

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O.: CORPO STRADALE E GEOTECNICA

PROGETTO PRELIMINARE

NUOVA LINEA AV/AC VENEZIA - TRIESTE
TRATTA PORTOGRUARO - RONCHI DEI LEGIONARI

RILEVATI E TRINCEE

Relazione geotecnica generale

SCALA :

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

L346 00 R 11 RB GE0005 001 A

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione esecutiva	A.Ingletti	29/10/10	P.Tascione	02/11/10	D.Fochesato	03/11/10		

U.O. CORPO STRADALE E GEOTECNICA
 Dott. Ing. FRANCESCO SACCHI
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
 n° A23172
 ITALFERR S.p.A.

File: L34600R11RBGE0005001A.doc

n.Elab.:

267



Questo progetto è cofinanziato dalla Comunità Europea

INDICE

2. PREMESSA	4
3. CARATTERI GEOLOGICI E STRATIGRAFICI	6
3.1 Lineamenti geologico-stratigrafici generali.....	6
3.2 Modello geologico del sottosuolo.....	9
3.2.1 <i>Depositi Alluvionali Antichi (6)</i>	9
3.2.2 <i>Depositi Alluvionali Recenti (5)</i>	10
3.2.3 <i>Depositi Alluvionali dei Paleoalvei (4) e Unità Ubiquitarie (3)</i>	11
3.2.4 <i>Depositi Alluvionali Attuali (2)</i>	12
3.3 Assetto idrogeologico generale.....	13
3.4 Caratteri idrogeologici nell'area di progetto.....	16
4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	19
4.1 Caratteri geotecnici generali del sottosuolo.....	19
4.2 Definizione delle Unità Geotecniche.....	23
4.2.1 – <i>Unità coesive di natura argilloso-limosa e limo-sabbioso-argillosa – Unità A e B</i>	25
4.2.2 – <i>Unità dei depositi sabbiosi e sabbioso ghiaiosi – Unità C-D</i>	43
4.3 – Suscettività dei terreni alla liquefazione.....	63

1. NORME E RIFERIMENTI

1.1 - D. M. 11/3/1988: Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle opere di fondazione.

1.2 - Circolare Min. LL. PP. 24/9/1988 n. 30483: Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

1.3 - Associazione Geotecnica Italiana - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - Giugno 1977.

1.4 - *Ordinanza del 20/03/2003 n. 3274 e s.m.i.* "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".

1.5 – D.M. 14/01/2008 - Norme tecniche per le costruzioni

1.6 – Campagna di indagini geognostiche Luglio 2010 - Vicenzetto: Sondaggi a carotaggio continuo

1.7 - Relazione tra angolo di attrito ϕ' delle sabbie e valori di N_{spt} tenendo conto dell'influenza del peso del terreno sovrastante σ'_{vo} (De Mello, 1971).

1.8 - Relazione tra N_{spt} e densità relativa D_r delle sabbie (Gibbs e Holtz, 1957).

1.9 - "Application of N-value to design of foundation in Japan" - Shioi Y. e Fukui J. (1992) - Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing - Amsterdam

1.10 - Guida per la classificazione dei terreni da risultati di prove CPT con punta elettrica standard – (Douglas, Olsen R., 1981)

1.11 – Stima del Modulo confinato drenato M da risultati di prove CPT – (Mitchell e Gardner, 1975)

2. PREMESSA

Ai fini dello studio di classificazione geotecnica del sottosuolo prevista nell'ambito del Progetto Preliminare della Tratta ferroviaria Portogruaro – Ronchi dei Legionari sulla linea AV/AC Venezia - Trieste, sono stati utilizzati sia i risultati delle determinazioni eseguite in laboratorio sui campioni indisturbati prelevati in fase di sondaggio geognostico, sia l'insieme di dati ed osservazioni relative alla caratterizzazione dei materiali redatta in sede di indagine geognostica (campagne 2010 e 2005).

Lo studio è stato condotto attraverso le seguenti attività:

- acquisizione ed analisi degli studi geologici e geomorfologici generali riguardanti l'area in studio;
- studio di dettaglio delle caratteristiche geologico-stratigrafiche del sottosuolo;
- analisi dettagliata dei caratteri stratigrafici del sottosuolo attraverso l'esame delle stratigrafie dei sondaggi geognostici eseguiti (campagne 2005 e 2010);
- acquisizione ed analisi delle risultanze delle prove penetrometriche statiche CPTU (campagna 2004);
- acquisizione ed analisi delle risultanze delle prove in sito;
- Studio e interpretazione delle risultanze delle prove geotecniche di laboratorio;

In particolare, l'analisi geotecnica si è basata sullo studio dei dati stratigrafici e litologico-tecnici a disposizione nonché sulle risultanze delle prove geotecniche eseguite in sito, rappresentate da prove penetrometriche dinamiche a fondo foro SPT, prove penetrometriche statiche CPTU, e da misure di

consistenza al penetrometro o scissometro tascabile sulle carote di materiale coesivo estratte in fase di perforazione.

Sulla base di quanto emerso dall'esame comparato dell'insieme dei dati a disposizione di carattere litologico e geotecnico, e tenuto conto della geologia dell'area in esame, si è proceduto alla definizione di "Unità Geotecniche", formate da differenti terreni assimilabili per caratteristiche fisico-meccaniche, su cui impostare successivamente l'analisi geotecnica e definire un modello geotecnico del sottosuolo.

In fase di determinazione dei terreni tipo si è operata una distinzione basata sulle differenze litologiche o fisico-meccaniche evidenziabili anche nell'ambito di una stessa formazione, con particolare riferimento alla suddivisione tra terreni a comportamento coesivo e litotipi di natura prevalentemente granulare.

Nella identificazione delle diverse Unità geotecniche si è seguito complessivamente il criterio adottato in sede di studio geologico, procedendo pertanto ad una differenziazione dei diversi litotipi in base sia, ovviamente, ai caratteri litologici e granulometrici evidenziati dalle indagini geognostiche, sia al diverso ambiente di sedimentazione, sia, infine, alle diverse età di messa in posto del deposito, suddividendo le unità più antiche da quelle di recente e recentissima sedimentazione.

3. CARATTERI GEOLOGICI E STRATIGRAFICI

3.1 Lineamenti geologico-stratigrafici generali

L'area oggetto di studio ricade nella porzione nord-orientale della Pianura Veneto – Friulana, in prossimità del limite amministrativo che separa la regione Veneto dalla regione Friuli Venezia Giulia, delimitata a sud dal Mare Adriatico ed a est dalla Slovenia. Nello specifico il tracciato di progetto si snoda su una lunghezza complessiva pari a 48.117 Km.

Il territorio in esame è sostanzialmente pianeggiante ed ubicato nel settore posto immediatamente a nord dell'area compresa tra la Laguna di Caorle ed il Golfo di Panzano. In particolare, il tracciato attraversa dei territori occupati in passato da ambienti lagunari o palustri, successivamente bonificati e caratterizzati da quote medie che poco si discostano dal livello base. Tali sedimenti terrigeni, quaternari ed attuali, si attestano su un basamento di età per lo più terziaria costituito da successioni prevalentemente silicoclastiche e solo subordinatamente carbonatiche.

I principali corsi d'acqua dell'area presentano un andamento circa NNW-SSE e si sviluppano dalle Alpi veneto-friulane fino alle aree lagunari di Caorle e Marano, nonché al Mare Adriatico. Procedendo da ovest verso est, i corsi d'acqua più importanti sono rappresentati dai Fiumi Tagliamento ed Isonzo, ai quali si aggiungono corsi d'acqua secondari quali il Fiume Stella, il Fiume Cormor, il Canale Ledra ed il Fiume Natisone, quest'ultimo affluente destro del Fiume Isonzo. Tali corsi d'acqua sono attualmente arginati e presentano alvei spesso pensili rispetto alle pianure alluvionali circostanti. Queste ultime, infine, sono attraversate da una fitta rete di canali di bonifica che garantiscono il deflusso idrico

verso mare e sono supportati da sistemi di idrovore per il sollevamento meccanico delle acque e la bonifica artificiale delle aree più depresse

L'assetto stratigrafico del territorio in studio è rappresentativo della storia geologica tardo-pleistocenica e olocenica dell'esteso settore di pianura che si affaccia sulla porzione più settentrionale del Mar Adriatico, pressoché interamente occupato da depositi alluvionali, palustri, lagunari e marino-salmastri di età compresa tra il Pleistocene medio-superiore e l'Olocene

La messa in posto e l'attuale assetto morfo-stratigrafico dei suddetti depositi sono strettamente connessi ai numerosi cicli di ingressione e regressione marina, che hanno regolato l'evoluzione dei diversi cicli di erosione-sedimentazione dei corsi d'acqua causando ripetutamente il rimodellamento e la reincisione dell'attuale pianura e dei relativi fronti deltizi.

Gli ambienti deposizionali dell'area in esame, a causa delle complesse dinamiche di trasporto e rimescolamento dei sedimenti, risultano caratterizzati da litologie molto variabili tra loro.

Si possono distinguere comunque, in linea generale, quattro principali tipi di ambienti deposizionali, tutti corrispondenti all'ultima fase dell'evoluzione sedimentologica dell'area iniziata nel tardo Pliocene e perdurata per tutto il Quaternario.

I diversi ambienti deposizionali individuabili nell'area di studio sono i seguenti:

- ambiente deposizionale alluvionale o fluviale;
- ambiente deposizionale deltizio;
- ambiente deposizionale litorale (lagunare e di spiaggia);

La genesi della pianura veneto-friulana è legata principalmente allo sviluppo dei grandi fiumi che la attraversano, quali il Fiume Tagliamento, il Piave, il Brenta e l'Isonzo, caratterizzati da estesi bacini idrografici alpini, sede di numerosi ed imponenti ghiacciai nel Pleistocene. Il progredire dell'azione erosiva, nonché deposizionale di tali corsi d'acqua ha dato vita alla formazione degli ampi sistemi dei megafan alluvionali che caratterizzano geologicamente e geomorfologicamente l'area in esame.

L'attuale assetto geologico e geomorfologico della pianura veneto-friulana deve la sua genesi agli eventi erosivi e deposizionali succedutisi durante le fasi finali dell'Ultimo Massimo Glaciale o LGM (Last Glacial Maximum).

Di seguito si riporta una breve sintesi riguardo i processi geologici e geomorfologici esplicitatisi durante il LGM.

- **PRE-LGM** (>30.000 anni fa): durante questo periodo la pianura è interessata da una notevole fase di sedimentazione. Dai dati emersi dai sondaggi effettuati nell'area si desume, inoltre, che nel sottosuolo della bassa pianura veneto-friulana, sono presenti depositi prevalentemente limosi e limoso-argillosi con sottili canali sabbiosi a geometria lentiforme.
- **LGM** (30.000-17.000 anni fa): in questo periodo si svolge uno dei maggiori processi morfoevolutivi interessanti l'intero settore nord-orientale italiano, in cui i ghiacciai raggiungono la loro massima espansione pleistocenica. Le condizioni ambientali, glaciali e periglaciali, che si instaurano durante questo periodo favoriscono una notevole produzione di detriti che favorisce lo sviluppo dei grandi sistemi alluvionali e deposizionali dei megafan alluvionali dei fiumi Tagliamento e

Piave i quali materializzano la progressiva formazione dell'intera ed attuale area di pianura

- **POST-LGM** (17.000 ad oggi): la fine del LGM è segnata dall'inizio del periodo Tardoglaciale, durante il quale l'intera area pianeggiante subisce un'ulteriore fase di evoluzione. Tale fase si caratterizza per la totale mancanza di sedimentazione e per il potere erosivo che acquisiscono i corsi d'acqua, i quali si trovano ora in forte fase di approfondimento.

3.2 Modello geologico del sottosuolo

In relazione ai descritti caratteri geologico-stratigrafici e geomorfologici, nell'area oggetto di studio possono individuarsi le seguenti tipologie di depositi, descritte dal basso verso l'alto stratigrafico (la numerazione indicata tra parentesi si riferisce alla legenda della Relazione geologica e dell'allegata Carta Geologica).

3.2.1 Depositi Alluvionali Antichi (6)

Questi terreni rappresentano i depositi maggiormente affioranti e stratigraficamente più bassi tra quelli presenti nell'intera area di studio. Si tratta, in particolare, di sedimenti di origine alluvionale, almeno parzialmente connessi con la fase di avanzamento e massima espansione dei ghiacciai durante il *Last Glacial Maximum*.

Affiorano estesamente nell'intero settore esaminato e in alcuni settori del territorio sono ricoperti dai depositi alluvionali di recente e recentissima deposizione. Il complesso dei depositi alluvionali antichi può considerarsi costituito dall'alternarsi continuo delle seguenti litologie:

- Ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose arrotondate e sub-arrotondate, da fini a grossolane, con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa più o meno abbondante e tessitura variabile da supporto di matrice a supporto di clasti; sabbie e sabbie limose con locali passaggi a limi e limi sabbiosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare, tabulare o nastriforme e corrispondono a depositi di canale fluviale, argine e ventaglio di rotta.
- Limi, limi argillosi e limi sabbiosi, talora organici o torbosi, con locali intercalazioni di sabbie e sabbie limose. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o tabulare e corrispondono a depositi di piana inondabile.
- Argille, argille limose e argille sabbiose, spesso ricche in sostanza organica, con rari resti di gasteropodi palustri (*pulmonata*) e con locali intercalazioni di torbe o di argille e limi torbosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o tabulare e corrispondono a depositi di palude di acqua dolce, lago di meandro e canale in fase di abbandono.

La loro età è datata al Pleistocene Superiore (110.000 a.C. – 15.000 a.C.).

3.2.2 Depositi Alluvionali Recenti (5)

Tali depositi sono costituiti da sedimenti alluvionali connessi con il penultimo ciclo deposizionale dei corsi d'acqua presenti nell'area.

Anche detto complesso è costituito da diverse litofacies in contatto eteropico tra loro:

- Ghiaie arrotondate, da fini a grossolane, con matrice sabbiosa più o meno abbondante e tessitura variabile da supporto di matrice a supporto di clasti; sabbie, sabbie limose e sabbie argillose, talora in alternanza con limi, limi

argillosi e limi sabbiosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o nastriforme e corrispondono a depositi di canale fluviale, argine, golena e ventaglio di rotta fluviale.

- Limi, limi argillosi e limi sabbiosi, talora organici o torbosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o tabulare e corrispondono a depositi di piana inondabile.
- Argille, argille limose e argille sabbiose, spesso ricche in sostanza organica, con locali intercalazioni di torbe o argille e limi torbosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare, tabulare o nastriforme e corrispondono a depositi di palude di acqua dolce, lago di meandro e canale in fase di abbandono.

La loro età è Pleistocene Superiore - Olocene Sin-Romano (15.000 a.C. – IV-V sec. d.C.).

3.2.3 Depositi Alluvionali dei Paleoalvei (4) e Unità Ubiquitarie (3)

I depositi alluvionali dei paleoalvei sono composti da sedimenti alluvionali connessi al riempimento di antichi alvei fluviali abbandonati. I depositi delle Unità ubiquitarie sono costituiti da sedimenti di genesi alluvionale connessi con le incisioni dei corsi di risorgiva e del drenaggio locale.

Sono complessivamente poco rappresentati nel territorio interessato dal tracciato e comprendono essenzialmente due diversi litotipi:

- Ghiaie arrotondate, da medie a fini, con matrice sabbiosa più o meno abbondante e tessitura variabile da supporto di matrice a supporto di clasti, con locali intercalazioni di limi e limi sabbiosi. Formano corpi sedimentari a

geometria lenticolare o nastriforme e corrispondono a depositi di canale fluviale.

- Argille limose e limi argillosi, spesso ricchi in sostanza organica, con locali intercalazioni di torbe o di argille e limi torbosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o nastriforme e corrispondono a depositi di disattivazione dell'alveo e di lago di meandro.

La loro età è Pleistocene Superiore - Olocene (15.000 a.C. - Attuale).

