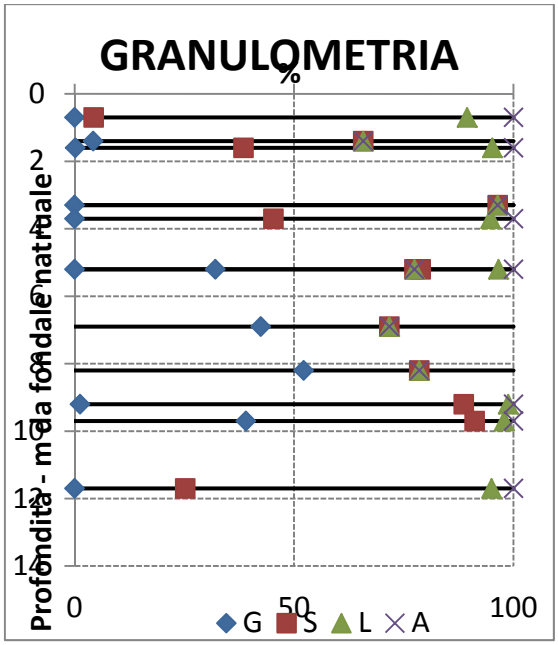


FIG. 9.58 - VADO LIGURE – NUOVA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – INDAGINI DIGA FORANEA – GRANULOMETRIA S1 S2

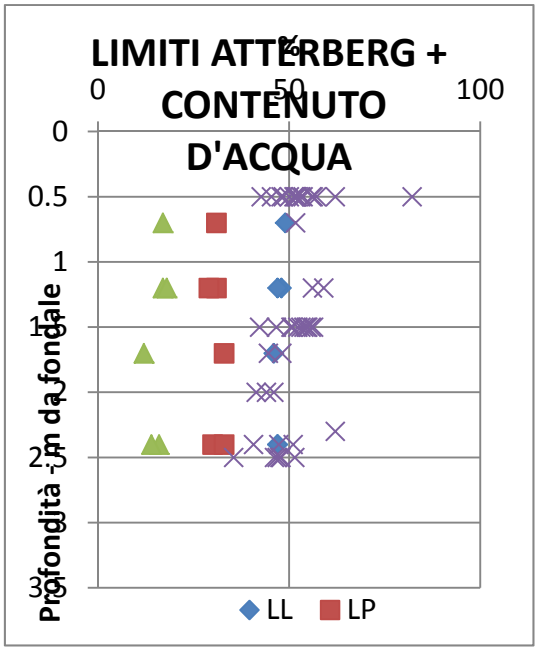


FIG. 9.59 - VADO LIGURE – NUOVA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – INDAGINI DIGA FORANEA – LIMITI ATTERBERG E CONTENUTO D'ACQUA VIBROCORE

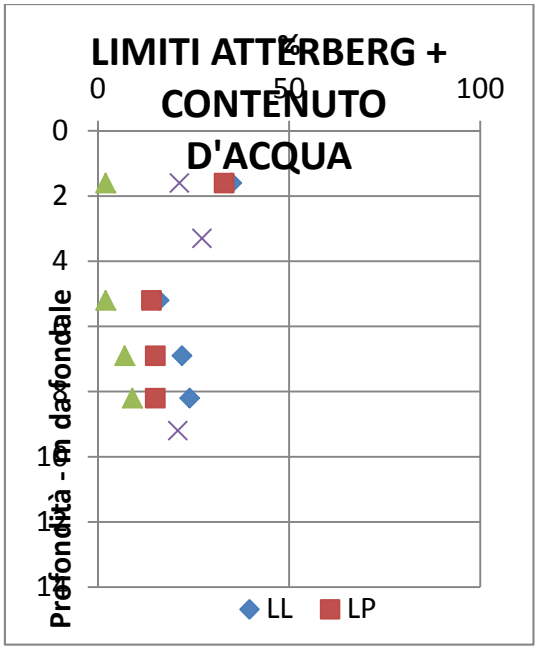


FIG. 9.60 - VADO LIGURE – NUOVA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – INDAGINI DIGA FORANEA – LIMITI ATTERBERG E CONTENUTO D'ACQUA S1 S2

