

[Scheda sul sito >](#)

Alberto Bruschi ~ Fausto Alessandro Crippa

# PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

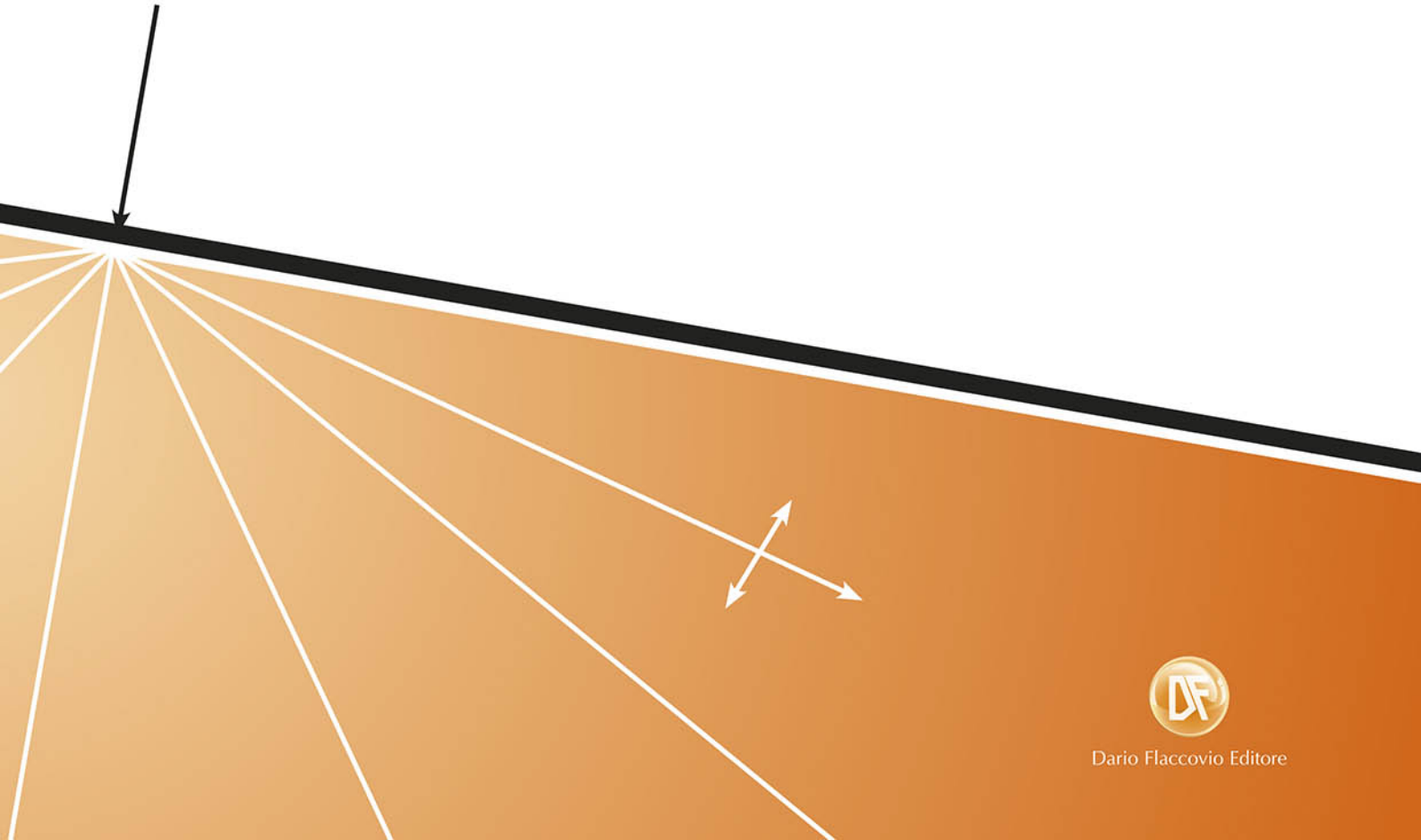
## GUIDA PRATICA PER LA SOLUZIONE DELLE PROBLEMATICHE INTERPRETATIVE E DI PREVISIONE GEOTECNICA

*Prove di laboratorio, di identificazione e classificazione*

*Prove di permeabilità sulle terre, altre prove di caratterizzazione*

*Prove di compressibilità e di resistenza meccanica*

*Controllo dell'addensamento del terreno*



Alberto Bruschi Fausto Alessandro Crippa

# **PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO**

**Guida pratica per la soluzione delle problematiche interpretative  
e di previsione geotecnica**



COLLANA DI GEOTECNICA  
E INGEGNERIA GEOTECNICA

*Bruschi A.* Meccanica delle rocce

*Bruschi A.* Prove geotecniche in situ

*Facciorusso J., Crespellani T.* Dinamica dei terreni

*Lambe T.W., Whitman R.V.* Meccanica dei terreni

*Poulos H.G., Davis E.H.* Pali

*Regoliosi P., Storoni Ridolfi S.* Introduzione alla geotecnica

*Tanzini M.* Scavo meccanizzato

*Tanzini M.* Fondazioni

*Tanzini M.* Gallerie

*Tanzini M.* L'indagine geotecnica

*Tanzini M.* Micropali e pali di piccolo diametro

*Tanzini M.* Fenomeni franosi

Alberto Bruschi Fausto Alessandro Crippa

PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

Guida pratica per la soluzione delle problematiche interpretative e di previsione geotecnica

ISBN 978-88-579-0113-8

© 2012 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: gennaio 2012

Bruschi, Alberto <1942>

Prove geotecniche di laboratorio : guida pratica per la soluzione delle problematiche interpretative e di previsione geotecnica / Alberto Bruschi, Fausto A. Crippa. - Palermo : D. Flaccovio, 2012

ISBN 978-88-579-0113-8

I. Geotecnica. I. Crippa, Fausto Alessandro <1963>

624.151 CDD-22

SBN PAL0239366

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, gennaio 2012

#### RINGRAZIAMENTI

Si coglie l'occasione per ringraziare il dott. Giuseppe Campanella di Castrovillari (cs) e la dott.ssa Cecilia Attanasio per il supporto dato.