3.2.4 Depositi Alluvionali Attuali (2)

Tali depositi sono composti da sedimenti alluvionali connessi con l'ultimo ciclo deposizionale dei corsi d'acqua presenti nell'area.

Si presentano costituiti da una alternanza laterale e verticale tra le seguenti facies:

- Ghiaie sabbiose arrotondate, da medie a grossolane, con matrice sabbiosa più o meno abbondante e tessitura variabile da supporto di matrice a supporto di clasti; sabbie, sabbie limose e sabbie argillose, talora in alternanza con limi, limi argillosi e limi sabbiosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o nastriforme e corrispondono a depositi di canale fluviale, argine, golena e ventaglio di rotta fluviale.
- Limi, limi argillosi e limi sabbiosi, talora organici o torbosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o tabulare e corrispondono a depositi di piana inondabile.
- Argille, argille limose e argille sabbiose, spesso ricche in sostanza organica, con locali intercalazioni di torbe o ad argille e limi torbosi. Formano corpi

sedimentari a geometria lenticolare, tabulare o nastriforme e corrispondono a depositi di palude di acqua dolce, lago di meandro o canale in fase di abbandono.

- Torbe spesso associate a sedimenti limoso-argillosi. Formano corpi sedimentari a geometria lenticolare o tabulare e corrispondono a depositi di palude d'acqua dolce.

La loro età è riferibile all'Olocene Post-Romano (IV-V sec. d.C. – Attuale).

3.3 Assetto idrogeologico generale

I dati raccolti durante lo studio condotto, di carattere geologico e idrogeologico, hanno permesso di definire le caratteristiche generali dell'area e di individuare, in linea generale, il regime di deflusso idrico sotterraneo proprio dei settori di interesse.

Nel complesso, la pianura veneto-friulana è una idrostruttura alluvionale costituita sostanzialmente da depositi prevalentemente ghiaiosi nella zona a monte e sabbioso-ghiaiosi a valle e contenente una falda freatica che, ancora verso valle, emerge dal piano campagna, alimentando una fascia di risorgive ed una articolata serie di falde artesiane.

Nel dettaglio il tracciato di progetto interessa un territorio con caratteri idrogeologici sostanzialmente omogenei, corrispondente al settore della bassa pianura, caratterizzata da un sistema di falde in pressione alloggiate nei livelli sabbioso-ghiaiosi permeabili e separate da orizzonti impermeabili o semi-permeabili argilloso-limoso-sabbiosi.

Il settore dell'area friulana comprende l'area individuabile tra il fiume Tagliamento e l'abitato di Cervignola del Friuli. E' costituita da depositi alluvionali a fine granulometria (sabbie, argille e limi). Nella bassa pianura le acque di falda portate a giorno dal sistema delle risorgive vanno a costituire una rete idrografica piuttosto sviluppata, copiosamente alimentata, quasi sempre regimata, che sfocia nel sistema lagunare.

Dall'analisi dello schema idrogeologico nel sottosuolo di tale zona, compresa tra i fiumi Tagliamento e Isonzo, sono individuabili i caratteri generali di sette falde artesiane "superficiali" comprese tra 30 e 300 metri di profondità.

L'area di Portogruaro è caratterizzata da un assetto idrogeologico definito dall'alternanze discontinue di litotipi prevalentemente argilloso-limosi, dotati di permeabilità bassa o molto bassa, con litotipi prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi con permeabilità medio-alta. Questi ultimi sono generalmente sede di falde di discreta rilevanza, anche se con scarsa continuità laterale e marcata variabilità dello spessore degli acquiferi. In superficie è generalmente presente una falda freatica o semiconfinata con soggiacenza di pochi metri dal piano campagna.

L'idrogeologia generale dell'area è quindi caratterizzata da un sistema di falde in pressione sovrapposte, alloggiate nei permeabili livelli sabbioso-ghiaiosi, separate da orizzonti impermeabili o semi-impermeabili argilloso-limoso-sabbiosi.

Nella zona di transizione tra l'alta e la media pianura sono presenti, in un ampio areale, le numerose emergenze idriche che danno luogo alla nota fascia delle risorgive, che identifica il limite dove parte delle acque della falda freatica, che a nord permea i sedimenti ghiaiosi, vengono alla luce in virtù della diminuzione della permeabilità dei depositi, mentre nel sottosuolo si sviluppa un complesso sistema di falde artesiane.

Dette emergenze, oltre a dar luogo presso le polle ad aree umide di particolare valenza ambientale e paesaggistica, alimentano una serie di corsi d'acqua caratteristici del territorio in esame. Tali corsi d'acqua con i loro sistemi hanno occupato le aree depresse d'interpluvio, come nel caso dei fiumi di Corno e Nogaro.

Nel territorio provincia di Udine, partendo dalla Linea delle risorgive e proseguendo verso sud, l'acquifero freatico ampiamente sviluppato nell'Alta pianura, si suddivide in un complesso multifalda caratterizzato da livelli ghiaioso-sabbiosi variamente intercalati a depositi argillosi sempre più frequenti e potenti. A cavallo della fascia delle risorgive si ha, quindi, una modesta falda freatica superficiale e alcune falde in pressione collegate verso monte con l'acquifero freatico. A valle della Linea delle risorgive, la falda freatica non è più presente con continuità, non essendoci depositi sufficientemente permeabili negli strati superficiali. L'intera zona si caratterizza, pertanto, per la presenza di sistemi multifalda artesiani che subiscono una generale diminuzione di potenza e di permeabilità, procedendo da nord verso sud e da est verso ovest.

La linea delle risorgive può subire notevoli spostamenti con le oscillazioni della superficie piezometrica della falda. La "fascia delle risorgive", in funzione delle caratteristiche locali dei terreni, delle pendenze superficiali e delle portate idriche stagionali può raggiungere l'ampiezza di qualche chilometro trasversalmente alla linea cartografata. Ciò vale in particolare per l'area friulana, in cui, il tracciato di progetto si avvicina alla linea delle risorgive fino ad accostarvisi a sud di Palmanova ed in prossimità del fiume Isonzo.

3.4 Caratteri idrogeologici nell'area di progetto

Per una ricostruzione delle caratteristiche della circolazione idrica sotterranea nelle immediate adiacenze del settore attraversato dal tracciato di progetto si è fatto riferimento alla notevole mole di dati idrogeologici generali e di dettaglio relativi a questo specifico settore della bassa pianura friulano-veneta, noti da fonti bibliografiche, nonché alle informazioni piezometriche ricavate dalle indagini geognostiche effettuate in asse alla linea ferroviaria di progetto.

In linea generale, gran parte del territorio interessato è caratterizzato da un assetto idrogeologico definito dall'alternanze discontinue di litotipi prevalentemente argilloso-limosi, dotati di permeabilità bassa o molto bassa, più frequenti nella parte occidentale del tracciato, con litotipi prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi con permeabilità medio-alta, prevalenti nel settore orientale.

Questi ultimi sono generalmente sede di falde di discreta rilevanza, anche se con scarsa continuità laterale e marcata variabilità dello spessore degli acquiferi. In superficie è generalmente presente una falda freatica o semiconfinata con soggiacenza di pochi metri dal piano campagna

In relazione a quanto emerso dal suddetto studio si è evidenziato quanto segue:

Tratto compreso tra il km 0+000 e il km 4+230

Si sottolinea la presenza di una falda freatica con superficie piezometrica posta circa 2.0 m sotto il p.c..

Tratto compreso tra il km 4+230 e il km 7+290

Non sono disponibili dati circa l'eventuale presenza di una falda all'interno degli orizzonti più permeabili, ma si presume la presenza di una falda fratica molto superficiale.

Tratto compreso tra il km 7+290 e il km 10+250

Presenza di una falda freatica con superficie piezometrica posta tra 2.0 e 3.7 m sotto il p.c..

Tratto compreso tra il km 10+250 e il km 16+520

Si sottolinea la presenza di una falda semiartesiana con superficie piezometrica posta circa 3.2 m sotto il p.c..

Tratto compreso tra il km 16+520 e il km 17+830

Si segnala la presenza di una falda semiartesiana con superficie piezometrica posta in prossimità del p.c..

Tratto compreso tra il km 17+830 e il km 21+410

Sotto il profilo idrogeologico, non sono disponibili dati circa l'eventuale presenza di una falda all'interno degli orizzonti più permeabili ma si presume la presenza di una falda fratica molto superficiale.

Tratto compreso tra il km 21+410 e il km 25+850

Presenza di una falda, freatica o semiartesiana, con superficie piezometrica posta circa al p.c..

Tratto compreso tra il km 25+850 e il km 35+760

Non sono disponibili dati circa l'eventuale presenza di una falda all'interno degli orizzonti più permeabili ma si presume la presenza di una falda fratica molto superficiale.

Tratto compreso tra il km 35+760 e il km 37+290

Presenza di una falda, freatica o semiartesiana, con livello piezometrico posto a circa tra 1.0 m sotto il p.c..

Tratto compreso tra il km 37+290 e il km 37+870

Presenza di una falda, freatica o semiartesiana, con superficie piezometrica posta tra 1.5 e 3.0 m dal p.c..

Tratto compreso tra il km 37+870 e il km 44+240

Presenza di una falda, freatica o semiartesiana, con livello piezometrico posto a circa 4.0 m dal p.c.. A tal riguardo è importante segnalare che il tracciato, in prossimità del km 44+100 circa, intercetta la linea di probabile emergenza delle risorgive. Ciò rappresenta un elemento di importante criticità geotecnica in relazione alle citate possibili oscillazioni stagionali del livello di falda anche sopra il p.c..

Tratto compreso tra il km 44+240 e il km 45+724

Presenza di una falda, freatica o semiartesiana, con superficie piezometrica posta tra 2.5 e 3.8 m sotto il p.c.. In relazione alla citata linea delle risorgive, anche in questo settore sono possibili marcate variabilità stagionali del livello di falda, talora con locale risalita del livello di falda anche sopra il p.c..

Tratto compreso tra il km 45+724 e il km 46+796

Non sono disponibili dati circa l'eventuale presenza di una falda all'interno degli orizzonti più permeabili. Occorre sottolineare tuttavia che la linea delle risorgive ricade poche centinaia di metri a sud della linea ferroviaria in progetto e che, a causa della forte variabilità spaziale, ciò rappresenta un elemento di particolare attenzione anche per la presente area.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

4.1 Caratteri geotecnici generali del sottosuolo

I caratteri geotecnici dell'area attraversata dalla tratta ferroviaria di progetto appaiono strettamente connessi alla storia geologica ed all'assetto geomorfologico di questo specifico settore della pianura veneto-friulana.

L'intero pacco di sedimenti che caratterizza il sottosuolo fino a profondità dell'ordine dei 50 metri comprende una potente successione di depositi alluvionali litologicamente molto eterogenei, caratterizzati da una marcata variabilità litologica e granulometrica, sia in senso laterale, che verticale, depositisi per gran parte tra la parte finale dell'ultimo massimo glaciale o LGM (Pleistocene superiore) fino all'attuale.

L'analisi dei dati stratigrafici relativi alle numerose indagini geognostiche e geotecniche a disposizione ha infatti evidenziato come il complesso alluvionale sia nel suo insieme rappresentato dalla continua alternanza tra depositi di natura coesiva, da limosi a argilloso-limosi a limo-sabbioso-argillosi, localmente di natura

organica, e litotipi di natura granulare, da medio fini, di natura sabbiosa e sabbioso-limosa, fino a grossolani, ovvero comprendenti più o meno estesi banchi di sabbie con clasti e ciottoli fino a livelli di ghiaie e ghiaie sabbiose.

In linea generale, i *Depositi Alluvionali Recenti e Attuali*, che occupano soprattutto le piane dei maggiori corsi d'acqua presenti nel territorio, costituiti dal F. Tagliamento, F. Stella, F.Corno, F.Aussa e F.Isonzo, non evidenziano sostanziali diversità litologiche e granulometriche rispetto ai *Depositi Alluvionali Antichi pre-olocenici* entro cui essi risultano incassati, che contraddistinguono il sottosuolo fino a profondità dell'ordine dei 50 metri dal piano campagna.

Nell'ambito del complesso delle facies di natura limo-argillosa e argilloso-limosa che caratterizzano entrambe le successioni, l'esame dei dati geognostici e geotecnici a disposizione sembra invece evidenziare una minore consistenza nella parte superiore del materasso alluvionale, fino a profondità dei 16-17 metri, a fronte di litotipi argilloso-limosi da mediamente consistenti a consistenti, financo a molto consistenti, che caratterizzano il sottosuolo a maggiore profondità, soprattutto nell'intervallo tra 20 e 40 metri.

Le caratteristiche geotecniche dei depositi di natura coesiva presenti fino a profondità di 16-17 metri, in termini di resistenza e deformabilità, sono da considerarsi da scadenti a mediocri, in relazione sia alle proprietà litologiche dei rispettivi depositi, prevalentemente fini o molto fini e localmente di natura organica, sia, soprattutto, alla recente età di sedimentazione, cui sono legati i modesti stati di consolidazione e la ridotta consistenza riscontrata in sede di indagine.

La deformabilità, in particolare, deve ritenersi elevata, soprattutto in corrispondenza degli orizzonti argilloso-limosi e limoso-argillosi, talora organici, di recente e recentissima deposizione presenti nei primi 8-10 metri.

L'elevata compressibilità degli orizzonti coesivi della porzione superiore del sottosuolo rappresenta una delle maggiori problematiche geotecniche che interessano il tracciato di progetto, soprattutto in relazione al comportamento ed alla deformabilità dei terreni di fondazione sotto l'azione del carico esercitato dai rilevati ferroviari nonché della stabilità del rilevato stesso in relazione alla geometria della sovrastruttura e delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni di imposta.

Tenuto conto dei notevoli cedimenti da prevedersi alla luce dell'elevata deformabilità dei terreni di fondazione, in corrispondenza dei tratti della linea caratterizzati da maggiore dislivello tra il piano del ferro e il piano campagna, laddove sono risultati prevalenti terreni di fondazione rappresentati da litotipi coesivi poco consolidati, i rilevati ferroviari sono stati sostituiti da strutture alleggerite in c.a. di tipo scatolare.

Volendo delineare un quadro litostratigrafico e geotecnico generale, i primi 40 chilometri del tracciato si impostano su un sottosuolo caratterizzato da una marcata eterogeneità litologica e granulometrica, con continue alternanze tra depositi coesivi e granulari e locali prevalenze dell'una o dell'altra facies. Nel tratto più orientale, tra progressiva Km 40+600 e fine lotto, il sottosuolo appare invece per gran parte costituito da depositi alluvionali antichi di natura sabbioso-ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa.

Uno schema di maggiore dettaglio delle caratteristiche del sottosuolo del territorio interessato dal tracciato può essere definito in quanto segue:

progr. Km 0+000 – Km 22+000

Continui passaggi laterali e verticali tra depositi limo-argillosi e argilloso-limosi e banchi o lenti sabbioso-ghiaiose e ghiaioso-sabbiose, queste ultime prevalenti nella parte superiore del sottosuolo, fino a profondità comprese tra 15 e 20-22

metri. Particolarmente frequenti banchi e lenti di depositi ghiaioso-sabbiosi da inizio lotto fino a progressiva km 13+000.