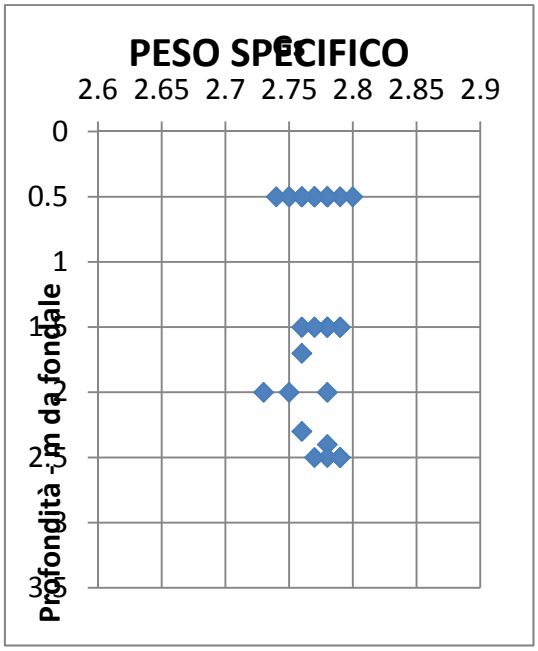


FIG. 9.61 - VADO LIGURE – NUOVA NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – INDAGINI DIGA FORANEA – PESO SPECIFICO DEI GRANI

10. TEORIA DELLO STATO CRITICO: APPLICAZIONE AL CASO IN ESAME

Tanto sui campioni Carmacoring quanto su quelli provenienti dai sondaggi i/15 ed i/35 sono state condotte:

- Prove triassiali consolidate isotropicamente e portate a rottura in condizioni drenate: CID;
- Prove triassiali consolidate isotropicamente e portate a rottura in condizioni non drenate: CIU;
- Prove di compressione in cella triassiale in condizioni di compressione isotropa.

Si cerca di inquadrare il comportamento del terreno all'interno della teoria dello stato critico, in particolare quindi le prove tipo a) sono utilizzate nel seguito per ricavare la CSL (Critical State Line), le prove tipo b) vengono invece utilizzate per ricavare la SSL (Steady State Line) e le prove tipo c) infine vengono utilizzate per ricavare la NCL (Normal Consolidation Line).

La Fig. 10-1 mostra appunto l'interpretazione di tali prove in termini di definizione delle linee CSL e SSL. Per entrambe si riporta sul grafico l'equazione che le definisce.