Il presente lavoro è dedicato alle nostre mogli, alle nostre famiglie, che per tutti questi anni ci hanno pazientemente sostenuto e assecondato.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

# INDICE

## *Premessa*

### **1. Prove di laboratorio**

1.1. Introduzione generale e standard di riferimento.....	»	1
1.2. Caratteristiche di stato di un terreno. Cenni propedeutici .....	»	3

### **2. Prove di identificazione e classificazione**

2.1. Definizione.....	»	7
2.2. Prova per la determinazione del peso specifico delle terre.....	»	7
2.2.1. Norme di riferimento.....	»	7
2.2.2. Premessa.....	»	7
2.2.3. Apparecchiatura di prova .....	»	7
2.2.4. Procedura di taratura picnometrica.....	»	8
2.2.5. Procedura di prova.....	»	8
2.2.6. Elaborazione dei risultati.....	»	9
2.3. Determinazione del contenuto d'acqua .....	»	10
2.3.1. Norme di riferimento.....	»	10
2.3.2. Premessa.....	»	10
2.3.3. Apparecchiatura di prova .....	»	10
2.3.4. Procedura di prova.....	»	11
2.3.5. Elaborazione dei risultati.....	»	11
2.4. Prove per la classificazione delle terre.....	»	12
2.4.1. Norme di riferimento.....	»	12
2.4.2. Premessa.....	»	12
2.4.3. Analisi granulometrica .....	»	12
2.4.3.1. Preparazione del campione.....	»	13
2.4.3.1.1. Quartatura del campione.....	»	13
2.4.3.2. Analisi per vagliatura meccanica.....	»	13
2.4.3.2.1. Apparecchiatura di prova.....	»	14
2.4.3.2.2. Analisi per via secca .....	»	15
2.4.3.2.3. Analisi per via umida.....	»	16
2.4.3.3. Analisi granulometrica per sedimentazione (aerometria).....	»	16
2.4.3.3.1. Apparecchiatura di prova.....	»	17
2.4.3.3.2. Procedura di prova.....	»	17
2.4.3.4. Elaborazione dei risultati.....	»	18
2.4.3.5. Restituzione dei risultati .....	»	19
2.4.3.6. Diagramma triangolare.....	»	20
2.4.4. Coefficienti caratteristici della curva granulometrica .....	»	20
2.4.4.1. Considerazioni procedurali.....	»	22
2.4.4.2. Classi granulometriche di riferimento secondo differenti sistemi di classificazione.....	»	22

2.5.	Limiti di Atterberg .....	»	23
2.5.1.	Norme di riferimento.....	»	23
2.5.2.	Premessa.....	»	23
2.5.3.	Limite liquido ( $W_L$ ).....	»	24
2.5.3.1.	Apparecchiatura di prova .....	»	24
2.5.3.2.	Procedura di prova.....	»	25
2.5.3.3.	Elaborazione dei risultati.....	»	25
2.5.4.	Limite plastico ( $W_p$ ) .....	»	26
2.5.4.1.	Apparecchiatura di prova .....	»	27
2.5.4.2.	Procedura di prova.....	»	27
2.5.4.3.	Elaborazione dei risultati.....	»	27
2.5.5.	Limite di ritiro ( $W_s$ ).....	»	28
2.5.5.1.	Apparecchiatura di prova .....	»	28
2.5.5.2.	Procedura di prova.....	»	28
2.5.6.	Classificazione delle terre in base agli indici di Atterberg .....	»	29
2.5.6.1.	Indice di plasticità ( $I_p$ ) .....	»	30
2.5.6.2.	Indice di consistenza ( $I_c$ ).....	»	31
2.5.6.3.	Indice di liquidità ( $I_L$ ) .....	»	32
2.5.6.4.	Indice di attività ( $I_A$ ) .....	»	32
2.5.6.5.	Indice di fluidità ( $I_F$ ) .....	»	34
2.5.6.6.	Indice di tenacità ( $I_{TC}$ ).....	»	34
2.5.6.7.	Correlazioni dirette tra $W_n$ (umidità naturale), limite liquido $W_L$ e limite plastico $W_p$ .....	»	34
2.5.6.8.	Altre correlazioni con gli indici di Atterberg.....	»	34
2.5.7.	Nuovi sviluppi scientifici: la carta di plasticità di Polidori e Gori (2003, 2005) .....	»	42
2.6.	Relazioni tra granulometria, limiti di Atterberg e parametri di resistenza al taglio.....	»	44
2.6.1.	Relazioni tra granulometria e angolo d'attrito nei terreni granulari.....	»	44
2.6.1.1.	Koerner (1970) .....	»	44
2.6.1.2.	Mogami (1982).....	»	44
2.6.1.3.	Normativa danese (1984) .....	»	45
2.6.1.4.	Normativa inglese (1994).....	»	45
2.6.1.5.	Pedro (2004).....	»	46
2.6.1.6.	Duncan (2004).....	»	46
2.6.1.7.	Simonini (2004).....	»	46
2.6.2.	Relazioni tra limiti di Atterberg e angolo d'attrito .....	»	47
2.6.2.1.	Dal limite liquido.....	»	47
2.6.2.2.	Dall'indice plastico.....	»	47
2.6.3.	Relazioni tra limiti di Atterberg e resistenza al taglio non drenata $S_u$ .....	»	48
2.6.3.1.	Skempton (1957) .....	»	48
2.6.3.2.	Wroth e Houlsby (1985) .....	»	48
2.6.3.3.	Jamiolkowski et al. (1985) .....	»	48
2.6.3.4.	Sotelo e Bosch (1999), Bruschi (2009) .....	»	48
2.6.3.5.	Wood (1983).....	»	49
2.6.3.6.	Yilmaz (2000).....	»	49
2.6.3.7.	Liszkowki (2004), Milnarek (2005) .....	»	50
2.7.	Sistemi di classificazione delle terre.....	»	50
2.7.1.	Premessa.....	»	50
2.7.2.	Unified Soil Classification System (USCS) .....	»	50
2.7.3.	AASHTO Soil Classification System.....	»	54
2.7.4.	Classificazione delle terre CRN-UNI 10006.....	»	56
2.7.4.1.	Legenda classificazione terre CNR-UNI 10006.....	»	56