Si segnala la presenza di un livello di torbe di spessore pari a circa 1.5 m, rinvenuto a profondità di -35 m da p.c., presente tra le progressive Km 8+500 e Km 9+900, e di un ulteriore orizzonte torboso di spessore di circa 1 m presente a -38 m da p.c., riscontrato grosso modo da progressiva Km 11+000 al Km 12+700.

progr. Km 22+000 – Km 24+000

Prevalenza di ghiaie, ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose in potenti bancate (15-20 m) lungo l'intero arco delle profondità indagate (35-40 m);

progr. Km 24+000 – Km 30+000

Prevalenza di litotipi argilloso-limosi di bassa-media consistenza nei primi 8-10 metri; assenza di dati geognostici a maggiore profondità (v. profilo geologico).

progr. Km 30+000 – Km 31+200

Prevalenza di facies sabbioso-ghiaiose e ghiaioso-sabbiose

progr. Km 31+200-Km 33+000

Prevalenza di litotipi argilloso-limosi di bassa-media consistenza nei primi 8-10 metri; assenza di dati geognostici a maggiore profondità (v. profilo geologico).

progr. Km 33+000 – Km 38+000

Marcata eterogeneità litologica laterale e verticale, con continui passaggi da litotipi coesivi a facies granulari sabbioso-ghiaiose e ghiaioso-sabbiose. Si evidenzia la presenza di un potente livello di torbe intercalato a depositi sabbiosi, sabbioso-limosi e limo-sabbiosi, di spessore dell'ordine dei 4-5 metri, rinvenuto tra le progr. Km 36+500 e Km 37+100 a profondità comprese tra 19 e 24 metri.

progr. Km 38+000 – Km 40+600

Prevalenza di litotipi argilloso-limosi di bassa-media consistenza nei primi 8-10 metri; assenza di dati geognostici a maggiore profondità (v. profilo geologico).

progr. Km 40+600- fine tracciato

Presenza di depositi ghiaioso-sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi fino a profondità di 40-50 metri dal piano campagna, al di sotto di sottili coperture limo-argillose e argilloso-limose di pochi metri di spessore.

4.2 Definizione delle Unità Geotecniche

La caratterizzazione in diversi litotipi, o Unità Geotecniche, e la differenziazione dei terreni costituenti la successione stratigrafica presente nel sottosuolo sono state eseguite sulla base dell'interpretazione ed elaborazione dei risultati delle indagini geognostiche eseguite in sito nonché a seguito delle risultanze di una serie di analisi di laboratorio effettuate su campioni indisturbati prelevati in sede di indagine.

Per la caratterizzazione e parametrizzazione geotecnica sono stati pertanto presi in esame e processati analiticamente i risultati delle prove geotecniche di laboratorio nonché quelli desunti sia dall'interpretazione delle prove in sito (Prove Penetrometriche Dinamiche SPT e Prove Penetrometriche statiche CPTE), sia dall'analisi dei dati stratigrafici relativi ai sondaggi geognostici eseguiti, tenuto conto che tali indagini hanno interessato direttamente l'intera la sequenza deposizionale presente nel sito di progetto fino a profondità dell'ordine dei 50 metri.

La classificazione geotecnica si è inizialmente basata sulla suddivisione in diverse unità lito-stratigrafiche individuate in sede di caratterizzazione geologica e descritte nel capitolo 3.

Per quanto riguarda i litotipi argilloso-limosi, in relazione alle caratteristiche litotecniche e fisico-meccaniche riscontrate dall'esame dei dati geognostici e geotecnica disposizione, sono stati considerati all'interno di una sola unità geotecnica (Unità A) i sedimenti alluvionali più superficiali, comprendenti i depositi recenti e attuali (Unità 2-3 e 5 – v. relaz- geologica), quelli dei paleoalvei (Unità 4 – v. rel. Geologica), nonché i depositi coesivi che caratterizzano la parte superiore del complesso delle alluvioni antiche (Unità 6 - v. relaz. geologica), rinvenuti fino a profondità dell'ordine dei 15-17 metri.

I depositi di natura granulare di natura sabbiosa, sabbioso-limosa e ghiaioso-sabbiosa sono stati oggetto di specifica analisi geotecnica.

Si è proceduto pertanto alla individuazione di quattro differenti Unità Geotecniche:

- Unità limo-argillosa superiore - Unità A
- Unità limo- argillosa inferiore – Unità B
- Unità sabbiosa e sabbioso-limosa – Unità C
- Unità Ghiaioso-sabbiosa e sabbioso-ghiaiosa – Unità D

Una volta descritte le caratteristiche litotecniche generali osservate all'interno di ciascuna classe, sono state successivamente riportate le caratteristiche

geotecniche delle singole Unità precedentemente indicate, desunte utilizzando, per i dati delle indagini di sito, una serie di correlazioni geotecniche note in letteratura, ed integrando e confrontando tali informazioni con i parametri forniti dal laboratorio geotecnico.

Per l'individuazione dei parametri geotecnici di ciascuna unità, con particolare riferimento a quelle di natura coesiva, si è tenuto conto sia dei risultati dell'ultima campagna di indagine, effettuata nel 2010, sia dei dati relativi alla precedente campagna di indagine, realizzata nel 2005.

4.2.1 – Unità coesive di natura argilloso-limosa e limo-sabbioso-argillosa – Unità A e B

In tali Unità sono stati considerati i depositi di natura prevalentemente coesiva che caratterizzano il sottosuolo interessato dal tracciato di progetto.

I litotipi dell'Unità A costituiscono i sedimenti alluvionali più superficiali di natura coesiva di più recente deposizione, comprendenti i depositi recenti e attuali (Unità 2-3 e 5 – v. rel. Geologica), quelli dei paleoalvei (Unità 4 – v. rel. Geologica), nonché i depositi coesivi che caratterizzano la parte superiore del complesso delle alluvioni antiche (Unità 6 - v. rel. Geologica), rinvenuti fino a profondità dell'ordine dei 15-17 metri.

Si tratta complessivamente di sedimenti a granulometria fine o molto fine di natura da limo-argillosa a argilloso-limosa a limo-sabbioso-argillosa, con residui vegetali sparsi, occasionalmente di natura organica, di consistenza da modesta a media e caratteristiche litoceniche e geotecniche complessivamente mediocri. Gli orizzonti granulari sono presenti in forma di sabbie fini limose di colore grigio e generalmente limitati a sottili livelli di spessore centimetrico.

All'Unità B appartengono i depositi della successione delle alluvioni antiche distribuiti a profondità comprese tra 15-17 metri e 50 metri di profondità dal piano campagna. Detta Unità è per gran parte rappresentativa di sedimenti alluvionali del Pleistocene superiore legati alle fasi di avanzata, massima espansione dei ghiacciai wurmiani (Unità 6 - v. rel. geologica).

E' rappresentata da una successione di limi-argillosi, limi-sabbioso-argillosi e argille-limose debolmente sabbiose, di colore da grigio a grigio scuro, da mediamente plastiche a plastiche, da mediamente consistenti a consistenti, talora contenenti livelli organici nerastri e occasionali livelli di torba di spessore da centimetrico a decimetrico rinvenuti fino alle massime profondità investigate, dell'ordine dei 50 metri.

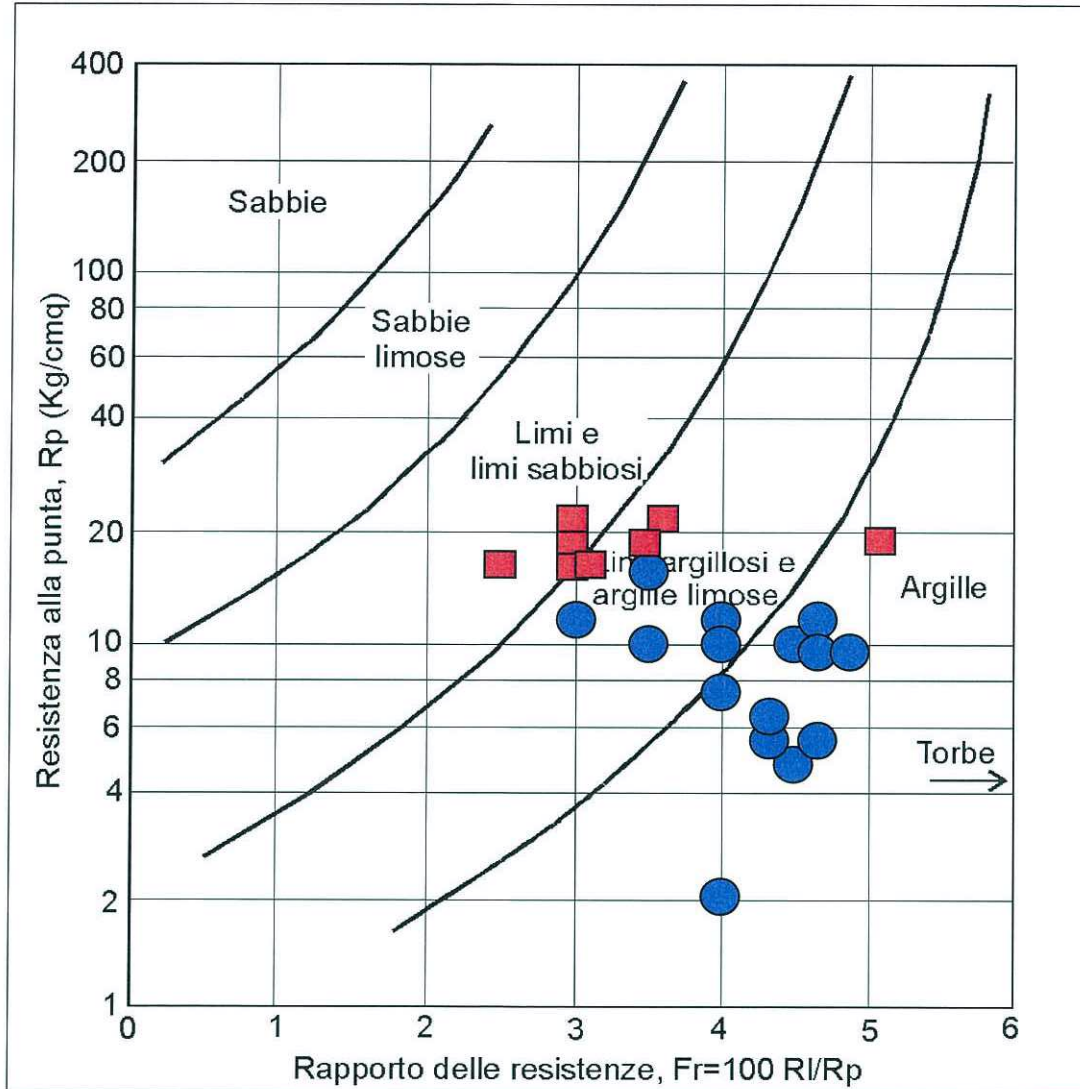


Figura n. 1 – Guida alla stima del tipo di terreno da risultati di prove CPT con punta elettrica (Robertson e Campanella)

- Unità A
- Unità B

La sequenza è localmente caratterizzata da intercalazioni pluricentriche di sabbie fini limose grigie e dalla presenza di locali sparsi clasti calcarei sub-arrotondati di diametro massimo pari a circa 1 cm.

Una caratterizzazione di dettaglio in termini litologici e granulometrici delle due Unità geotecniche è stata ottenuta utilizzando alcune note correlazioni che utilizzano i valori di resistenza alla punta q_c ottenuti dalle prove penetrometriche statiche CPTE ed il parametro della Friction Ratio (Fr), pari al rapporto tra la resistenza laterale f_s e quella alla punta q_c . I risultati ottenuti analizzando le diagrafie delle prove confermano generalmente quanto emerso dai sondaggi geognostici. Una sintesi dei dati ricavati dalle prove è riportata nei diagrammi di seguito allegati (Fig. n.1-2).

Una valutazione dei livelli di consistenza delle facies coesive è stata ottenuta sulla base di diagrammi delle prove penetrometriche statiche CPTE a disposizione, in termini di andamento del valore di resistenza alla punta q_c all'interno degli orizzonti limosi e argillosi, e confrontando detti valori, a titolo di conferma o meno del dato osservato, con le informazioni ricavate in sede di sondaggio a carotaggio continuo, in termini di descrizione litotecnica e valori di resistenza al penetrometro e scissometro ottenute in sito (R_p e V_t).

I dati presi in esame confermano una generale prevalenza di materiali fini di natura da limo-argillosa a limosa a limo-sabbiosa. Nei litotipi dell'Unità A prevalgono terreni argilloso-limosi e limo-argillosi, a luoghi sensibili, di consistenza da modesta a media, mentre i terreni dell'Unità B sono costituiti da limo-argillosi e argilloso-limosi, limo-sabbiosi e limo-sabbioso-argillosi da mediamente consistenti a consistenti.

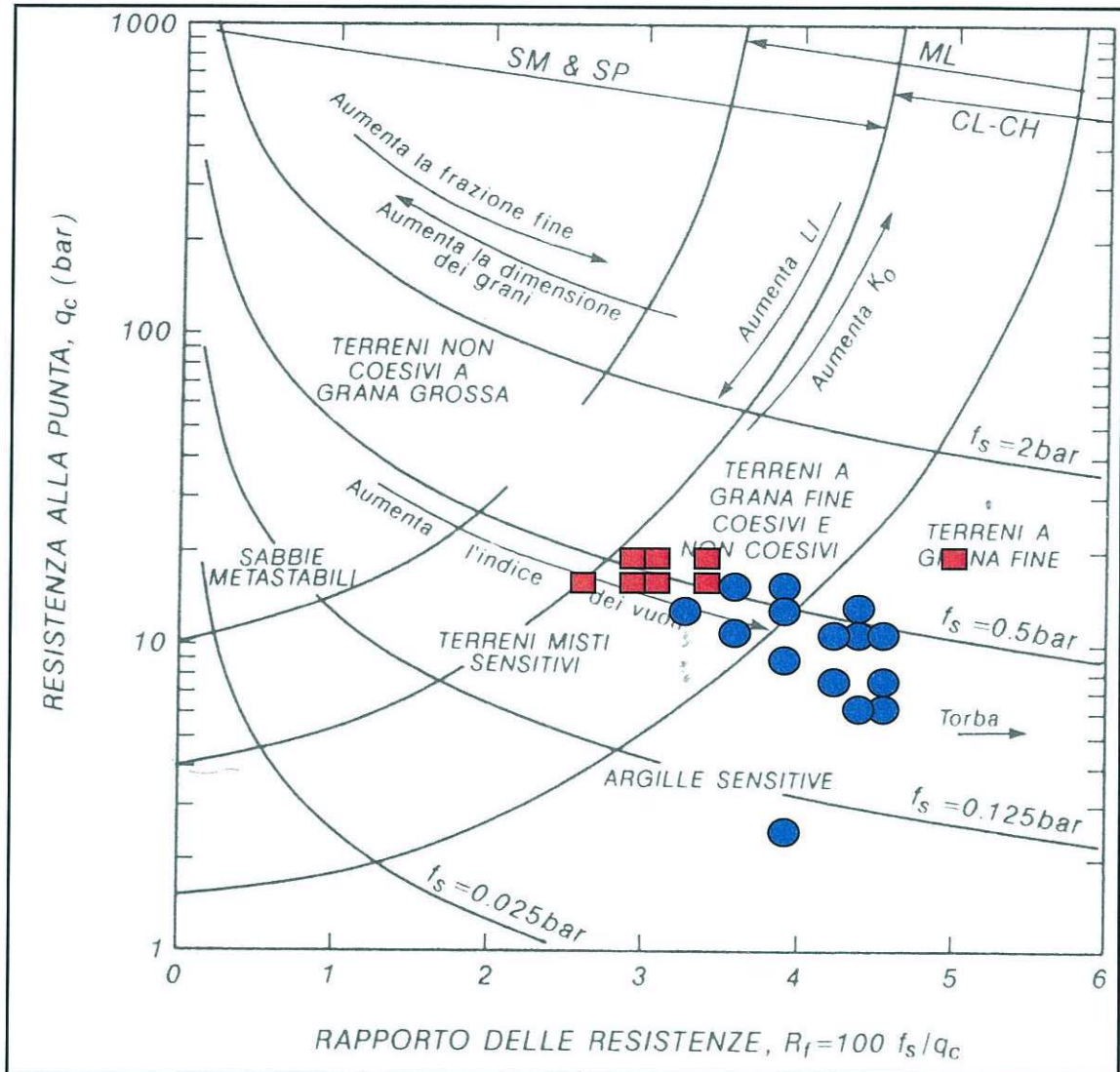


Figura n. 2 – Guida per la classificazione dei terreni da risultati di prove CPT E con punta elettrica standard (Douglas, Olsen - 1981)

- Unità A
- Unità B

Le diagrafie relative alle prove penetrometriche statiche CPTe confermano come la parte superiore del materasso alluvionale (Unità A) sia rappresentata da depositi prevalentemente limo-argillosi e argillosi limosi di consistenza complessivamente non elevata o modesta, caratterizzati da valori di resistenza alla punta Q_c non elevati e mediamente compresi tra 0.5 MPa e 1.0 MPa (figura n. 5).