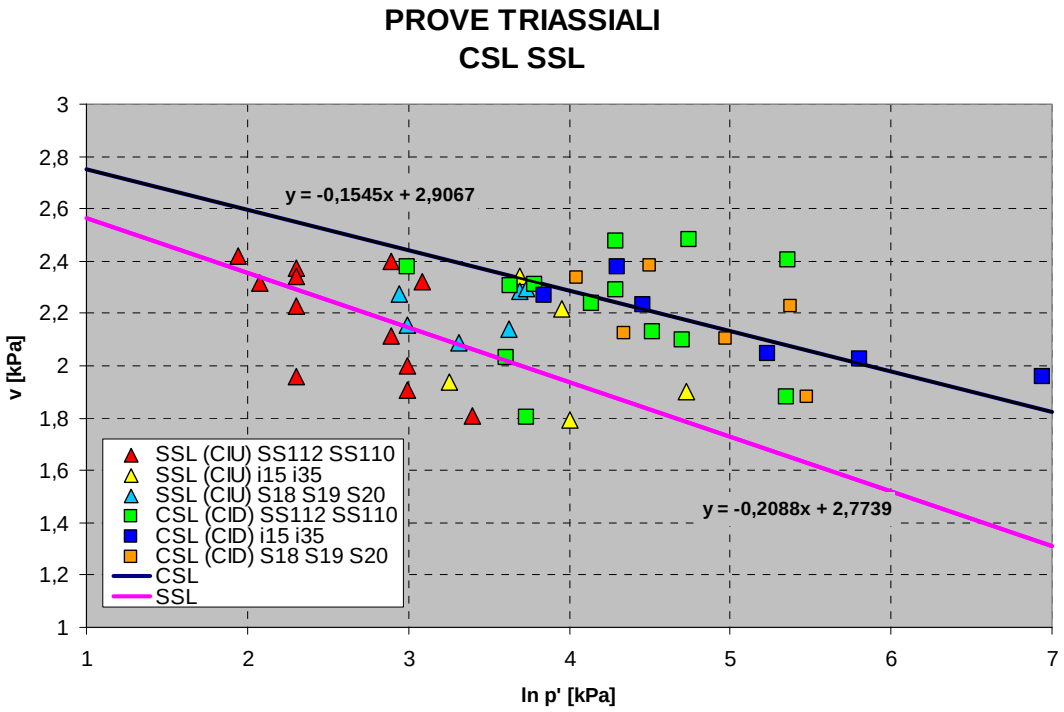


FIG. 10-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - LINEE CSL ED SSL DALLE PROVE TRIASSIALI

Le Fig. 10-2 e Fig. 10-3 che seguono mostrano invece i risultati delle tipo c). Queste sono state diagrammate sul piano di compressione, evidenziando per ciascuna sia il contenuto fine che l'indice di plasticità. Con una linea nera si riporta poi la NCL o URL definita da ciascuna.

Dall'analisi della Fig. 10-2 si possono fare le seguenti osservazioni:

1. Non è possibile individuare un'unica NCL;
2. Le NCL sono tra loro parallele ed hanno circa la stessa pendenza della CSL;
3. A parità di contenuto fine (FC) si osserva che la NCL scende di intercetta all'aumentare dell'indice di plasticità (IP);
4. A parità di IP la NCL riferita ad un contenuto fine minore è più alta di quella riferita ad un contenuto fine maggiore;
5. Per IP > 4 la NCL è sotto la CSL, quindi il terreno allo stato critico ha comportamento dilatante. La dilatanza tuttavia non è rappresentativa di una sovraconsolidazione, in quanto il terreno non si trova su una linea di scarico-

ricarico (URL), ma sulla NCL. A riprova di questo infatti le prove triassiali mostrano $\Delta u > 0$ pur evidenziando stress-path non drenati di tipo dilatante;

6. La SSL non risulta parallela alla CSL perché a basse tensioni di confinamento i provini liquefano e ciò causa un incremento di compressibilità che fa deviare la SSL a bassi valori di σ'_v.

In generale quanto osservato concorda con la letteratura presente sull'argomento e riferita a terreni con elevato contenuto fine a bassa plasticità. Si vedano a tal proposito: Martins et al. (2001), Coop et Atkinson (1993) e Yang et al. (2006).
In termini di pendenza della CSL e quindi delle varie NCL si trova, nel piano di compressione (v, $\log_{10}$ p') $\lambda^* = 0.355$.
Di fatto λ^* è pari al valore di Cc ricavabile anche dalle prove edometriche e che è risultato essere mediamente pari a 0.33 per L1 e 0.38 per L2. C'è dunque un buon riscontro tra compressibilità delle prove edometriche e triassiali isotrope, che porta a concludere che anche la linea k_0 risulta parallela alla NCL ed alla CSL così come ci si aspetta che sia.
Dalle stesse prove è possibile ricavare informazioni in merito alla pendenza k* delle rette URL di scarico-ricarico. Come mostrato in Fig. 10-3 tali rette risultano tra loro parallele. La pendenza k* nel piano (v, $\log_{10}$ p') risulta: k*=0.029.
Nelle prove edometriche si sono ottenuti valori di Cr pari mediamente a 0.025 per L1 e 0.030 per L2, valori confrontabili con quelli di k*.