### 3. Altre prove di caratterizzazione

3.1.	Determinazione della densità relativa.....	»	59
------	--	---	----

3.1.1. Norme di riferimento.....	»	59
3.1.2. Premessa.....	»	59
3.1.3. Apparecchiatura di prova .....	»	60
3.1.4. Procedura di prova.....	»	61
3.1.4.1. Metodo per via secca.....	»	61
3.1.4.2. Metodo per via umida.....	»	61
3.1.5. Elaborazione dei risultati.....	»	62
3.2. Determinazione dell'equivalente in sabbia.....	»	62
3.2.1. Norme di riferimento.....	»	62
3.2.2. Premessa.....	»	63
3.2.3. Apparecchiatura di prova .....	»	63
3.2.4. Procedura di prova.....	»	63
3.2.5. Elaborazione dei risultati.....	»	64
<b>4. Prove di permeabilità sulle terre</b>		
4.1. Definizioni .....	»	65
4.2. La prova a carico idraulico costante .....	»	65
4.2.1. Norme di riferimento.....	»	65
4.2.2. Apparecchiatura di prova .....	»	66
4.2.3. Campioni ricostruiti: procedura di prova .....	»	66
4.2.4. Campioni indisturbati: procedura di prova.....	»	68
4.2.5. Elaborazione dei risultati.....	»	68
4.3. Prova a carico variabile .....	»	68
4.3.1. Apparecchiatura di prova .....	»	69
4.3.2. Procedura di prova.....	»	69
4.3.3. Elaborazione dei risultati.....	»	70
<b>5. Prove di compressibilità e di resistenza meccanica</b>		
5.1. Introduzione.....	»	75
5.2. Test di consolidazione edometrica.....	»	75
5.2.1. Premessa.....	»	75
5.2.2. Apparecchiatura di prova .....	»	76
5.2.3. Procedura di prova.....	»	79
5.2.4. Elaborazione dei risultati.....	»	80
5.2.4.1. Grafico $e-\sigma'$ .....	»	80
5.2.4.2. Grafico log $\sigma'$ -indice dei vuoti.....	»	81
5.2.4.3. Diagramma cedimento-log(tempo) .....	»	83
5.2.4.4. Cedimento-(tempo) <sup>0,50</sup> .....	»	85
5.2.4.5. Determinazione del coefficiente di permeabilità (K) .....	»	88
5.2.4.6. Coefficiente di consolidazione secondaria .....	»	89
5.2.4.7. Osservazioni sui coefficienti di consolidazione .....	»	89
5.3. Prova di compressione con espansione laterale libera.....	»	90
5.3.1. Norme di riferimento.....	»	90
5.3.2. Premessa.....	»	90
5.3.3. Apparecchiatura e procedura di prova.....	»	91
5.4. Prova di taglio diretto .....	»	92
5.4.1. Norme di riferimento.....	»	92
5.4.2. Premessa.....	»	93
5.4.3. Apparecchiatura di prova .....	»	93
5.4.4. Procedura di prova.....	»	95
5.4.5. Elaborazione dei risultati.....	»	97
5.5. Prova di taglio anulare.....	»	98
5.5.1. Apparecchiatura di prova .....	»	98

5.5.2. Procedura di prova.....	»	99
5.5.3. Elaborazione dei risultati.....	»	100
5.6. Prova triassiale (sintesi).....	»	100
5.6.1. Determinazione del modulo elastico dalle prove triassiali.....	»	107
5.7. Colonna risonante (cenni).....	»	109
<b>6. Il controllo dell'addensamento del terreno</b>		
6.1. Prove di compattazione.....	»	111
6.1.1. Norme di riferimento.....	»	111
6.1.2. Premessa.....	»	111
6.1.3. Prove Proctor.....	»	112
6.1.3.1. Prova Proctor standard.....	»	112
6.1.3.1.1. Apparecchiatura.....	»	112
6.1.3.1.2. Procedura.....	»	112
6.1.3.1.3. Elaborazione dei risultati.....	»	114
6.1.3.2. Prova Proctor modificata.....	»	115
6.2. Prova CBR.....	»	116
6.2.1. Norme di riferimento.....	»	116
6.2.2. Prova (cenni).....	»	116
Riferimenti bibliografici.....	»	119



## PREMESSA

Il presente volume nasce dalla volontà di fornire un differente approccio alle prove geotecniche di laboratorio, delle quali risultano ben note le tecniche e gli strumenti realizzativi, ma altrettanto poco approfondito le modalità di utilizzo dei risultati da esse derivanti in campo applicativo.

La trattazione delle singole prove ha cercato di percorrere in modo semplice ed esaustivo le procedure di prova, le condizioni di significatività geotecnica e le caratteristiche delle apparecchiature fondamentali, giungendo alla trattazione dei risultati secondo criteri di intercorrelabilità; si è cercato di fornire un quadro interpretativo dei risultati non solo mirato al singolo test ma cercando di correlarlo a indici e parametri geotecnici derivanti da differenti tipologie di prove di laboratorio.

Intento degli autori è quello di fornire a geologi e ingegneri uno strumento di consultazione semplice per far fronte alle problematiche interpretative e di previsione geotecnica più frequentemente riscontrabili nella realtà progettuale; tale approccio assume particolare interesse anche nel caso in cui si abbiano a disposizione modeste quantità di dati geotecnici, condizione, questa, tutt'altro che infrequente. Particolare rilievo è stato dato alle correlazioni con le prove di classificazione esistenti allo stato dell'arte, raccogliendo una serie di correlazioni tra i differenti parametri geotecnici, siano esse note e meno note, di presumibile utilità applicativa.

Alberto Bruschi  
Fausto Crippa

# 1. PROVE DI LABORATORIO

## 1.1. Introduzione generale e standard di riferimento

La disciplina geotecnica permette di studiare i differenti tipi di terreni attraverso la definizione di una serie di indici, parametri e caratteri fisici ricavabili da prove in sito o da prove di laboratorio.

Le indagini in sito permettono la raccolta di informazioni sul terreno nella sua condizione reale; mentre i test di laboratorio consentono di definire compiutamente la natura e le caratteristiche di resistenza, di compressibilità e di permeabilità dei terreni, ricostruendo in laboratorio, mediante tecnologie più o meno sofisticate, le condizioni fisiche e lo stato tensionale originario esistente in sito. Le prove di laboratorio vengono distinte in tre categorie fondamentali a seconda delle caratteristiche fisiche che si vogliono determinare.

Si possono pertanto distinguere prove di identificazione (peso di volume, contenuto in acqua, densità, limiti di Atterberg, granulometria, equivalente in sabbia, classificazione), prove di permeabilità a carico variabile o costante e prove di resistenza meccanica per determinare le proprietà fisico-meccaniche dei terreni (prove di taglio, torsione, consolidazione edometrica, compattazione, compressione).

Le prove geotecniche di laboratorio vengono condotte su campioni di terreno prelevati in sito, attraverso l'utilizzo di idonee attrezzature il cui corretto impiego, dipendente dalla capacità e dall'esperienza degli operatori, determina la classe di qualità più o meno elevata del campione ottenuto.

Le *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche* (Associazione Geotecnica Italiana – A.G.I. 1977) individuano 5 classi di qualità: le classi 01, 02 e 03 comprendono campioni di tipo rimaneggiato, la classe 04 campioni con disturbo limitato (semidisturbati), la classe 05 campioni indisturbati.

Per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni devono essere utilizzati campioni che conservino la struttura, il contenuto d'acqua e i caratteri fisici propri dei sedimenti nella loro condizione sedimentologica naturale (campioni indisturbati).

Con il termine *indisturbato* pertanto si indica un campione di terreno nel quale siano risultate minime, durante le fasi di prelievo, le alterazioni della struttura, tessitura, contenuto d'acqua e dei costituenti chimici originari.

In base al grado di disturbo che i campioni presentano, ovvero in base alla quantità di informazioni geotecniche che da essi si possono ricavare, i campioni sono classificati come indicato nella tabella 1.1.