Una ulteriore valutazione sull'effettivo andamento del livello di consistenza all'interno della sequenza dei depositi alluvionali è stata ottenuta sulla base dell'analisi delle misure di resistenza al penetrometro tascabile R_p e allo scissometro Torvane ottenute sulle carote estratte in sede di indagine, il cui andamento con la profondità è illustrato nei diagrammi di figura n.3-4.

Si evidenzia l'esistenza di un orizzonte superiore a consistenza complessivamente inferiore di spessore dell'ordine dei 15-17 metri, caratterizzato da valori di resistenza al penetrometro spesso modesti e compresi tra 0,6 e 1,5 Kg/cm² (60-150 KPa). All'aumentare della profondità si assiste ad un incremento del grado di consistenza, con valori di resistenza che si attestano mediamente all'interno del range tra 1,5 e 2,5 Kg/cm² denotando l'esistenza di orizzonti fini coesivi da mediamente consistenti a consistenti, financo molto consistenti.

Un progressivo incremento del grado di consistenza degli orizzonti coesivi all'aumentare della profondità è altresì espresso anche osservando l'andamento del valore di resistenza alla punta Q_c fornito dalle prove penetrometriche statiche CPTe che, per profondità superiori ai 14-16 metri, si attesta costantemente intorno a valori compresi tra 1.5-2.0 MPa, evidenziando l'esistenza di litotipi di natura coesiva consistenti (figura n. 5).

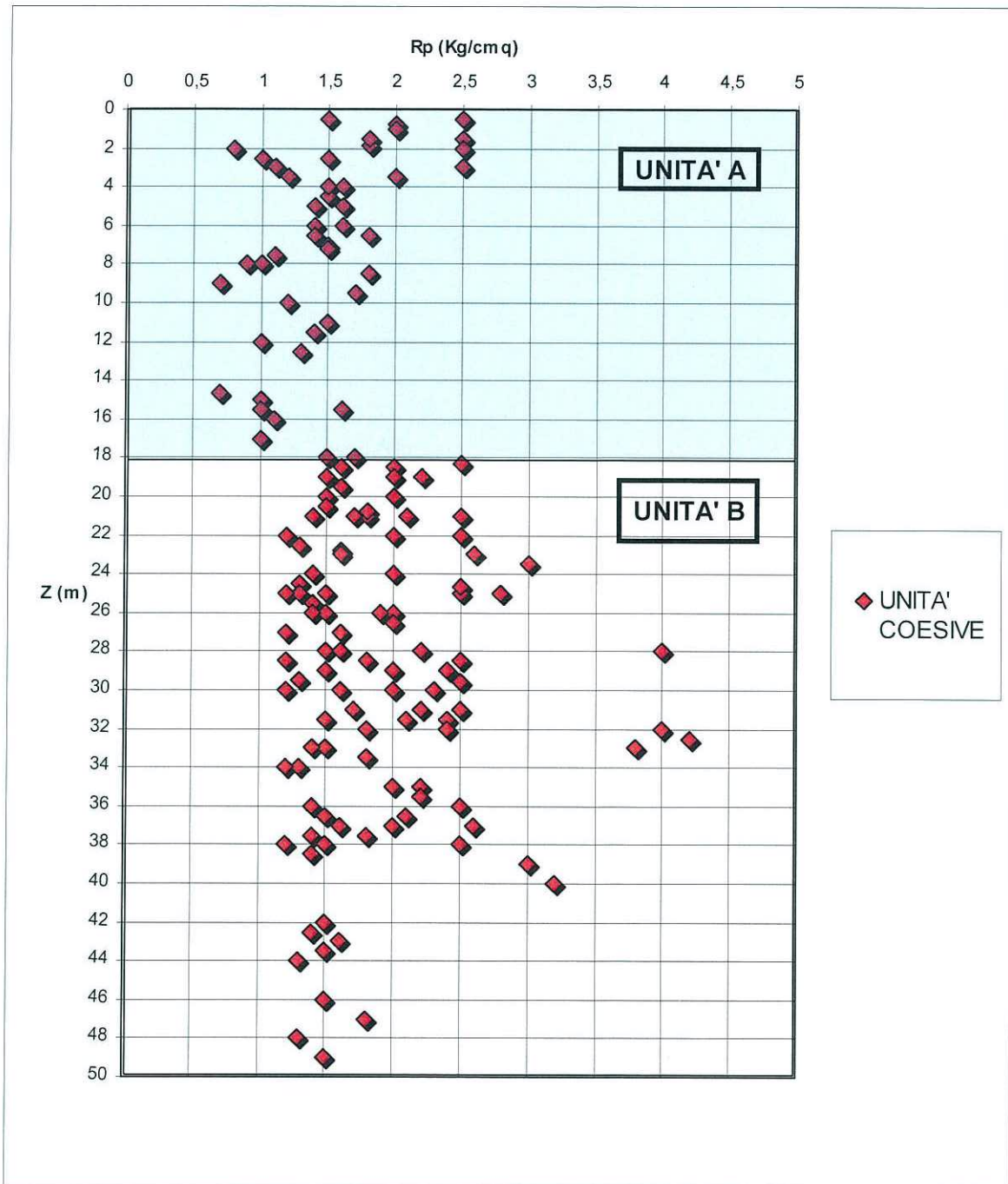


Figura n. 3 – Andamento del valore di resistenza al penetrometro tascabile R_p con la profondità dal p.c.

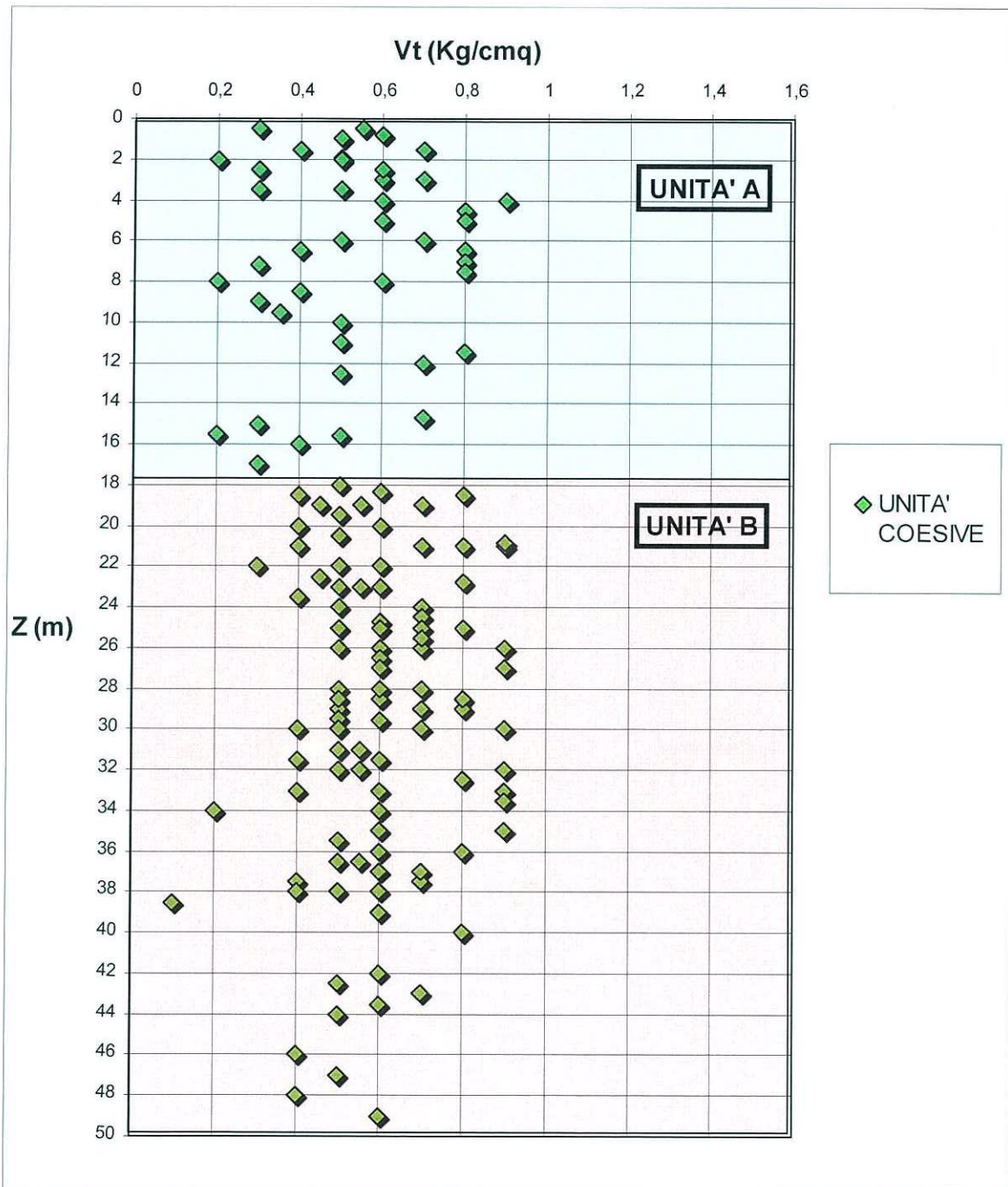


Figura n. 4 – Andamento del valore di resistenza allo scissometro tascabile V_t con la profondità da p.c.

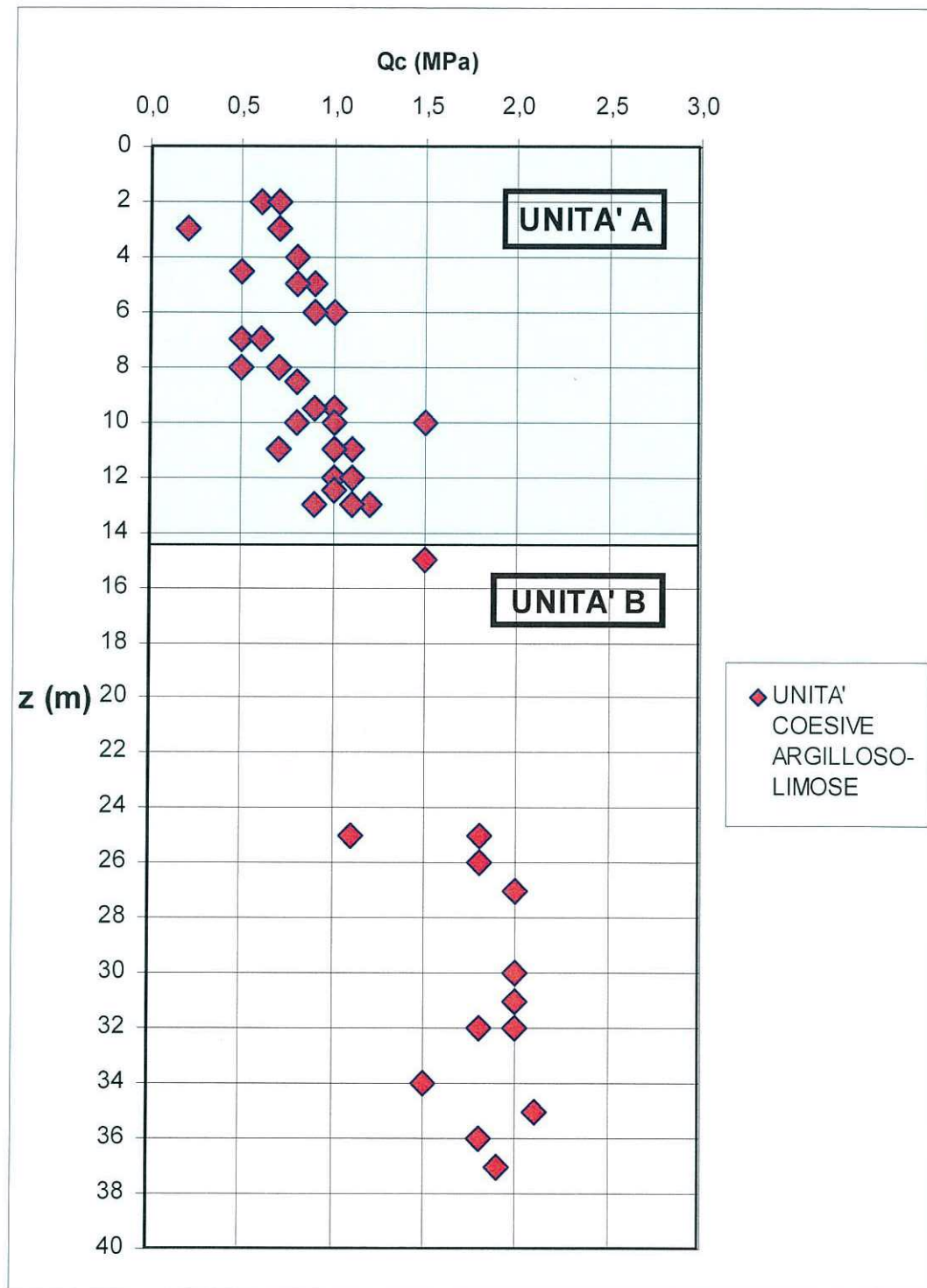


Figura n. 5 – Valori di resistenza alla punta q_c medi ottenuti nelle Unità coesive A e B dalle prove CPTE

Con riferimento alle proprietà fisico-meccaniche, per una valutazione delle caratteristiche geotecniche del complesso dei depositi alluvionali fini di natura prevalentemente coesiva delle Unità A e B sono stati presi in esame sia i risultati delle prove di laboratorio, sia, soprattutto, i valori di resistenza alla punta q_c forniti dalle prove CPTE.

Per quanto riguarda i parametri di resistenza in condizioni non drenate, in termini di coesione non drenata C_u , si è inizialmente fatto riferimento alle misure di resistenza allo scissometro (Vane test) fornite dalle carote estratte in sede di perforazione e riportati nei diagrammi V_t/z di figura n. 4. In corrispondenza dei litotipi dell'Unità A i valori di V_t , direttamente rappresentativi del parametro C_u , sono distribuiti in un ampio intervallo di valori, compreso tra 20 e 80 KPa (0.2-0.8 Kg/cmq).

Nei depositi dell'Unità B i valori di V_t (C_u) appaiono invece mediamente più elevati e maggiormente attestati entro un intervallo di 50-70 KPa (0.5-0.7 Kg/cmq), seppur in presenza di valori più dispersi inferiori e superiori, rispettivamente pari 40 e 80 Kpa.

Una ulteriore valutazione dell'andamento della resistenza non drenata C_u è stata ottenuta sulla base dei valori di resistenza alla punta q_c misurati nell'ambito delle prove penetrometriche statiche CPTE eseguite applicando la seguente correlazione empirica:

$$C_u = (q_c - \sigma_0) / N_k$$

dove:

$N_k = 15 \pm 3$ (fattore del cono)

σ_0 = pressione litostatica totale

q_c = resistenza alla punta

Sono stati presi in esame valori di resistenza alla punta q_c desunti da quanto valutato sulla base dello studio delle risultanze delle prove penetrometriche statiche CPTE e CPTU relative alla totalità delle campagne di indagine (v. figura n.5).

I valori di C_u ottenuti, diagrammati in funzione della profondità in figura n.6, confermano complessivamente i risultati precedentemente forniti dalle misure scissometriche, evidenziando una coesione non drenata meno elevata nei primi 15-17 metri in corrispondenza dei litotipi dell'Unità A, dell'ordine di 30-55 KPa. Tali valori appaiono in accordo con quelli ottenuti rispettivamente da una prova triassiale non consolidata non drenate TXUU effettuate su un campione indisturbato e dai valori di Vane test di laboratorio, da cui sono emerse coesioni non drenate C_u piuttosto modeste e comprese nell'intervallo 20-40 KPa.