PIANO DI COMPRESSIONE
v - Log p'

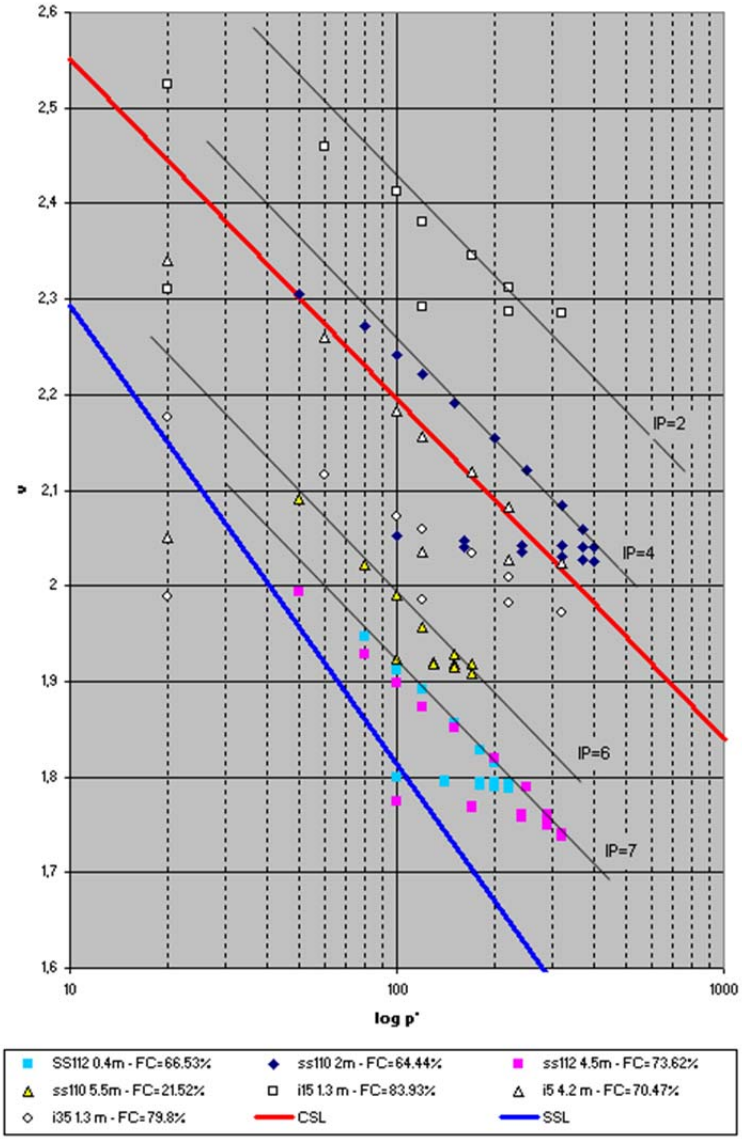


FIG. 10-2 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- PIANO DI COMPRESSIONE RISULTATI PROVE TRIASSIALI - NCL

PIANO DI COMPRESSIONE
v - Log p'