Caratteristiche geotecniche determinabili	Grado di qualità				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a) Profilo stratigrafico	X	X	X	X	X
b) Composizione granulometrica		X	X	X	X
c) Contenuto d'acqua naturale			X	X	X
d) Peso dell'unità di volume				X	X
e) Caratteristiche meccaniche					X
Classificazione geotecnica del campione	Disturbati o rimaneggiati			A disturbo limitato	Indisturbati

Tabella 1.1. Classi di qualità dei campioni

Risulta di estremo interesse ai fini geotecnici delineare quali siano gli stati di alterazione tensionale cui va incontro un campione di terreno di massima qualità (Q5) durante le differenti fasi di campionamento, trasporto e preparazione propedeutiche e preliminari all'esecuzione dei test geotecnici in laboratorio. Di seguito sono stati riassunti i principali passi di questa filiera geotecnica:

- a) fase di perforazione;
- b) fase di campionamento geotecnico;
- c) sigillatura, trasporto e conservazione del campione;
- d) fase di estrusione dal campionatore;
- e) fase di confezionamento del provino.

Nella figura 1.1 viene schematizzato il percorso tensionale caratteristico del generico campione Q5 a partire dalle condizioni naturali in sito (punto A) fino all'esecuzione del test generico in laboratorio.

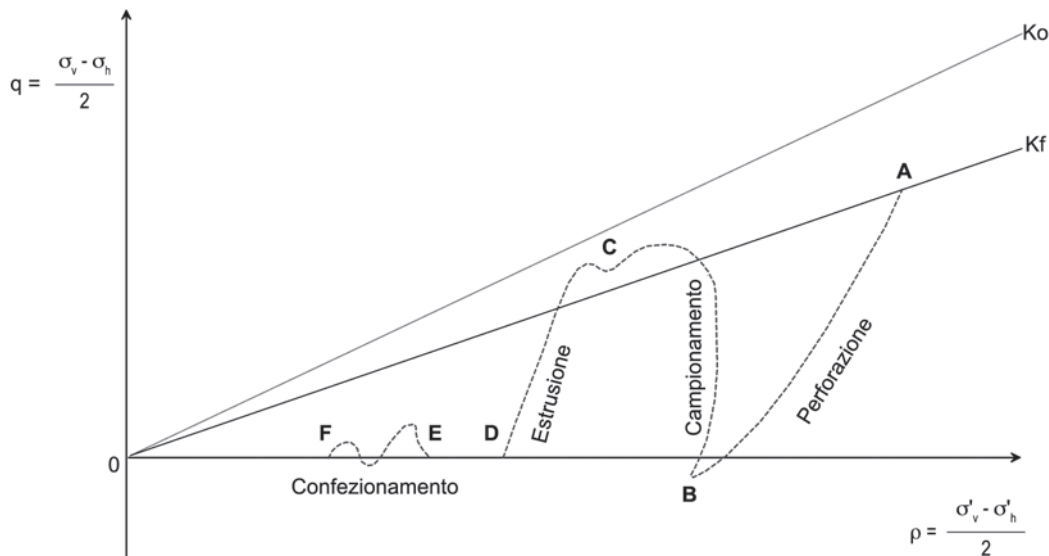


Figura 1.1. Percorso tensionale di un campione di terreno dalla sua posizione naturale in sito fino all'inizio della prova di laboratorio (tratto e rielaborato da Favaretti M., Mazzuccato A., 1987)

Nella preparazione del provino parte fondamentale riveste l'estrusione del campione (Q5) dalla fustella di campionamento la cui attuazione deve avvenire secondo criteri di massima accuratezza giungendo altresì alla descrizione preliminare dettagliata del campione fornito. Tale fase di lavoro permette di evidenziare attraverso un semplice esame visivo macroscopico alcuni elementi di fondamentale importanza, la cui analisi preliminare può permettere di valutare anche il grado di validità e significatività del campione a disposizione.

Difetti evidenti di campionamento in sito sono rappresentati da compressione e raccorciamento della carota (confronto tra quota di prelievo e lunghezza reale della carota, tipico in terreni molto soffici), irregolarità stratigrafiche all'interno di orizzonti omogenei (intercalazioni granulari grossolane in depositi coesivi), distruzione tessiturale del campione (frequente in depositi coesivi fortemente sovraconsolidati) oppure veri e propri errori di campionamento in foro (nuclei rimaneggiati convoluti, campionamento in orizzonti indesiderati ecc.). L'apertura della fustella va quindi condotta secondo procedure di rilevazione standardizzate con compilazione di apposito certificato descrittivo come riportato nella figura 1.2.

I test di laboratorio vengono distinti in tre categorie fondamentali sulla base delle caratteristiche proprie del campione che si vuole andare a determinare.

Come in precedenza accennato vengono distinte:

- prove di identificazione (peso di volume, contenuto in acqua, densità, limiti di Atterberg, granulometria, equivalente in sabbia, classificazione);