A profondità superiori e comprese tra 24 e 38 m, la coesione non drenata C_u appare mediamente più elevata, in accordo con la maggiore consistenza delle facies argilloso-limose e limo-argillose dell'Unità B, con valori che si attestano nell'intervallo tra 65 e 85 KPa. Anche in questo caso, si dispone di dati relativi a prove non drenate eseguite in laboratorio (triassiali TXUU), che indicano una C_u piuttosto elevata anche se distribuiti in un ampio intervallo comprese tra 45 KPa e 128 KPa.

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza in condizioni drenate, si dispone dei dati relativi ad una serie di prove di taglio diretto eseguite in

laboratorio effettuate nella campagna di indagine del 2005. I campioni presi in esame sono stati prelevati in un ampio intervallo di profondità e si riferiscono pertanto a litotipi riconducibili ad entrambe le Unità geotecniche A e B.

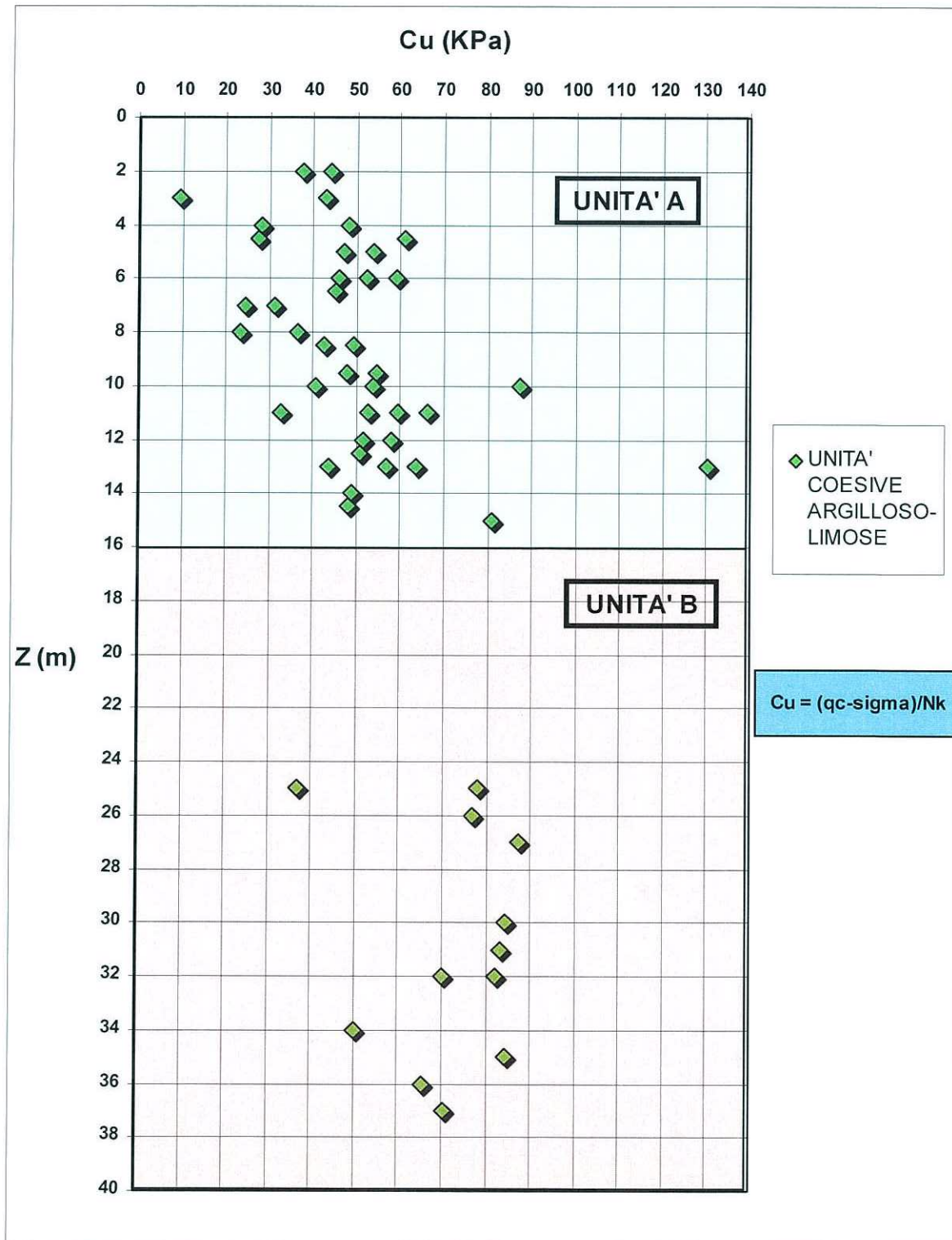


Figura n. 6 - Valori di Cu ottenuti dai valori di resistenza alla punta qc

Per quanto riguarda i campioni relativi all'Unità A non si dispone di dati in numero significativo per una caratterizzazione rappresentativa delle caratteristiche di resistenza drenate. Le analisi di laboratorio evidenziano valori di coesione c' nulla a fronte di un angolo di attrito pari a 27° .

Un numero di prove maggiormente significativo contraddistingue invece i litotipi dell'Unità B. Tutti i campioni presi in esame, di natura argilloso-limosa e limo-argilloso, caratterizzati da frazioni sabbiose non superiori al 10-15%, hanno evidenziato significativi contributi del valore della coesione c' , in accordo con i progressivi incrementi di consistenza evidenziati dalle prove penetrometriche statiche CPTE.

I valori di coesione c' sembrano attestarsi mediamente nell'intervallo tra 21 e 37 KPa, a fronte di angolo di attrito compresi nell'intervallo tra 24° e 26° .

La valutazione complessiva delle caratteristiche di resistenza in condizioni drenate per entrambe le Unità geotecniche in esame ha tenuto conto, oltre che delle risultanze delle analisi di laboratorio, anche delle caratteristiche di consistenza e del conseguente stato di consolidazione dei litotipi evidenziato in sede di indagine attraverso l'analisi sia dei valori di resistenza al penetrometro tascabile R_p e scisso metro V_t , sia dei valori di resistenza alla punta Q_c forniti dalle prove CPTE.

Per i litotipi dell'Unità A, contraddistinti da consistenza complessivamente non elevata e più ridotti stati di consolidazione, possono stimarsi valori di coesione c' ridotti, dell'ordine di 4-5 KPa, o nulli, a fronte di angoli di attrito variabili in un range tra 23° - 25° .

I litotipi dell'Unità B sono caratterizzati da stati di consistenza mediamente superiori, evidenziati soprattutto dai valori di R_p , compresi tra 1.3 e 2.5 Kg/cm^q, e di Q_c , distribuiti tra 1.5 e 2 MPa.

La presenza di materiali limo-argillosi di consistenza non sempre elevata nell'intervallo di profondità tra 20 e 50 metri suggerisce tuttavia di considerare complessivamente sovrastimati i parametri di coesione c' emersi dalle prove di laboratorio che, oltre ad essere puntuali, potrebbero in parte derivare da velocità di consolidazione forse troppo elevate adottate nel corso della prova stessa.

In relazione ai dati attualmente a disposizione, valori di coesione c' distribuiti nell'intervallo tra 5 e 15 Kpa si ritengono maggiormente rappresentativi delle caratteristiche di resistenza in condizioni drenate dei litotipi dell'Unità B.

Per quanto riguarda le caratteristiche di deformabilità, si è preso in esame il legame tra il modulo confinato (drenato) M con la resistenza alla punta Q_c . La relazione utilizzata è la seguente (Mitchell e Gardner, 1975):

$$M = 1/mv = aqc$$

dove mv è il coefficiente di compressibilità volumetrico ed a varia in relazione ai differenti tipi di argille, secondo quanto riportato nella tabella n. 1.

L'andamento dei corrispondenti valori del modulo edometrico così ricavati in funzione della profondità dal piano campagna è stato riportato nel diagramma di figura n.7.

Stima del modulo confinato
 $M = 1/m_v$ (Mitchell e Gardner, 1975)

Argille di bassa Plasticità (CL)	$0.7 > q_c$ (MPa)	$8 > \alpha > 3$
	$2 > q_c > 0.7$ (MPa)	$5 > \alpha > 2$
	$q_c > 2$ (MPa)	$2.5 > \alpha > 1$
Limi di bassa Plasticità (ML)	$2 > q_c$ (MPa)	$3 > \alpha > 1$
	$q_c > 2$ (MPa)	$6 > \alpha > 3$
Limi e argille di alta Plasticità (MH, CH)	$2 > q_c$	$6 > \alpha > 2$
Limi organici (OL)	$1.2 > q_c$ (MPa)	$8 > \alpha > 2$
Torba e argilla Organica (P_L , OH)	$100 > W > 50$	$4 > \alpha > 1.5$
	$200 > W > 100$	$1.5 > \alpha > 1$
	$W > 200$	$1 > \alpha > 0.4$

Tabella n.1

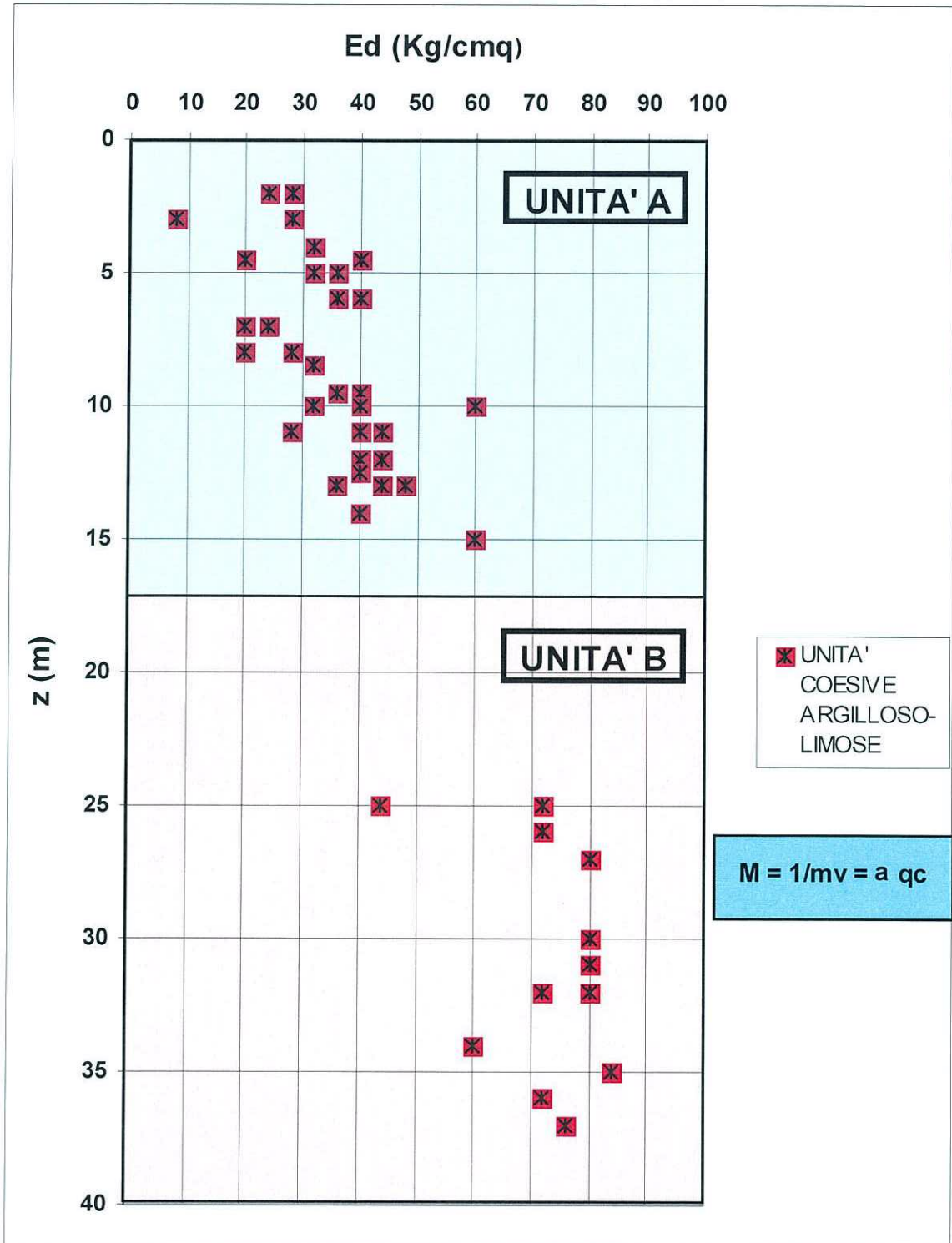


Figura n. 7 – Andamento dei valori del modulo edometrico Ed – Unità A e B

In relazione ai livelli di consistenza dei materiali coesivi in esame, ed ai conseguenti diversi valori di resistenza alla punta misurati, si evidenziano parametri di deformabilità generalmente mediocri e indicativi di compressibilità mediamente più elevata negli strati più superficiali dell'Unità A, espressa da valori del modulo Ed dell'ordine di 20-45 Kg/cm^q (2000-4500 KPa).

Per lo studio delle caratteristiche di compressibilità dei litotipi dell'Unità A sono state inoltre eseguite n. 3 prove edometriche. Le determinazioni del modulo di compressibilità edometrica eseguite hanno fornito valori piuttosto diversificati e distribuiti entro un ampio range, comprese tra 2500 KPa e 6000 KPa.

Per i litotipi dell'Unità B possono stimarsi valori di Ed mediamente più elevati, compresi nel range di 60-85 Kg/mq (6000-8500 KPa). Tali valori possono ritenersi in buon accordo con i caratteri geotecnici generali dei depositi dell'Unità in esame.

Sulla base delle determinazioni così ottenute, per i depositi rappresentativi delle Unità A e B, i principali parametri di resistenza e deformabilità di interesse geotecnico possono essere sintetizzati nelle tabelle n.2 e 3 di seguito riportate.

UNITA' GEOTECNICA	PESO DI VOLUME KN/MC	Nspt	Qc (prove CPTe) (Mpa)	C' (KPa)	Cu (KPa)	ANGOLO DI ATTRITO ϕ'	MODULO EDOMETRICO Ed (Kpa)
UNITA' A	19-20	/	0.5-1	0-5	25-45	23°-25°	2.500-4.500

Tabella n.2 – Principali parametri geotecnici delle Unità A

UNITA' GEOTECNICA	PESO DI VOLUME KN/MC	Nspt	Qc (prove CPTE) (Mpa)	C' (KPa)	Cu (KPa)	ANGOLO DI ATTRITO ϕ'	MODULO EDOMETRICO Ed (Kpa)
UNITA' B	19-20		1.5-2	5-15	65-85	24°-26°	6.000-8.500

Tabella n.3 – Principali parametri geotecnici dell'Unità B

4.2.2 – Unità dei depositi sabbiosi e sabbioso ghiaiosi – Unità C-D

All'interno dell'*Unità C* sono stati considerati i banchi sabbiosi e sabbioso-limosi che, a diverse profondità, si intercalano nelle sequenze argillose e limo-argillose delle Unità A e B, precedentemente descritte.

Possono alternarsi in lenti o banchi di vario spessore ai depositi delle Unità coesive lungo l'intero arco delle profondità indagate e caratterizzano il sottosuolo con maggiore continuità soprattutto nella parte orientale del territorio interessato dal tracciato, all'incirca da progressiva Km 40+600 a fine lotto.

Si tratta di materiali granulari, a granulometria da fine a medio-fine, localmente medio-grossolana, di proprietà geotecniche discrete, caratterizzati da coesione nulla e con caratteristiche di resistenza espresse unicamente in funzione dell'angolo di attrito e strettamente connesse al grado di addensamento della formazione.

Dal punto di vista litologico, i litotipi di detta Unità risultano molto eterogenei dal punto di vista granulometrico e sono prevalentemente rappresentati da sabbie da fini a medio fini debolmente limose di colore grigio e grigio chiaro, a luoghi da con limo a debolmente limo-argillose.