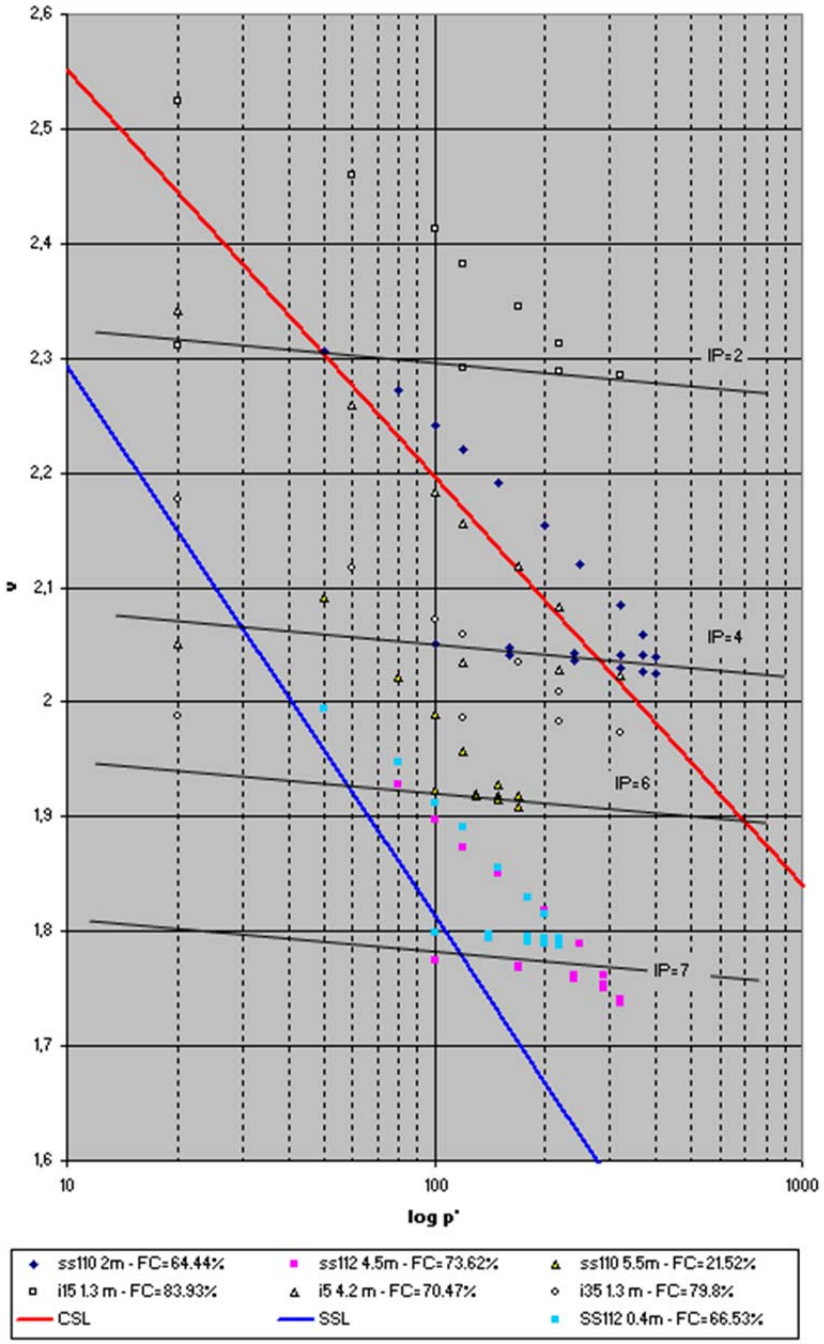


FIG. 10-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - PIANO DI COMPRESSIONE RISULTATI PROVE TRIASSIALI - URL

11. CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE

La caratterizzazione dei terreni di fondazione ha potuto usufruire di un notevole numero di indagini, eseguite sia nell'ambito del progetto della Piastra Multifunzionale, che nell'ambito della costruzione di opere ad essa adiacenti.

Tutte le indagini, sia i sondaggi che le prove in sito, hanno quindi evidenziato, a partire dal fondale, la presenza di una serie di strati a granulometria man mano crescente con la profondità, al di sotto dei quali è presente uno strato di argilla pliocenica compatta, seguita infine dalla roccia di base.

In particolare in superficie si ritrovano 9 m di materiale costituito per la maggior parte da limo di scarsa consistenza, che è sono stati suddivisi in due strati, L1 ed L2. Il primo, di spessore circa 4 m, è risultato sovraconsolidato presumibilmente ad opere dell'azione ciclica delle onde. Tale sovraconsolidazione scompare nel successivo L2. Tali strati risultano i più importanti per la stabilità ed i cedimenti dell'opera. Segue quindi uno strato a prevalenza sabbiosa con limo, denominato SL, che mostra una maggiore consistenza, talvolta intercalato da lenti più limose. Infine si ritrova uno strato di ghiaia sabbiosa che si poggia sull'argilla di base, a maggiore resistenza e consistenza, che si poggia sullo strati di argilla pliocenica di base.

I due strati limosi non sono presenti verso la costa, ma compaiono gradatamente per poi assestarsi ad uno spessore circa costante. Gli strati di sabbia SL e ghiaia G invece mostrano una certa variabilità di spessore lungo le varie sezione della Piastra, così come l'argilla di base. Quest'ultima infatti risulta più superficiale nella parte centrale della Piastra, per poi approfondirsi tutt'attorno.