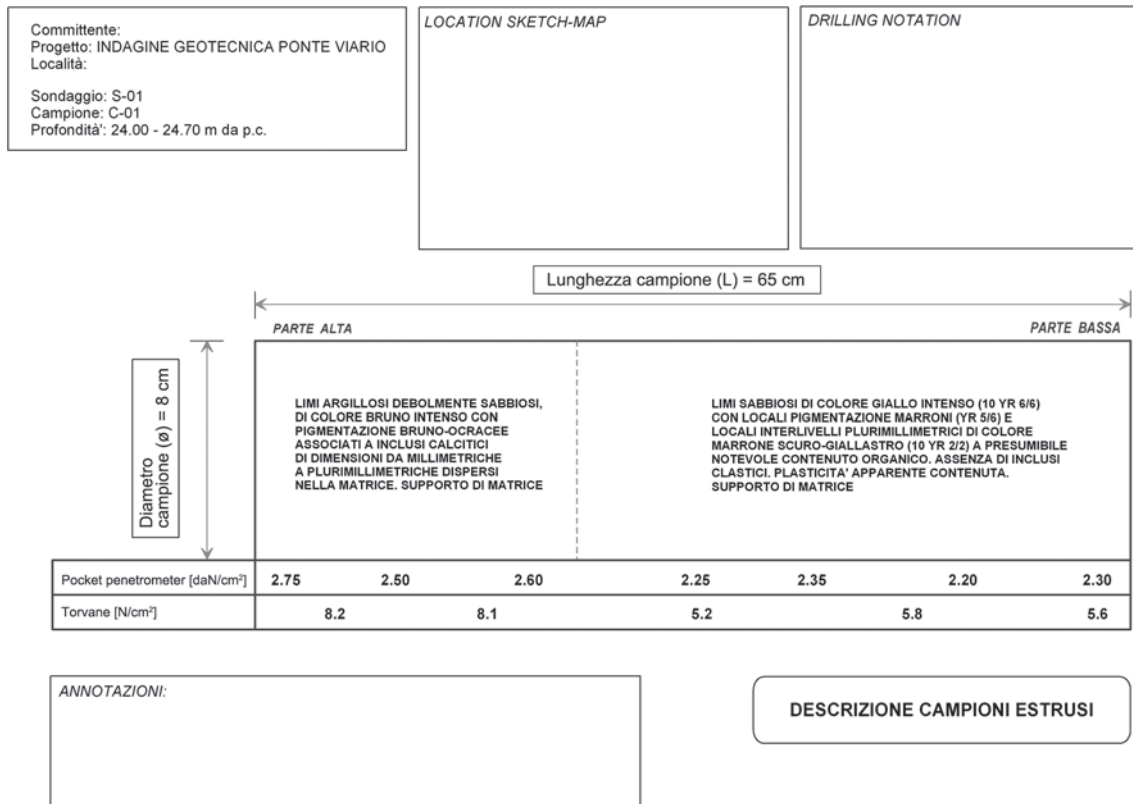


Figura 1.2. Descrizione campioni estrusi

- prove di permeabilità a carico variabile o costante;
- prove di resistenza meccanica, per determinare le proprietà fisiche (taglio, torsione, consolidamento, compattazione, compressione).

Nel seguito vengono trattati i principali tipi di prove di laboratorio la cui definizione procedurale e scientifica viene descritta da normative nazionali e internazionali elencate:

- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR);
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI);
- American Society to Testing and Materials (ASTM);
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO);
- British Standard (BS).

## 1.2. Caratteristiche di stato di un terreno. Cenni propedeutici

Un terreno è un sistema trifase costituito da solidi, liquidi, aria. Queste tre fasi possono essere idealizzate come da figura 1.3.

Il volume totale del terreno è la somma del volume dei solidi, del volume dell'acqua e del volume dell'aria:

$$V = V_s + V_w + V_a$$

La somma di  $V_w + V_a$  è nota come *volume dei vuoti*  $V_v$ .

Analogamente, il peso di un terreno è dato, essendo trascurabile il peso dell'aria, da:

$$W = W_s + W_w$$

Le definizioni date sopra sono state stabilite per descrivere le proporzioni di ogni costituente presente

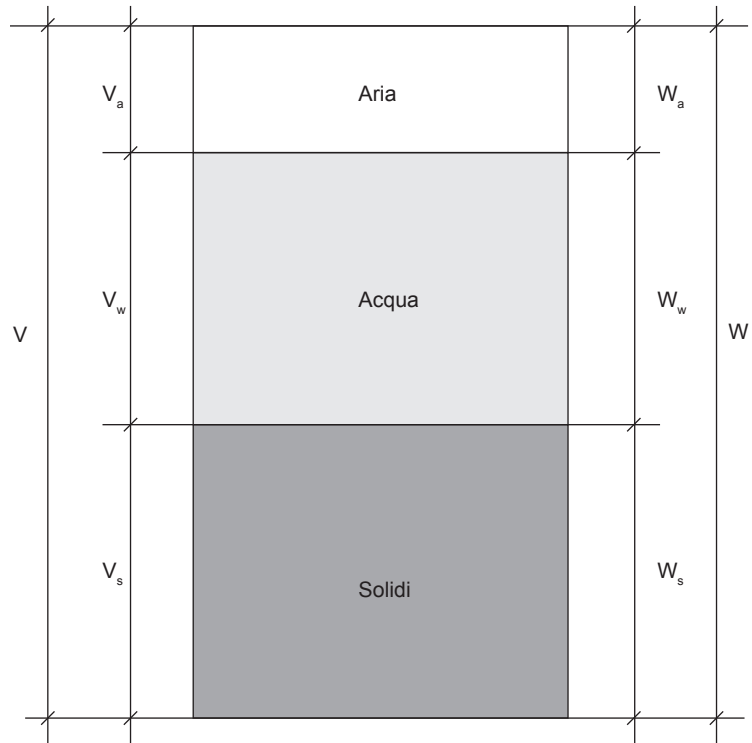


Figura 1.3  
Caratteristiche di stato in un terreno

nel terreno e ogni equazione può essere scritta con variabili diverse; di seguito si danno le più comuni in una forma ritenuta più semplice.

Contenuto d'acqua naturale  $W_n$

$$W_n = \frac{W_w}{W_s} 100\%$$

Indice dei vuoti  $e$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Porosità  $n$

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Porosità e indice dei vuoti sono correlati fra loro dalla:

$$n = \frac{e}{1+e}$$

Volume specifico  $V'$

$$V' = 1 + e$$

Peso specifico  $G_s$

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_a}$$

dove  $\gamma_a$  è il peso specifico dell'acqua pari a  $9,81 \text{ kN/m}^3$  (arrotondato per gli usi comuni in 9,8); in letteratura è anche indicato con il simbolo  $\gamma_w$ .

*Grado di saturazione  $S$*

$$S = \frac{W_n G_s}{e}$$

se  $S = 1$  o 100%, il terreno è completamente saturo.

*Peso di volume  $\gamma$*

$$\gamma = \left( \frac{G_s + Se}{1 + e} \right) \gamma_a$$

*Peso di volume secco  $\gamma_d$*

$$\gamma_d = \left( \frac{G_s}{1 + e} \right) \gamma_a = \frac{\gamma}{1 + W_n}$$

*Peso di volume saturo  $\gamma_{sat}$*

$$\gamma_{sat} = \left( \frac{G_s + e}{1 + e} \right) \gamma_a$$

*Peso di volume immerso  $\gamma'$*

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_a = \left( \frac{G_s - 1}{1 + e} \right) \gamma_a$$

## 2. PROVE DI IDENTIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE

### 2.1. Definizione

Le prove di identificazione geotecnica dei terreni comprendono le seguenti prove di laboratorio:

- 1) peso specifico;
- 2) contenuto in acqua;
- 3) classificazione delle terre (analisi granulometrica e limiti di Atterberg).

### 2.2. Prova per la determinazione del peso specifico delle terre

#### 2.2.1. Norme di riferimento

Le norme di riferimento riguardanti la determinazione del peso specifico delle terre sono:

- ASTM C 127-84, C 128-84, D 854-83;
- AASHTO T 84-86, T 85-85, T 100-86;
- BS 1377: 1975 Test 6;
- CNR-UNI 10010, 10013.

#### 2.2.2. Premessa

Si definisce *peso specifico* di un terreno il rapporto tra il peso di un volume noto del terreno essiccato e il peso di un uguale volume di acqua distillata, determinati entrambi alla medesima temperatura.