Alcuni orizzonti presentano clasti calcarei sparsi di dimensioni massime pari a 2-3 cm, talora più abbondanti fino a costituire livelli di sabbie con ghiaia o, più raramente, ghiaioso-sabbiosi o con sabbia. Possono inoltre alternarsi orizzonti di sabbie con limo fino a limo-sabbiosi.

I depositi dell'Unità D sono stati differenziati in relazione alla prevalenza di

banchi e orizzonti da sabbiosi fortemente ghiaiosi a ghiaioso-sabbiosi, da debolmente limosi a limosi o con limo, caratterizzati da ciottoli sub-arrotondati di diametro massimo pari a 7-8 cm, poligenici ed eterometrici.

Le principali caratteristiche meccaniche delle due Unità geotecniche in esame, con particolare riferimento a grado di addensamento, densità relativa e parametri di resistenza al taglio, sono state identificate utilizzando in primo luogo i risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT eseguite in sede di sondaggio geognostico.

Sono stati presi in esame tutti i valori di N30 ottenuti dalle prove SPT effettuate all'interno rispettivamente degli orizzonti sabbiosi o sabbioso-limosi (Unità C) e ghiaioso-sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi (Unità D) in corrispondenza dei sondaggi geognostici realizzati in asse al tracciato di progetto, il cui andamento con la profondità è stato riportato nel diagramma di figura n.3.

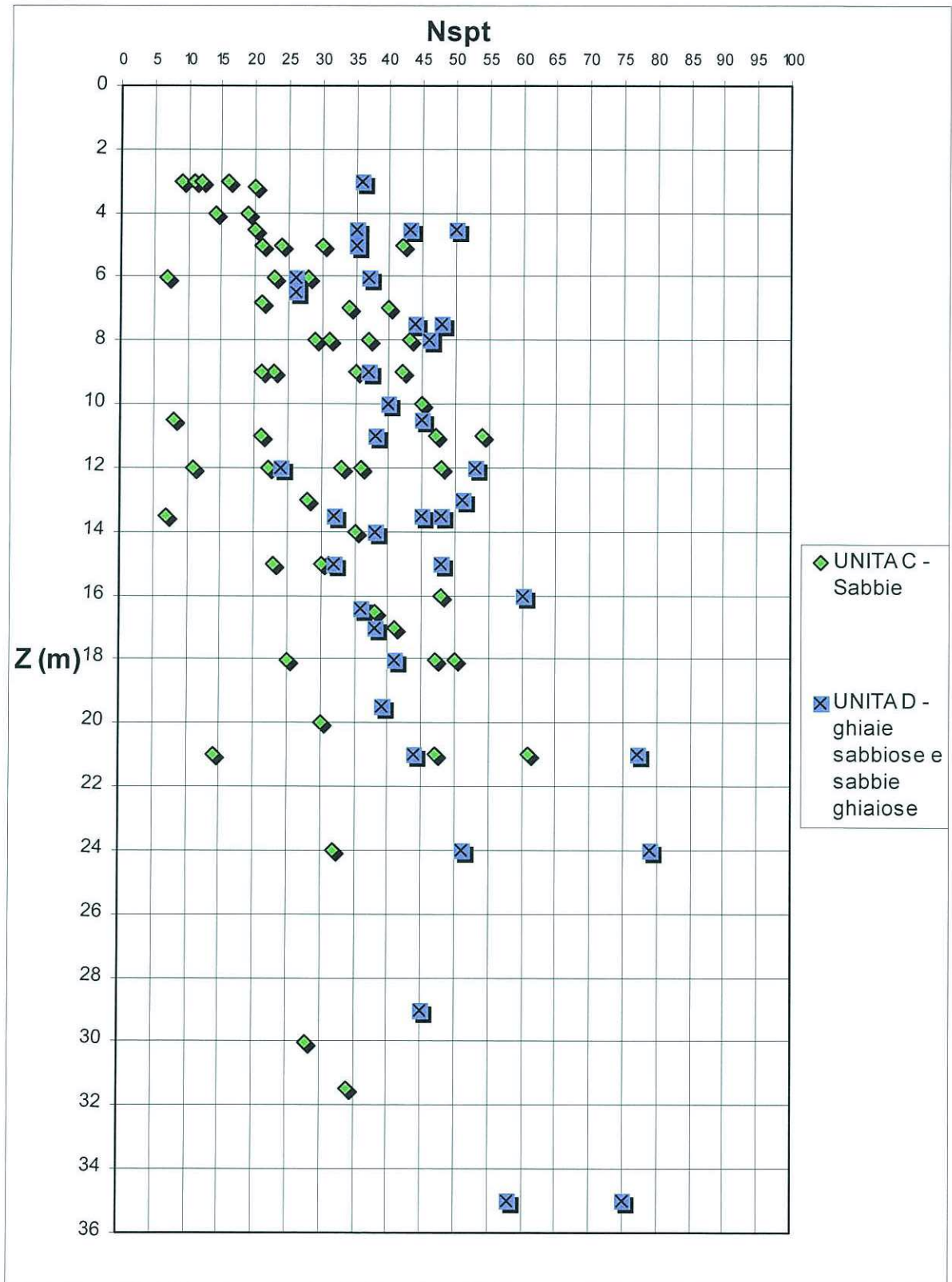
Sono stati ottenuti valori di N30 mediamente compresi nell'intervallo tra 20 e 40 colpi per i depositi dell'Unità C, di natura sabbiosa, ad eccezione dei primi 3-4 metri, dove si evidenziano valori ridotti ed attestati tra 8 e 20 colpi.

Valori mediamente più elevati, attestati entro un range tra 35 e 50 colpi, sono stati forniti dalle prove SPT effettuate negli orizzonti sabbioso-ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi dell'Unità D.

Una prima valutazione delle caratteristiche di addensamento dei litotipi sabbiosi dell'**Unità C** è contenuta nella correlazione di Terzaghi-Peck (1948), riportata nella tabella n. 4, da cui si evidenziano materiali per lo più mediamente addensati o, subordinatamente, addensati.

<i>N_{spt}</i> Colpi/30 cm	DENSITA' RELATIVA (TERZAGHI - PECK) 1948	DENSITA' RELATIVA (GIBBS-HOLTZ) 1957
<i>0-4</i>	<i>MOLTO SCIOLTA</i>	<i>0-15%</i>
<i>4-10</i>	<i>SCIOLTA</i>	<i>15-35%</i>
<i>10-30</i>	<i>MEDIA</i>	<i>35-65%</i>
<i>30-50</i>	<i>DENSA</i>	<i>65-85%</i>
<i>OLTRE 50</i>	<i>MOLTO DENSA</i>	<i>85-100%</i>

TABELLA N. 4 – Associazione tra la densità relativa ed i valori di *N_{spt}*



Nell'ambito dell'utilizzo di note correlazioni di letteratura, finalizzate a fornire, tramite le prove spt, una valutazione delle principali caratteristiche meccaniche del materiale, sono stati pertanto presi in esame i valori di N30 ritenuti maggiormente rappresentativi e relativi a prove eseguite fino a profondità di 20 m dal piano campagna.

Per una valutazione di maggiore dettaglio delle caratteristiche di densità relativa del materiale sono state prese in esame una serie di correlazioni, tra cui quella di Terzaghi-Peck (1948) e Gibbs e Holtz (1957), Peck-Bazaraa (1967).

Le principali conclusioni relative alla relazione di Terzaghi-Peck (1948) e Gibbs e Holtz (1957) confermano la prevalenza di stati di addensamento medi dei litotipi in esame.

Considerando valori di N30 opportunamente corretti e normalizzati rispetto a $\sigma'v0$ e ulteriormente modificati per tener conto del dispositivo di battitura, sono state successivamente utilizzate opportune correlazioni tra il valore di N_{spt} ed alcuni parametri geotecnici significativi.

Utilizzando la relazione di Terzaghi e Peck, 1948 tra la resistenza alla penetrazione, ottenuta con il valore normalizzato $(N_1)_{60}$, e la densità relativa $Dr(\%)$:

$$(N_1)_{60} / Dr^2 = 60$$

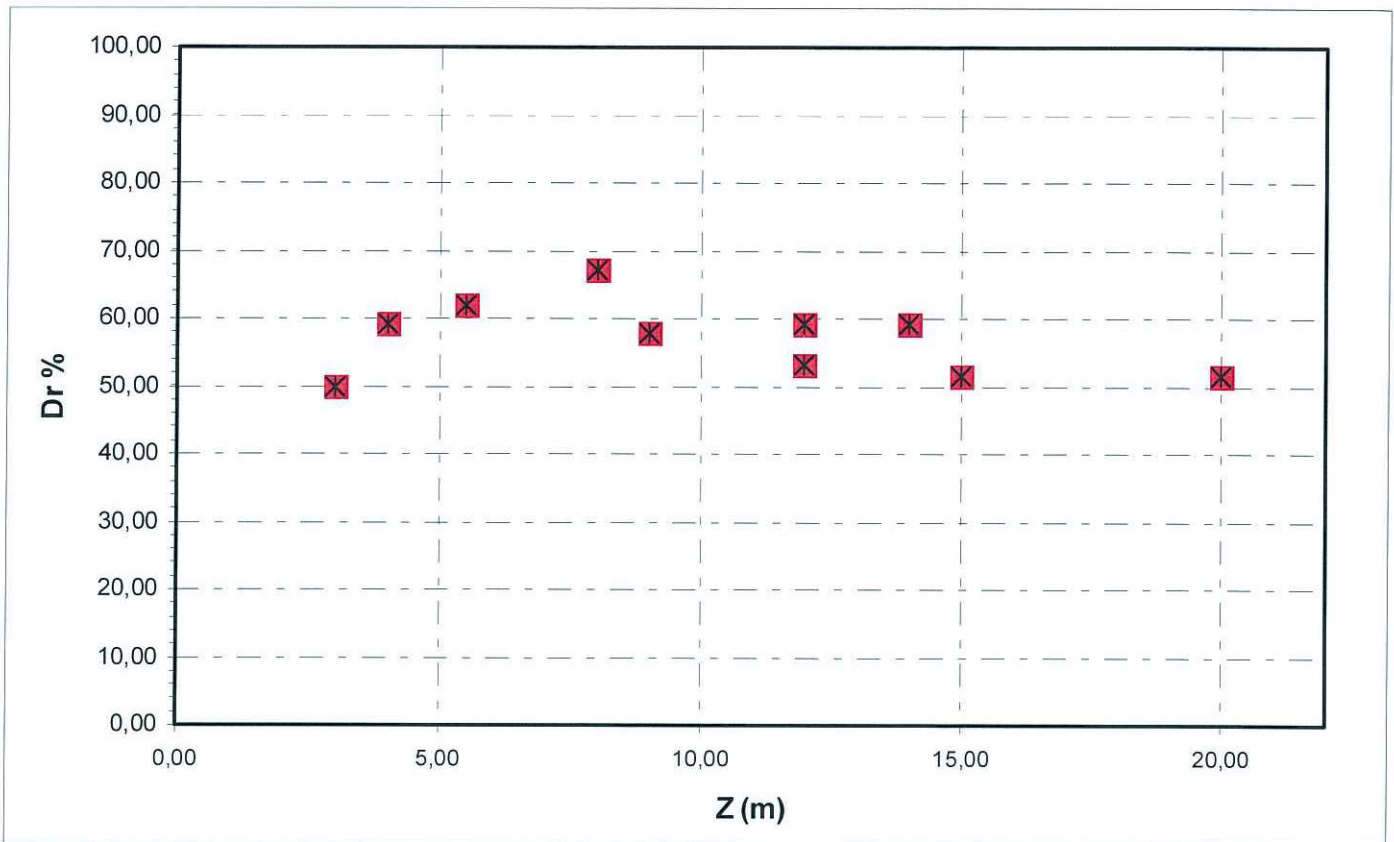


Figura n. 9 - Unità C Sabbiosa– Valori di densità relativa ricavati da valori di N_{spt} - $(N_1)_{60}/Dr^2=60$

	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10
quota dal p.c. (m)	3,00	4,00	5,50	8,00	9,00	12,00	12,00	14,00	15,00	20,00
falda	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
N _{spt}	10	15	22	35	24	22	30	35	24	30
	DENSITA' RELATIVA (%)									
Gibbs & Holtz	64	71	73	74	65	57	63	62	54	51
Meyerhof	64	76	79	85	73	66	73	73	63	62
Schultze & Menzebach	67	77	79	84	73	66	73	74	64	64
Bazaraa	45	51	52	55	48	46	50	52	45	47
Skempton	54	63	66	70	61	55	61	62	54	54

Tabella n.5 - Unità C Sabbiosa: – Valori di densità relativa ricavati da valori di N_{spt}

Prevalgono valori di densità relativa indicativi di materiali mediamente addensati (D_r dell'ordine del 55%-60%). Ulteriori valutazioni della densità relativa si sono basate su ulteriori correlazioni geotecniche, come riportato nella tabella n. 5 e conducono a valori di D_r indicativi di stati di addensamento da medi a, localmente, più elevati.

Per una stima delle caratteristiche di resistenza in condizioni drenate, sono state utilizzate una serie di correlazioni note nella letteratura geotecnica, adottate in relazione alle caratteristiche litologiche e granulometriche dei terreni tipo presenti sul sito in esame.

In particolare, si è utilizzata la relazione di Shioi e Fukui (1982):

$$\phi' = (15 N)0.5 + 15$$

Il metodo di *De Mello* è valido per le sabbie in genere e per qualunque profondità (tranne che per i primi 2 m sotto il p.c.). E' da considerarsi inattendibile però per valori di Φ' superiori a 38° . Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\Phi = 19 - 0,38\sigma' + 8,73 \text{Log } N_{spt}$$

dove σ' è la pressione litostatica efficace a metà strato in kg/cmq e N_{spt} il numero di colpi medio misurato nello strato.

Ulteriori correlazioni geotecniche utilizzate risultano le seguenti:

a) Road Bridge Specification

Il metodo è valido per sabbie fini o limose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8 - 10 m per terreni sopra falda e superiori a 15 m per terreni in falda:

Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\Phi = \sqrt{15Nspt} + 5$$

b) wolff

$$\Phi' = 27,1 + 0,3 Nspt - 0,00054 N^2 spt$$

c) Sowers

Il metodo di Sowers (1961) è valido per le sabbie in genere e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova inferiori a circa 4 m per terreni sopra falda e inferiori a circa 7 m per terreni in falda ($\sigma > 5-8$ t/mq).

La relazione è la seguente:

$$\Phi = 28 + 0.28 Nspt$$

d) Peck-Hanson & Thornburn

Il metodo di Peck - Hanson & Thornburn è valido per le sabbie in genere e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova inferiori a circa 5 m per terreni sopra falda e inferiori a circa 8 m per terreni in falda (pressione efficace inferiore a 8-10 t/mq).

$$\Phi = 27.2 + 0.28 N_{spt}$$

Le risultanze delle analisi condotte utilizzando i valori di N30 corretti sono stati sintetizzati nel diagramma di figura n. 10.