In Tab. 11-1 si riporta la stratigrafia media nell'area della Piastra Multifunzionale.

In Tab. 11-2 si riporta invece la stratigrafia media dell'area della nuova diga foranea.

TAB. 11-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE- STRATIGRAFIA DI PROGETTO

STRATIGRAFIA MEDIA DI PROGETTO		
Spessore medio (m)	Strato	Note
4.0	L1	Limo sabbioso con spessore variabile tra 3 e 6 m.
4.0	L2	Limo con spessore medio abbastanza costante su tutta l'area.
5.0	SL	Strati alternati di spessore variabile di sabbie più o meno limose. A luoghi lo strato può contenere sottolivelli di limo sabbioso. Lato costa e per fondali più profondi di -15 m l.m.m. lo spessore si incrementa mediamente a 16 m.
15.0	S	Sabbia pulita presente soltanto lungo la costa a profondità superiori ai 15 m.
4.0	G	Ghiaia con sabbia e poco limo con spessore variabile tra 2 e 8 m, che incrementa notevolmente trasversalmente verso sud fino a spessori medi di 20 m.
Indefinito	A	Argilla compatta pliocenica. E' assente a ridosso della costa.

TAB. 11-2 VADO LIGURE – NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE – STRATIGRAFIA MEDIA NUOVA DIGA FORANEA

STRATIGRAFIA MEDIA DI PROGETTO		
Spessore medio [m]	Strato	Note
5	L1	Limo sabbioso con spessore variabile tra 4 e 6 m
5	SL	Sabbie più o meno limose con sottolivelli di limo sabbioso. Spessore variabile tra 2 e 8 m, crescente verso la parte più a mare della diga
4	G	Ghiaia con sabbia e poco limo, con spessore circa costante lungo la diga, che si incrementa in modo significativo al di sotto del cassone tipo E, per un rapido approfondimento della roccia di base

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio che in sito si è potuta ricavare la caratterizzazione dei diversi strati di fondazione, che viene riportata nella seguente Tab. 11-3. Tale caratterizzazione risulta valida anche per i terreni della nuova diga foranea.
Si sottolinea che la compressibilità è stata definita per i materiali sabbiosi e ghiaiosi in termini di legge di variazione del modulo elastico con lo stato tensionale, indicandone il rapporto con il corrisponde modulo di ricompressione una volta definito un fissato livello tensionale. Invece la compressibilità dei materiali limosi ed argillosi è stata definita in termini di rapporto di compressione e di ricompressione, dai quali è possibile, se necessario ricavare per ciascun livello tensionale il relativo modulo elastico.

La permeabilità degli strati limosi, rispetto ai risultati della prove prima presentate, è stata fissata più sulla base dei risultati delle prove di dissipazione che non di quelle edometriche essendo le prime ritenute più rappresentative delle effettive condizioni di drenaggio in sito.

Si ritiene, inoltre, di caratterizzare i terreni limosi superficiali in termini di resistenza drenata, anziché in termini di resistenza non drenata, fornendo tuttavia la legge di variazione di quest'ultima con lo stato tensionale.

Le analisi per la valutazione dei cedimenti e della stabilità nelle diverse fasi costruttive saranno svolte con riferimento alle resistenze drenate tenendo però opportunamente conto delle sovrappressioni neutre generate dalle singole fasi di lavoro, ovvero si eseguiranno analisi non consolidate non drenate in sforzi efficaci.