Tale determinazione risulta attuabile solo nel caso di densità di terreno superiore alla densità dell'acqua. Il valore del peso specifico  $G_s$  viene utilizzato anche nell'elaborazione dei risultati in altri test quali le analisi granulometriche per sedimentazione (aerometrie) e di consolidazione edometrica. La procedura di determinazione di seguito descritta si riferisce a terreni contraddistinti da elementi granulari costitutivi di dimensioni massime inferiori a 10 mm; nel caso di campioni con diametri medi superiori ai 10 mm (casi poco frequenti) si rimanda a specifiche procedure trattate nella bibliografia indicata. Si specifica sin d'ora come, nel caso in cui il peso specifico  $G_s$  venga utilizzato nell'elaborazione dei risultati di una prova aerometrica, si dovrà procedere alla determinazione di  $G_s$  sulla sola frazione di terreno passante al setaccio 0,075 UNI (setaccio ASTM 200).

#### 2.2.3. Apparecchiatura di prova

Per l'esecuzione della prova si deve disporre di:

- serie di picnometri di vetro di capacità compresa tra 100 e 500 cm<sup>3</sup>;
- bilancia di sensibilità di 0,01 g;
- termometro di sensibilità di 0,5 °C;
- forno geotecnico termostatico per l'essiccazione del provino a  $110 \pm 5$  °C.

### 2.2.4. Procedura di taratura picnometrica

I picnometri di vetro vengono accuratamente preparati mediante fasi di lavaggio, asciugatura, pesatura (sia  $P_p$  il loro peso) e quindi riempiti con acqua distillata sino al livello di fede, avendo cura che il livello inferiore del menisco sia allineato con il segno posto sul collo del picnometro (figura 2.1).

Il peso del picnometro, riempito con acqua, viene indicato con la dicitura  $P_{pa}(T_i)$ , dove con  $T_i$  è indicata la temperatura dell'acqua al momento della determinazione.

Variando la temperatura  $T$  varierà ovviamente anche il peso  $P_{pa}$  (picnometro + acqua) secondo la legge:

$$P_{pa(T)} = \frac{\gamma_{(T)}}{\gamma_{(T_i)}} \cdot [P_{pa(T)} - P_p] + P_p$$

dove

$P_p$  = peso del picnometro

$T_i$  = temperatura dell'acqua al momento della prova

$T$  = temperatura generica diversa da  $T_i$

$\gamma_{a(T)}$  = peso di volume dell'acqua alla temperatura generica  $T$ .

In tal modo si procede alla determinazione della curva di taratura di ciascun picnometro ottenendo un diagramma cartesiano: peso lordo  $P_{pa} - T$  come rappresentato nella figura 2.2.

Al termine della taratura i picnometri vengono ripuliti e ricondotti a condizioni di asciutto necessarie per l'esecuzione delle prove vere e proprie.

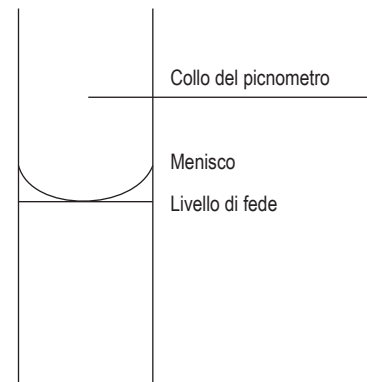


Figura 2.1. Allineamento del menisco

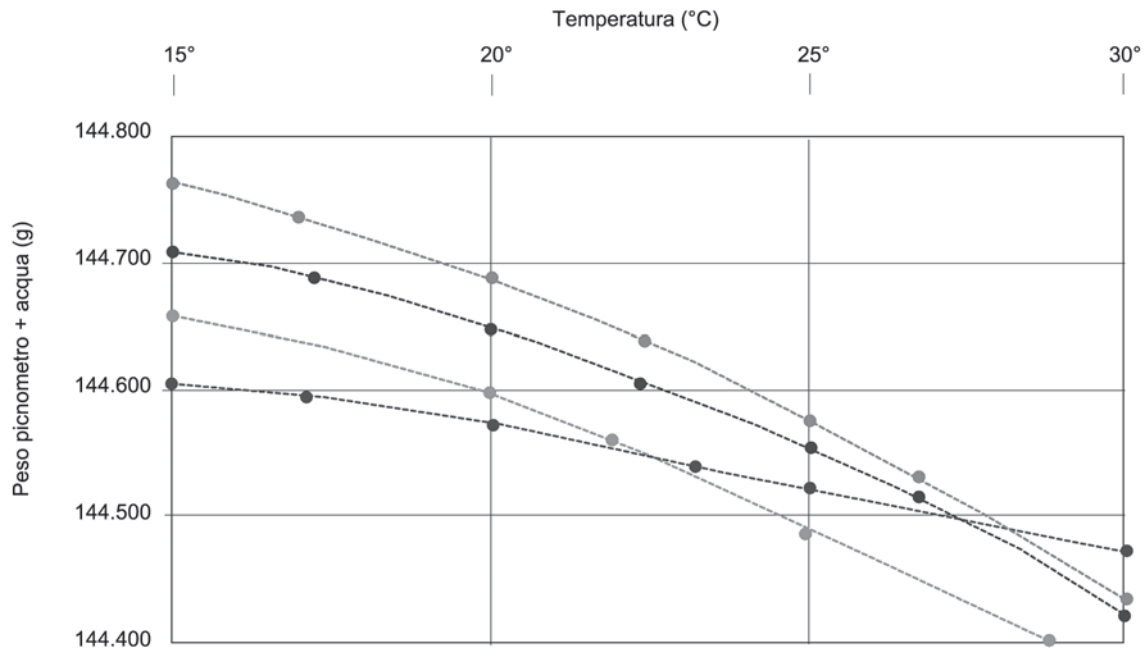


Figura 2.2. Esempio di grafico di taratura dei picnometri

### 2.2.5. Procedura di prova

All'interno del picnometro, in condizioni asciutte, vengono introdotti 40 g circa di terreno, aggiungendo successivamente acqua distillata in quantità idonea alla completa sommersione del provino e lasciando questo in condizioni di quiete per almeno 4-6 ore. In linea generale il volume di sedimento utilizzato



nella prova deve essere proporzionale alla volumetria dello strumento picnometrico non superando il 30% del volume totale del picnometro medesimo. Quindi si procede all'eliminazione dell'aria all'interno del volume di terreno, mediante l'applicazione di uno dei metodi di seguito riportati:

- A) si sottopone il volume interno del picnometro a una depressione non maggiore di 100 mmHg, per almeno 20-30 minuti, utilizzando un sistema di aspirazione o pompa. Durante tale fase di lavoro si procede alla frequente agitazione del picnometro al fine di facilitare il processo di deaerazione;
- B) si sottopone la miscela acqua-terreno presente nel picnometro a bollitura per almeno 20-25 minuti procedendo anche in questo caso a frequente scuotimento del picnometro. Al termine della bollitura si lascia raffreddare il tutto sino al raggiungimento della temperatura ambiente.

Ottenuta la disaerazione del materiale di prova, si riempie il picnometro con acqua distillata fino al livello di fede, procedendo alla successiva misurazione sia del peso  $P_{pat}$  che della temperatura  $T$ .