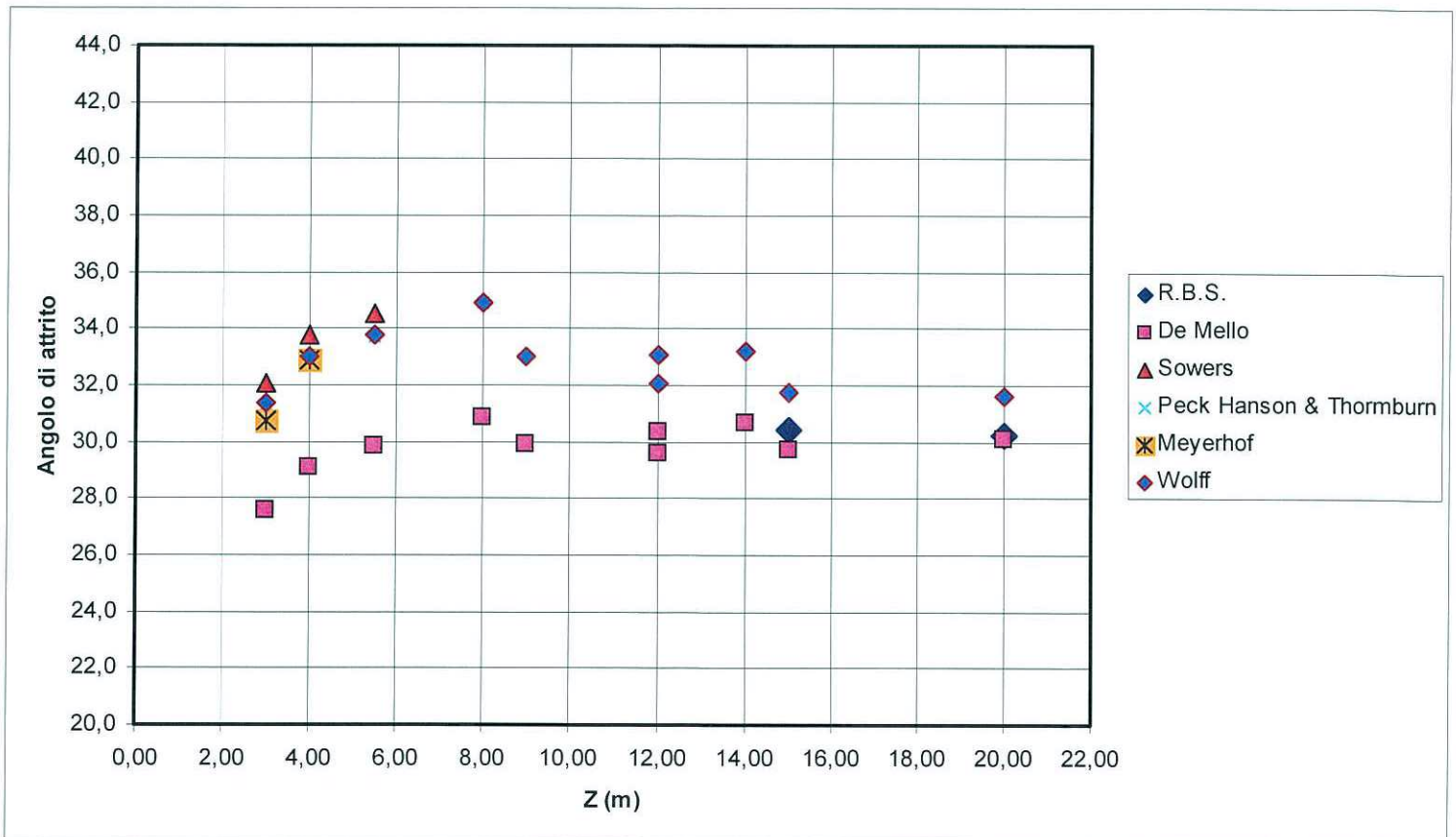


Figura n. 10 – Unità C Sabbiosa: Valori di angolo di attrito ricavati dalle correlazioni geotecniche utilizzando il valori di Nspt 30

Le correlazioni utilizzate conducono a valori di angolo di attrito mediamente distribuiti nell'intervallo di 30°-33° per i litotipi dell'Unità C, in accordo con i caratteri litologici, granulometrici e la densità relativa del materiale in esame.

Per quanto riguarda la compressibilità dei litotipi in esame, si è utilizzato il diagramma di figura n. 11 per una valutazione della deformabilità del materiale, nel quale viene introdotta una relazione tra N_{spt} e valore del Modulo Confinato M_0 e vengono proposte diverse correlazioni in funzione delle caratteristiche litologiche del materiale.

Prendendo come riferimento la curva rappresentativa delle sabbie, si ottengono valori del modulo edometrico compresi nell'intervallo 13 - 20 MPa (130-200 Kg/cmq).

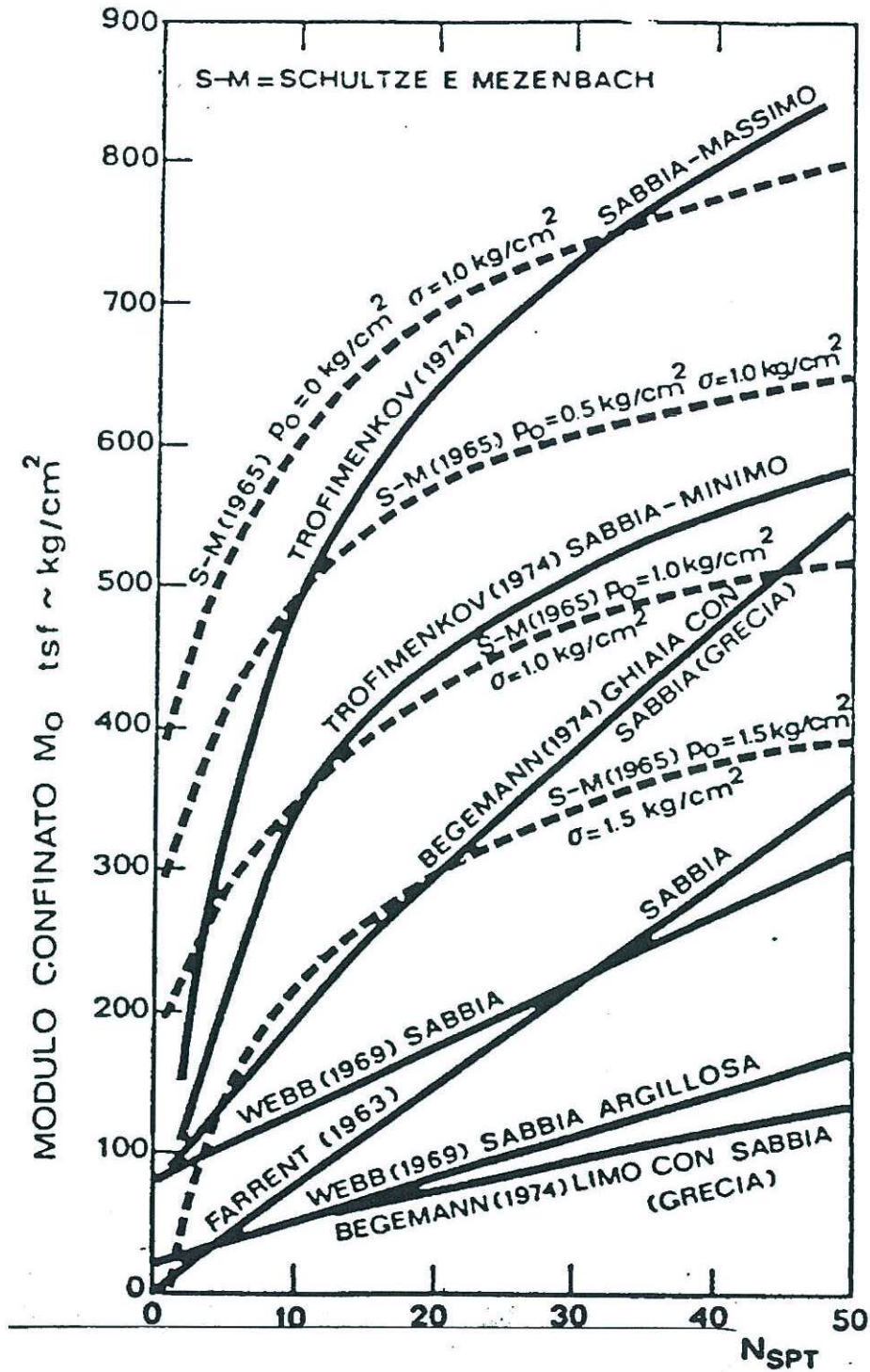


Figura n.11 - Relazione tra N_{spt} e valore del Modulo Confinato M_0

Per quanto riguarda una valutazione del Modulo E di Young di litotipi sabbiosi, sono state utilizzate le seguenti relazioni:

a) Tornaghi et al.

$$E(MPa) = B\sqrt{Nspt}$$

dove N_{spt} è il numero di colpi medio nello strato mentre B è una costante pari a 7 Mpa;

b) Schmertmann

$$E(kg/cmq) = 2BN_{spt}$$

B	Litologia
4	sabbia fine
6	sabbia media
10	sabbia grossolana

c) D'Appolonia et Alii.

$$E(kg/cmq) = 7,71N_{spt} + 191 \text{ (Ghiaia + sabbia)}$$

$$E(kg/cmq) = 10,63N_{spt} + 375 \text{ (Sabbia SC)}$$

d) Schultze e Menzebach.

$$E(kg/cmq) = 5,27N_{spt} + 76$$

e) Webb.

$$E(kg/cmq) = 4,87N_{spt} + 73 \text{ (Sabbia satura)}$$

Una sintesi delle determinazioni ottenute per li litotipi dell'Unità C è rappresentata del diagramma di figura n. 12, in cui gran parte dei valori di E sono compresi nell'intervallo tra 20 e 35 MPa.

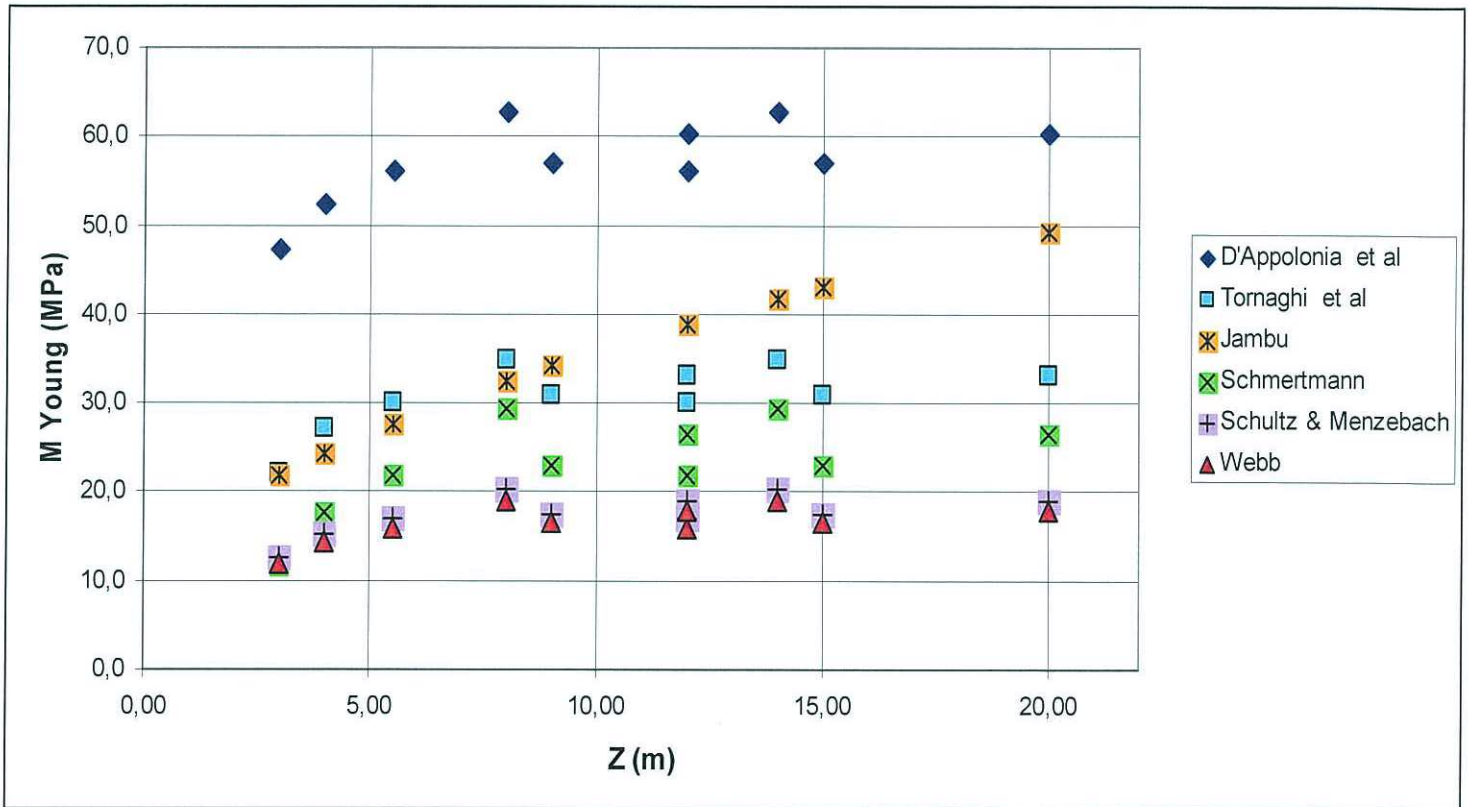


Figura n.12 – Unità C sabbiosa - Valori del Modulo E di Young ricavati da prove SPT

Per una stima delle caratteristiche di addensamento, resistenza e deformabilità dei depositi sabbioso-ghiaiosi e ghiaioso-sabbiosi dell'**Unità D** sono state utilizzate alcune correlazioni geotecniche di letteratura, pur tenendo conto che il loro utilizzo in presenza di forti componenti ghiaiose può condurre ad una sovrastima dei parametri meccanici sopra indicati.

Per una valutazione della densità relativa si è fatto riferimento alla seguente relazione:

Schultze & Mezembach

$$\ln(Dr\%) = 0,478 \ln(N_{spt}) - 0,262 \ln(\sigma) + 2,84$$

Il metodo di Schultze & Mezembach (1961) è valido per le sabbie da fini a ghiaiose, per qualunque valore di pressione efficace, in depositi normalmente consolidati. Nel caso di depositi ghiaiosi il valore di $Dr(\%)$ viene sovrastimato.

I valori di Dr ottenuti, variabili entro un intervallo tra il 70% e 80%, sono rappresentativi di depositi sabbioso-ghiaiosi addensati. Valori leggermente inferiori e ritenuti maggiormente rappresentativi, indicativi di litotipi da mediamente addensati a addensati ($Dr=60-75\%$), sono stati ottenuti dalla relazione già nota di Terzaghi e Peck, 1948 tra la resistenza alla penetrazione, ottenuta con il valore normalizzato $(N_1)_{60}$, e la densità relativa $Dr(\%)$: $(N_1)_{60} / Dr^2 = 60$. (v. figura n.13).