TAB. 11-3 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CARATTERIZZAZIONE PROGETTO ESECUTIVO

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Livello	γ	IP	G_s	OCR	e_0	K	c_v	C_u	c'	ϕ'	E (*) (MPa)		G_{max}	α_{Eur} (**)	CR RR	C_u	v	k_0
	(kN/m^3)	(-)	(-)	(-)	(-)	(m/s)	(m^2/s)	(kPa)	(kPa)	(°)	m	n	(MPa)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
L1	16	10	2.73	5	1.35	3E-8	5E-6	(***)	0	33	1.5	0.75	15	14	0.135 0.0096	3E-3	0.35	0.50
L2	17	10	2.73	1	1.28	3E-8	7E-6	(***)	0	32	1.5	0.75	40	13	0.135 0.0096	3E-3	0.35	0.50
SL/S	18	-	2.72	1	1.20	1E-7	-	-	0	32	15	0.6	70	9	-	-	0.30	0.50
G	19	-	2.72	1	-	1E-5	-	-	0	40	30	0.6	120	8	-	-	0.30	0.50
A	18.5	20	2.75	≥ 3	1.00	1E-9	3E-6	200	200	27	-		150	-	0.27 0.025	1E-3	0.25	1.50

(*) Per SL e G il modulo E varia con lo stato tensionale tramite la formula seguente:
$E = m(\sigma'_v/p_a)^n$ dove p_a = pressione atmosferica,
σ'_v = sforzo verticale agente = σ'_{v0} allo stato naturale
= $\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$ in presenza delle opere
Per L1, L2 e A le caratteristiche di deformabilità sono ricavabili da CR ed RR, adeguandoli al valore della tensione efficace agente.

(**) E_R si ottiene da E attraverso il fattore α_{Eur} quindi: $E_{ur} = \alpha_{Eur} \times E$

(***) Per individuare il valore di Cu per L1 ed L2 si può utilizzare la seguente relazione:
$Cu = 0.46 \cdot OCR^{0.7} \sigma'_v$

12. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Per la costruzione della piastra multifunzionale sono previsti quattro materiali di natura granulare denominati Bonifico, Scanno, Tout-venant e Riempimento con le seguenti funzioni:

Bonifico: costituisce lo strato di ripartizione granulometrica dal terreno di fondazione e lo scanno/tout-venant superiori. La sua caratteristica è di avere una curva granulometrica continua composta da sabbia e ghiaia. Sono presenti le 3 frazioni di sabbia fine, media e grossa. La percentuale di ghiaia deve essere tra il 40% ed il 60%. La percentuale fine, ovvero il passante a 0.1 mm, non deve superare il 5%. Il complemento a queste frazioni è costituito da sabbia.

Scanno: rappresenta lo strato di appoggio dei cassoni. E' costituito da pietrame avente granulometria 2-300 kg.

Tout-venant: è un materiale granulare composto da sabbia, ghiaia e ciottoli variamente assortiti, preferibile se ha una curva granulometrica continua, utilizzato come riempimento dell'area rilevato. La percentuale di fine tollerata, passanti al 0.1 mm, può essere fino al 20%.

TAB. 12-1 - VADO LIGURE - NUOVA PIASTRA MULTIFUNZIONALE - CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DA COSTRUZIONE PROGETTO ESECUTIVO

Materiale	**Note**
BONIFICO	Ghiaia 40-60%. Fine ≤ 5%. Sabbia 45-35%. Curva ben assortita
SCANNO	Pietrame 2-300 kg. Curva ben assortita.
TOUT - VENANT	Ghiaia sabbia e ciottoli. Fine ≤ 10%. Φmax = 100 mm. Curva ben assortita.

Materiale	γ	G_s	OCR	K	c'	ϕ'	E (*) (MPa)		α_{Eur} (**)	ν	k_0
	(kN/m^3)	(-)	(-)	(m/s)	(kPa)	(°)	m	n	(-)	(-)	(-)
BONIFICO	18	2.72	1	5E-4	0	38	54	0.8	10	0.27	0.38
SCANNO	17	2.72	1	5E-4	0	45	30	0.8	10	0.20	0.30
TOUT - VENANT	19	2.72	1	5E-4	0	38	114	0.8	10	0.27	0.38

(*) E varia con lo stato tensionale tramite la formula seguente:

$E = m(\sigma'_v/p_a)^n$ dove p_a = pressione atmosferica,

σ'_v = sforzo verticale agente = σ'_{v0} allo stato naturale

= $\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$ in presenza delle opere

(**) E_R si ottiene da E attraverso il fattore α_{Eur} quindi: $E_{ur} = \alpha_{Eur} \times E$