### 2.2.6. Elaborazione dei risultati

Il valore del peso specifico  $G_s$  viene determinato mediante la seguente formulazione:

$$G_s = \frac{P_{sn}}{P_{sn} + P_{pa} - P_{pat}}$$

dove con  $P_{sn}$  è indicato il peso secco netto del provino di terreno.

Il peso specifico del terreno alla temperatura di 20 °C è ottenibile applicando la seguente espressione:

$$G_{s(20^\circ)} = \frac{\gamma_a(T)}{\gamma_a(20^\circ)} \cdot G_{s(T)}$$

Nelle tabelle 2.1 e 2.2 vengono indicati alcuni valori caratteristici di peso specifico sia per singole tipologie mineralogiche sia per tipi di terreno normalmente rilevati. In quest'ultimo caso vengono forniti anche valori di  $G$  rilevabili in casi estremi (*humus* e scorie ferrose).

Minerale	G (g/cm <sup>3</sup> )
Quarzo	2,65
Calcite	2,72
Dolomite	2,85
Muscovite	2,70-3,10
Biotite	2,80-3,20
Clorite	2,60-2,90
Pirofillite	2,84
Serpentino	2,20-2,70
Caolinite	2,64
Halloysite	2,55
Illite	2,60-2,86
Montmorillonite	2,75-2,78

**Tabella 2.1. Peso specifico caratteristico di alcuni minerali**

Terreni	G (g/cm <sup>3</sup> )
Argilla inorganica	2,68-2,75
Argilla organica	2,58-2,65
Limo inorganico	2,62-2,68
Sabbia limosa	2,67-2,70
Sabbia	2,65-2,68
Ghiaia	2,65-2,68
Humus	1,00-1,05
Limo micaceo	2,75-3,00
Composti ferrosi	2,50-4,50

**Tabella 2.2. Peso specifico caratteristico di alcuni tipi di terreno**

## ESEMPIO DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO

Parametri	N. prova	
	01	02
Peso netto secco $P_{sn}$ (g)	83,88	52,84
Peso picnometro + acqua + terreno $P_{pat}$ (g)	210,04	206,72
Peso picnometro + acqua $P_{pa}$ (g)	156,953	173,122
Peso specifico $G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,723	2,746
Peso specifico medio $G_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,734	

Tabella 2.3. Esempio di determinazione sperimentale del peso specifico

## 2.3. Determinazione del contenuto d'acqua

### 2.3.1. Norme di riferimento

Le norme di riferimento riguardo alla determinazione del contenuto d'acqua sono le seguenti:

- AASHTO T 265;
- ASTM D 2216-80, D 2974-87;
- BS 1377: 1975 Test 1;
- CNR-UNI 10008.

### 2.3.2. Premessa

L'umidità naturale di un terreno, ovvero il contenuto naturale d'acqua ( $W_n$ ) si definisce come il rapporto tra il peso dell'acqua interstiziale  $P_a$  e quello  $P_s$  delle particelle costituenti lo scheletro solido. La determinazione del contenuto d'acqua risulta di fondamentale importanza, soprattutto per tipologie litologiche avente la componente coesiva dominante; l'analisi incrociata di  $W_n$  con i risultati di altri semplici test quali, ad esempio, i limiti di Atterberg consente di ottenere non poche indicazioni sul comportamento fisico-meccanico delle terre.

La definizione di *contenuto d'acqua* individua il quantitativo di acqua presente nei vuoti della struttura solida del terreno (ovvero "l'acqua libera") e non quella presente nella struttura mineralogica dei minerali argillosi invece contraddistinta da caratteristiche chimico-fisiche assai differenti.

Il prelievo e la conservazione dei campioni di terreno da esaminare dovrà avvenire secondo procedure adeguate in grado di preservare le caratteristiche originarie delle terre. I contenitori di stoccaggio dovranno possedere adeguate caratteristiche di tenuta stagna e incorrodibilità, essere rapidamente trasportati dal luogo di prelievo al laboratorio evitando esposizione diretta ai raggi solari (perdita di umidità per surriscaldamento) e conservati durante il trasporto a temperature comprese tra 3 °C e 25 °C circa.

Risulta oltremodo evidente come anche in condizioni ottimali di prelievo e trasporto il fattore tempo risulti la variabile determinante per la validità del test: minore è il tempo trascorso tra prelievo ed esecuzione test maggiore risulterà l'attendibilità del test medesimo.

### 2.3.3. Apparecchiatura di prova

L'attrezzatura di base necessaria all'esecuzione del test è la seguente:

- 1) forno geotecnico termostatico capace di mantenere una temperatura di  $110 \pm 5$  °C;
- 2) bilance di varia sensibilità, a seconda dell'entità della pesata: 0,01 g per pesate < 200 g; 0,1 g per pesate comprese tra 200 e 1000 g; 1 g per pesate > 1000 g;
- 3) essiccatore per il raffreddamento del campione secco in un ambiente privo di umidità.

### 2.3.4. Procedura di prova

La rappresentatività del test deve essere garantita dall'utilizzo di adeguati quantitativi di terreno proporzionali ai caratteri litologici del campione medesimo: nel caso di depositi coesivi a struttura omogenea risultano sufficienti poche decine di grammi di materiale (30-35 g); nel caso di terreni a elevata disomogeneità e/o a grana grossolana occorre procedere in modo differente definendo la quantità minima necessaria in rapporto alla percentuale di trattenuto (10%) ai setacci ASTM 10-4-3/4"-1½"-3". Nella tabella 2.4 vengono fornite le quantità minima di terra necessaria per esecuzione della prova.

Setacci ASTM	Trattenuto (%)	Quantità minima di campione umido (g)
10	10	100/200
4	10	300/500
3/4"	10	500/1.000
1-1/2"	10	1.500/3.000
3"	10	5.000/10.000

Tabella 2.4. Quantità minima di terra necessaria per la corretta determinazione di  $W_n$

Il provino di terreno naturale viene posto all'interno di un contenitore di peso noto ( $P_t$ ), viene pesato (ottenendo  $P_{lu}$  – peso umido lordo), quindi essiccato in forno geotecnico a 110 °C; nel caso di terreni a elevato contenuto organico (limi torbosi) risulta più appropriato procedere all'essiccamento a temperature non superiori a 60 °C allungando i tempi di stazionamento in forno.

Al termine del processo di essiccazione dopo aver raggiunto condizioni di peso costante al variare dell'unità di tempo il campione viene fatto raffreddare a temperatura ambiente all'interno di un apposito contenitore a tenuta (essiccatore), ovviando all'assorbimento dell'umidità naturalmente presente nell'aria. Si procede quindi alla determinazione mediante pesatura del peso secco lordo ( $P_{ls}$ ).

La prova dovrà prevedere l'esecuzione di un minimo di 2-3 determinazioni mediando aritmeticamente i risultati ottenuti.