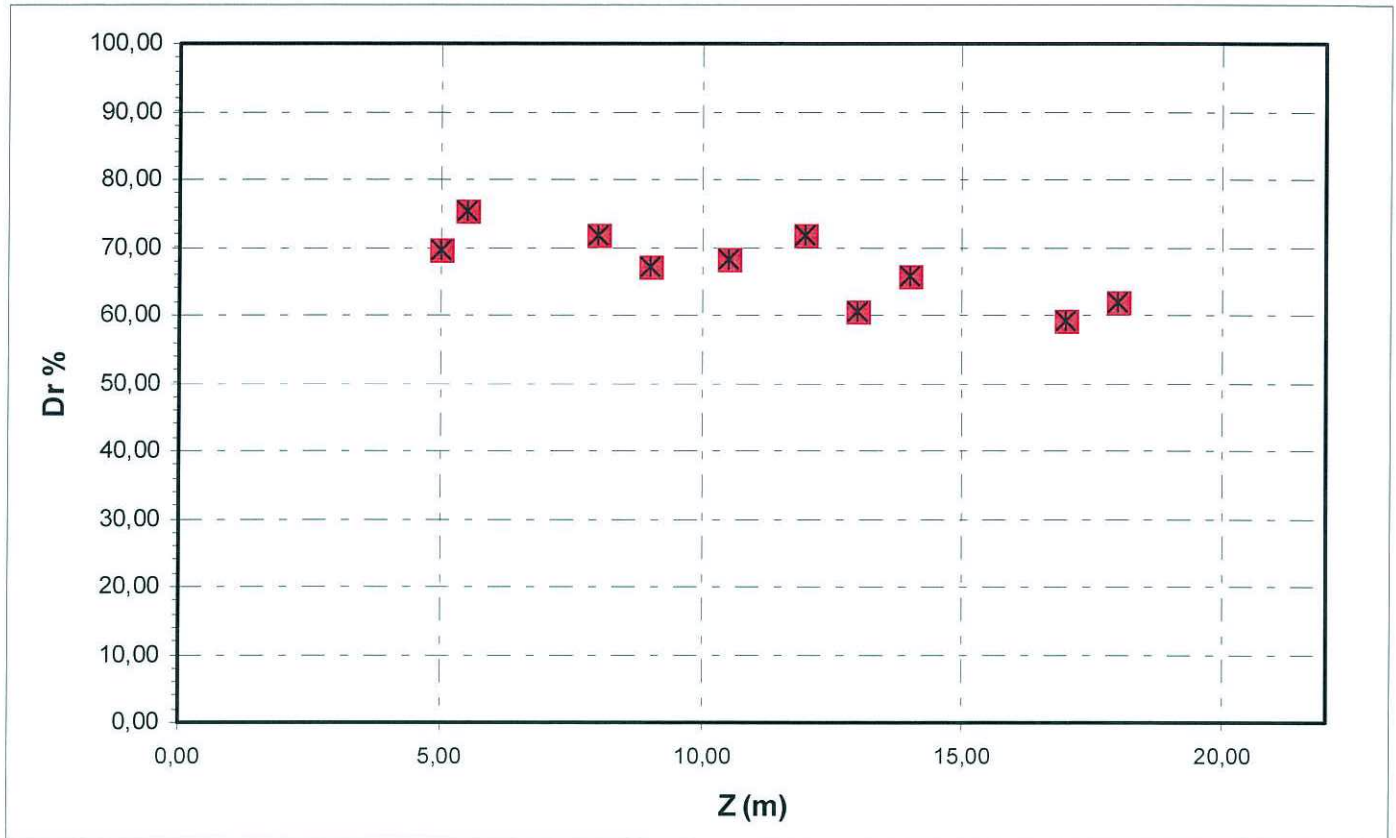


Figura n. 13 - Unità D Sabbioso-ghiaiosa – Valori di densità relativa ricavati da valori di $N_{spt} - (N_1)_{60} / Dr^2 = 60$

Per quanto riguarda una valutazione dei parametri di resistenza in condizioni drenate, si è fatto ricorso alle seguenti relazioni:

a) Japanese National Railway

Il metodo è valido per sabbie medie - grosse fino a sabbie ghiaiose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità superiori a 8 - 10 m

nel caso di terreni sopra falda e di 15 m per terreni immersi in falda ($\sigma > 15-20$ t/mq).

Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\varphi = 0,3Nspt + 27$$

dove $Nspt$ è il numero di colpi medio misurato nello strato

b) Owasaki & Iwasaki

Il metodo è valido per sabbie da medie a grossolane fino a debolmente ghiaiose. Anche questo metodo trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8 - 10 m per terreni sopra falda e superiori a 15 m per terreni in falda ($\sigma > 15-20$ t/mq).

Il metodo si basa sulla seguente relazione:

$$\varphi = \sqrt{20Nspt} + 15$$

dove $Nspt$ è il numero di colpi medio misurato nello strato.

c) Hatanaka e Uchida

A differenza delle formule precedenti questo metodo propone una correlazione fra φ il parametro $N1$ (resistenza penetrometrica normalizzata rispetto alla pressione efficace di 1 kg/cmq). $N1$ viene valutato con la relazione di Liao e Whitman (1986):

$$N1 = N_{spt} \left(\frac{1}{\sigma_{v0}'} \right)^{0.5}$$

dove σ_{v0}' è la pressione efficace alla profondità di lettura.

L'angolo di attrito viene fornito quindi dalla relazione:

$$\varphi = \sqrt{20N1} + 20$$

Le risultanze delle analisi condotte, riportate nel diagramma di figura n. 14, conducono a valori piuttosto disomogenei dell'angolo di attrito, conseguenti alla grande variabilità del contenuto in ghiaia del materiale. D'altro canto, l'assenza complessiva di prove SPT a rifiuto, e comunque il numero di colpi mediamente pari o inferiore ai 50 colpi, appaiono fattori indicativi della prevalenza di depositi sabbioso-ghiaiosi rispetto a facies più francamente ghiaiose.

In relazione ai caratteri litologici e granulometrici desunti dall'esame dei dati geognostici a disposizione, possono pertanto ritenersi rappresentativi angolo di attrito dell'ordine dei 35-36° per i litotipi sabbioso-ghiaiosi e compresi in un range tra 38°-39° per i depositi più grossolani ghiaioso-sabbiosi.

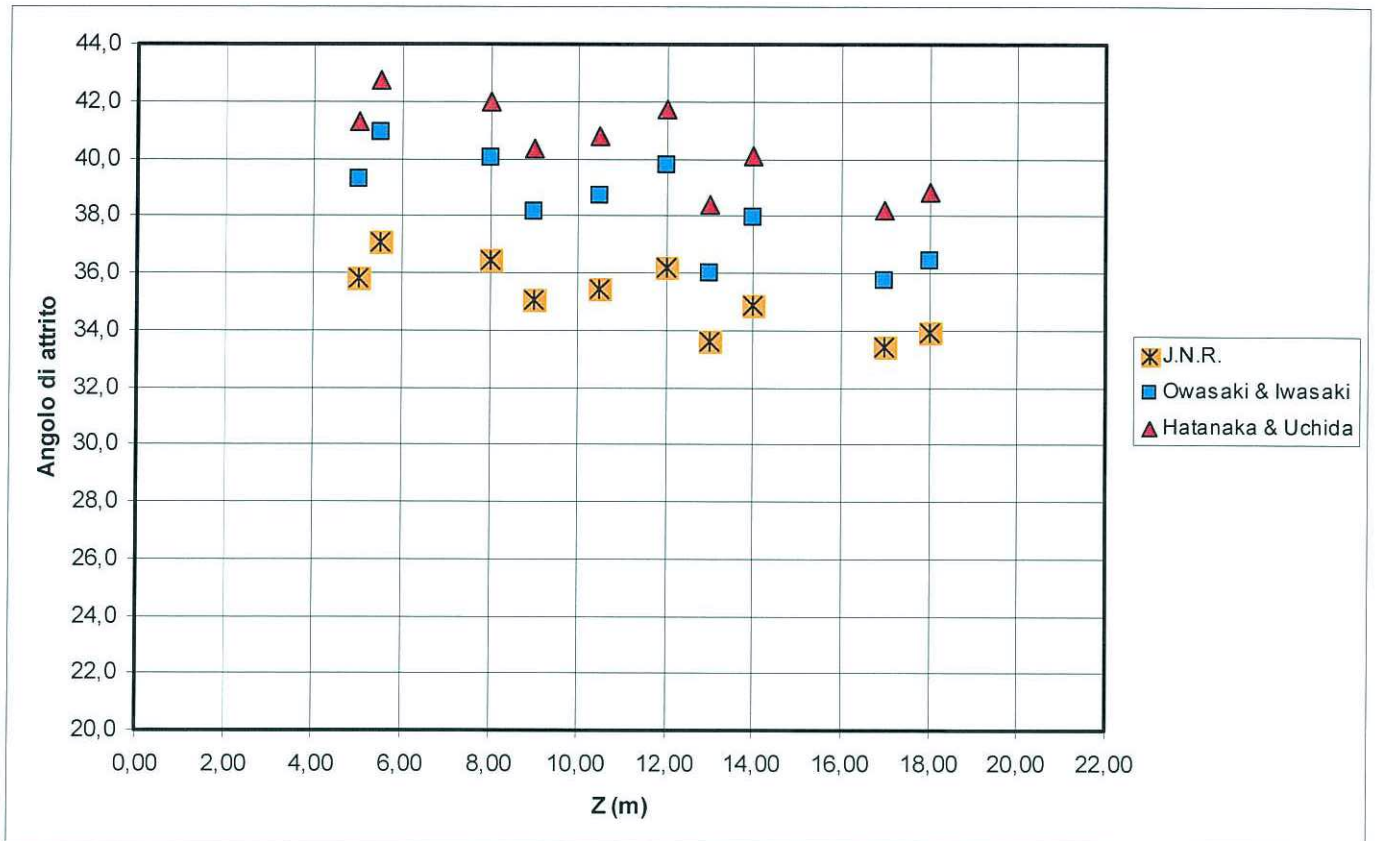


Figura n. 14 – Unità D sabbioso-ghiaiosa e ghiaiosa: Valori di angolo di attrito ricavati dalle correlazioni geotecniche utilizzando il valori di N_{spt} 30

I risultati dell'utilizzo delle relazioni di Tornaghi et al., Schmertmann, D'Appolonia e Jambu per la determinazione del modulo di Young è riportata nel diagramma di figura n.15, da cui possono ritenersi rappresentativi valori di E compresi nell'intervallo di 38-50 MPa.

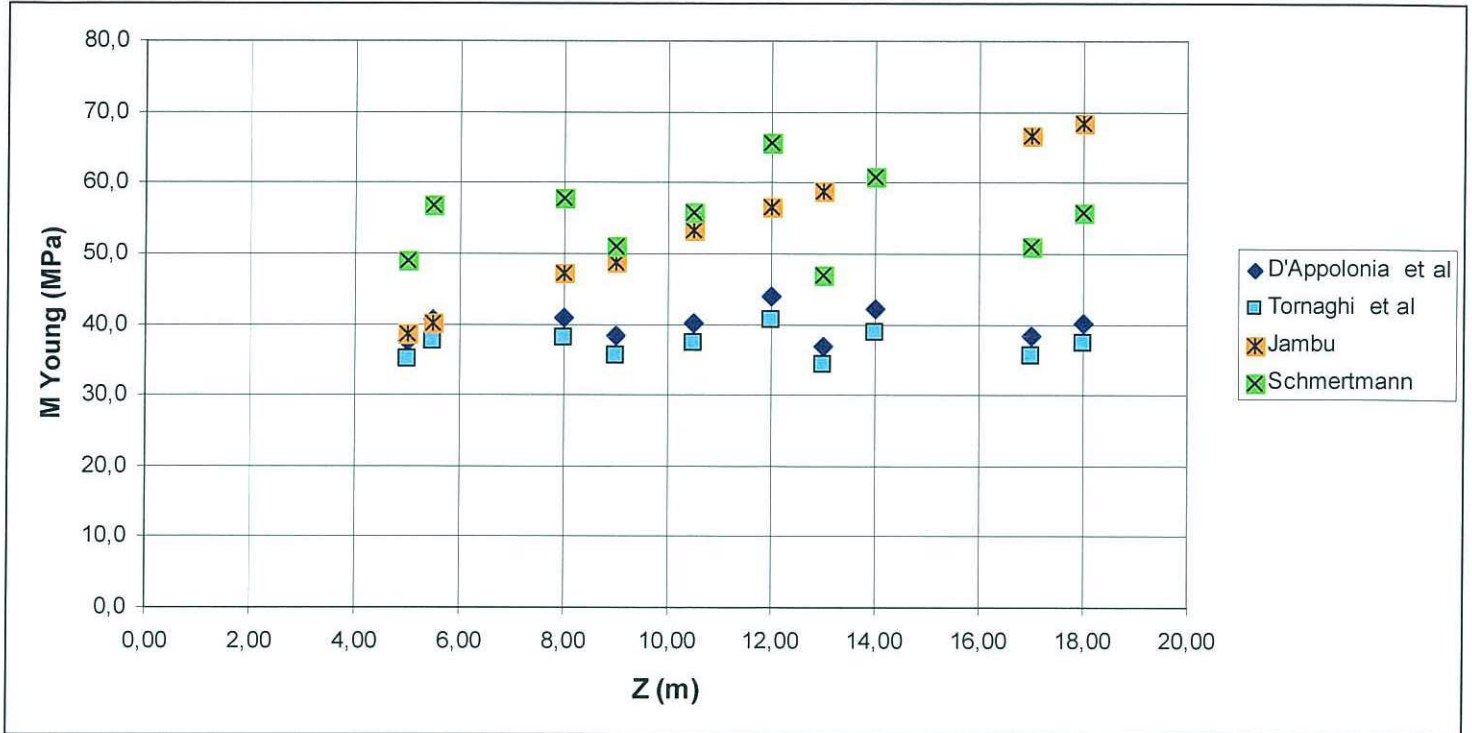


Figura n.15 – Unità D sabbioso-ghiaiosa e ghiaioso-sabbiosa – Valori del Modulo E di Young ricavati da prove SPT

Sulla base di tali considerazioni si riassumono in quanto segue le caratteristiche fisico-meccaniche complessive che si ritengono maggiormente rappresentative per i litotipi delle Unità C e D.

UNITA' GEOTECNICA	PESO DI VOLUME KN/MC	Nspt	Qc (prove CPTE) (Mpa)	C' (KPa)	Dr (%)	ANGOLO DI ATTRITO ϕ'	MODULO Ed (MPa)	MODULO YOUNG E (MPa)
UNITA' C	19-20		3-8	0	55-65	30°-33°	13 -20	20-35

Tabella n.6 – Principali parametri geotecnici dell'Unità C

UNITA' GEOTECNICA	PESO DI VOLUME KN/MC	Nspt	Qc (prove CPTE) (Mpa)	C' (KPa)	Dr (%)	ANGOLO DI ATTRITO ϕ'	MODULO Ed (MPa)	MODULO YOUNG E (MPa)
UNITA' D	19-21		10-17	0	60-75	35°-39°	28 -34	38-50

Tabella n.7 – Principali parametri geotecnici dell'Unità D

	LINEA AV/AC					
	PROGETTO PRELIMINARE – Tratta Portogruaro – Ronchi dei Legionari					
RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	L346	00	R 11 RB	GE 00 05 001	A	63 di 64

4.3 – Suscettività dei terreni alla liquefazione

La liquefazione è un particolare processo che causa la temporanea perdita di resistenza di un sedimento che si trova al di sotto del livello di falda, portandolo a comportarsi come un fluido viscoso a causa di un aumento della pressione neutra e di una riduzione della pressione efficace. Tale fenomeno avviene, cioè, quando la pressione dei pori aumenta fino ad eguagliare la pressione intergranulare.

Tale incremento di pressione neutra è causato, principalmente, dalla progressiva diminuzione di volume che si registra in un materiale granulare poco addensato soggetto alle azioni cicliche di un sisma.

I fattori predisponenti principali sono rappresentati da condizioni di saturazione del terreno, non compattato, non consolidato, sabbioso o limoso o un miscuglio con poca argilla.

Ovviamente, per quanto detto in precedenza, sono suscettibili di liquefazione terreni granulari, da poco a mediamente addensati, aventi granulometria compresa tra le sabbie ed i limi, con contenuto in fine piuttosto basso. Tali terreni devono essere altresì posti al di sotto del livello di falda e a profondità relativamente basse, generalmente inferiori ai 15 m dal p.c..

Con riferimento ai caratteri geotecnici del sottosuolo lungo il tracciato di progetto, in assenza di ulteriori e specifiche indagini di sito, possono risultare a rischio di liquefazione gli orizzonti granulari di natura sabbiosa e sabbioso-limosa più superficiali in falda, presenti fino a profondità dell'ordine dei 5-6 metri, laddove prevalgono valori di densità relativa meno elevati, indicativi di materiali

mediamente addensati o localmente poco addensati (valori di N_{spt} compresi tra 7 e 15 colpi).

Meno elevato appare il rischio di liquefazione per i depositi sabbiosi e sabbioso-limosi presenti a maggiore profondità, per i quali le indagini geognostiche a disposizione individuano livelli di addensamento maggiormente elevati. Alla luce dei dati geognostici a disposizione, valori di N_{30} inferiori ai 20 colpi risultano infatti piuttosto rari a profondità superiori a 10 metri.

Una valutazione di maggiore dettaglio della potenzialità di liquefazione dei depositi sabbiosi presenti nel territorio in esame potrà essere effettuata sulla base di una maggiore mole di dati geognostici di sito e granulometrici di laboratorio nelle successive fasi di progettazione.