La determinazione dell'umidità naturale risulta scarsamente significativa nella seguente casistica:

- terre comprendenti notevoli quantità di montmorillonite gesso e halloysite in virtù dell'assunzione teorica che nel campione l'unico elemento volatile sia rappresentato dall'acqua interstiziale;
- terre fortemente organiche;
- terre nelle quali l'acqua interstiziale contenga solidi disciolti (ad esempio sale nei depositi marini).

Risulta assai interessante sottolineare come all'interno di sedimenti coesivi il contenuto d'acqua naturale possa variare notevolmente: in limi ed argille a forte grado di sovraconsolidazione si possono riscontrare valori di  $W_n$  assai contenuti (6-8%) mentre in argille a elevato contenuto montmorillonitico il contenuto può arrivare al 900%; egualmente in depositi limosi con frazioni torbose,  $W_n$  può presentarsi con valori compresi tra 300-700%.

### 2.3.5. Elaborazione dei risultati

Il contenuto naturale d'acqua  $W_n$ , espresso in percentuale, viene calcolato nel modo seguente:

$$W_n = \frac{P_{lu} - P_{ls}}{P_{ls} - P_t} \cdot 100$$

dove

$W_n$  = contenuto naturale d'acqua

$P_{lu}$  = peso umido lordo

$P_{ls}$  = peso secco lordo

$P_t$  = peso tara.

Come in precedenza accennato il valore finale di  $W_n$  si ottiene mediando aritmeticamente i risultati delle differenti determinazioni condotte ovvero:

$$W = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_n}{N}$$

#### ESEMPIO DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO D'ACQUA

Parametri	N. prova	
	01	02
Peso tara $P_t$ (g)	23,04	20,96
Peso umido lordo $P_u$ (g)	89,60	96,26
Peso secco lordo $P_s$ (g)	83,71	89,57
$W_n$ (%)	9,70	9,75
$W_n$ medio	9,725 %	

Tabella 2.5. Determinazione del contenuto d'acqua

## 2.4. Prove per la classificazione delle terre

### 2.4.1. Norme di riferimento

Le norme di riferimento per quanto riguarda la classificazione delle terre sono le seguenti:

- AASHTO T 27, T 88;
- ASTM D 420-85, D 422-63, D 1140-71, D 2217-85;
- BS 1377, Part 2, 1990;
- UNI 2334, 8520 – Parte 5<sup>a</sup>;
- CNR Anno V, n. 23-1971.

### 2.4.2. Premessa

La classificazione geotecnica delle terre consente, attraverso l'applicazione di procedure sistematiche, di conoscere i caratteri costitutivi di un determinato terreno giungendo a una prima delineazione qualitativa delle caratteristiche e del comportamento meccanico generale che lo contraddistinguono. Allo stato dell'arte attuale si è giunti a un'analisi critica incrociata delle varie normative nazionali e internazionali (U.S. Standard, British Standard, CNR-UNI, ecc.) definendo protocolli differenti ma assai rigorosi al fine di rendere in tal modo attuabile il confronto dei risultati in contesti geologici e territoriali anche assai diversificati.

### 2.4.3. Analisi granulometrica

Finalità del test granulometrico è quella di definire la distribuzione percentuale in peso dei granuli di diverso diametro che compongono un determinato terreno.

Nel seguito verranno trattate le procedure relative all'esecuzione di analisi granulometriche complete ovvero in grado di fornire la curva caratteristica del fuso granulometrico rappresentativa di tutte le frazioni costituenti (ghiaia, sabbia, limo e argilla).

L'analisi granulometrica completa si compone di due differenti test di prova propedeutici alla definizione dei tratti di curva delle frazioni granulari (ghiaia e sabbia) e delle frazioni fini (limo e argilla) attraverso:

- l'analisi granulometrica per vagliatura meccanica;
- l'analisi granulometrica per sedimentazione (aerometria).

La vagliatura meccanica viene riservata alle frazioni costitutive con granuli di diametro di dimensione superiore a 0,075 mm; la sedimentazione viene attuata per l'analisi dimensionale delle frazioni fini ovvero con diametro inferiore a 0,075 mm (passante al setaccio UNI 0,075 o ASTM 200).

I risultati ottenuti vengono rappresentati su un apposito diagramma semilogaritmico con percentuale passante in ordinata (scala lineare) e diametro dei granuli  $D$  in ascisse (scala logaritmica), dove  $D$  rappresenta il lato della maglia del setaccio. I punti ottenuti vengono quindi uniti ottenendo la curva caratteristica del terreno esaminato definita come *curva granulometrica*. Ciascun punto di tale curva indica perciò la percentuale di passante al setaccio di maglia con lato  $D$ .

#### 2.4.3.1. Preparazione del campione

Il campione viene sottoposto a essiccazione preferibilmente in forno geotecnico sebbene alcune procedure consentano la deidratazione all'aria aperta. Al termine dell'essiccazione gli eventuali agglomerati di terreno vengono eliminati mediante preparazione in mortaio, utilizzando un apposito pestello gommato, agendo con attenzione al fine di non danneggiare la geometria dei singoli grani (per frantumazione).

La significatività dell'analisi dovrà essere garantita dall'assunzione in prova di un quantitativo idoneo di terreno strettamente dipendente dalle dimensioni dei granuli più grossolani presenti, in percentuale maggiore del 10%. La determinazione della minima quantità di materiale necessaria viene quindi definita attraverso la tabella di riferimento (normativa nazionale) riportata in tabella 2.6.

Dimensione del grano maggiore (mm)	Peso approssimativo campione di prova (kg)
100	35
71	25
60	25
40	10
25	5
15	2
10	1
5	0,5
2	0,2

Tabella 2.6. Quantità minima di terra necessaria per analisi granulometrica

##### 2.4.3.1.1. Quartatura del campione

Il campione rappresentativo da sottoporre ad analisi granulometrica secondo i quantitativi minimi sopra esposti viene ottenuto mediante selezione per quartatura ovvero utilizzando il metodo dei quarti o attraverso l'ausilio di un apposito strumento (quartatore).

La procedura applicativa del metodo dei quarti è la seguente:

- selezione e accurata mescolatura di una certa quantità di terreno;
- procedere a una prima suddivisione in 4 parti mediante un separatore, costituito nelle tipologie più semplici da due setti separatori ortogonali;
- prendere il materiale di due quadranti opposti;
- rimescolarlo nuovamente ottenendo un nuovo campione unico;
- procedere a nuova suddivisione in 4 parti;
- selezione definitiva del campione di prova mescolando le porzioni di terra di due quadranti opposti.

##### 2.4.3.2. Analisi per vagliatura meccanica

L'analisi granulometrica per vagliatura meccanica viene utilizzata per le frazioni costitutive contraddistinte da granuli con diametro di dimensioni maggiori a 0,075 mm.