

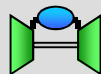


ORDINE REGIONALE DEI GEOLOGI DEL PIEMONTE

LA PROVA SPT (Standard Penetration Test) caratteristiche, uso e interpretazione

Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi

Corso FAD 7 Luglio 2022



Ing. Geol. Piergiuseppe Frolidi
07/07/2022

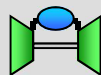


Le NTC 2018: Le NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

Le **Norme Tecniche per le Costruzioni** ed. 2018 **[1]** (al seguito brevemente NTC 2018) recentemente entrate in vigore, nel Capitolo 6 dell'omonimo titolo trattano la Progettazione Geotecnica, ovvero le modalità con le quali progettare, controllare e collaudare le opere interagenti con il terreno; questa sezione delle norme deriva strettamente dall'Eurocodice 7 **[2]** di cui è una sintesi.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità.

Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e dei prodotti e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere.



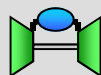
Le NTC 2018: Le INDAGINI GEOTECNICHE

Il paragrafo 6.2.2 – Indagini, caratterizzazione e modellazione geotecnica, stabilisce che:

“Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento, devono riguardare il volume significativo e, in presenza di azioni sismiche, devono essere conformi a quanto prescritto ai §§ 3.2.2 e 7.11.2. Per volume significativo di terreno si intende la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso. Le indagini devono permettere la definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo necessari alla progettazione.....”

Ai fini dell’analisi quantitativa di uno specifico problema, per modello geotecnico di sottosuolo si intende uno schema rappresentativo del volume significativo di terreno, suddiviso in unità omogenee sotto il profilo fisico-meccanico, che devono essere caratterizzate con riferimento allo specifico problema geotecnico.”

Da quanto prescritto dalle NTC 2018 si deduce la necessità di dedurre il **modello geotecnico del sottosuolo**.





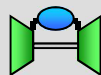
Le NTC 2018: Le INDAGINI GEOTECNICHE

Le NTC 2018 proseguono inoltre con:

“ *I **valori caratteristici** delle proprietà fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere dedotti dall’interpretazione dei risultati di specifiche **prove di laboratorio** su campioni rappresentativi di terreno e di **prove e misure in sito**.* ”.

Non sempre è possibile prelevare campioni rappresentativi di terreno da sottoporre a specifiche prove di laboratorio, per diversi motivi, tra i quali:

- a) Fase di progettazione di fattibilità o preliminare, tale da non consentire economicamente l’operazione
- b) Presenza di terreni a prevalente componente granulare che non permettono il prelievo di campioni indisturbati
- c) Necessità di caratterizzazione estensiva di diverse verticali di indagine e conseguente scelta di sondaggi con prove in sito come strumento a migliore rapporto costi/benefici per il raggiungimento delle finalità
- d) Un insieme dei criteri sopra descritti.



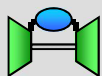
Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

Pertanto la determinazione del modello geotecnico del sottosuolo e dei reativi parametri caratteristici deve essere effettuata con l'ausilio delle **prove e misure in sito**.

In tal caso dalle prove in sito si potranno ricavare principalmente le seguenti **proprietà fisico-meccaniche** dei terreni investigati, con modalità dirette o indirette, analitiche o empiriche:

- 1) di addensamento o compattezza
- 2) di resistenza al taglio
- 3) di elasticità
- 4) di sovraconsolidazione
- 5) ecc.

La maggior parte delle prove in sito permette di ricavare tali parametri da correlazioni empiriche di derivazione sperimentale, ovvero confrontando i risultati delle prove in sito con i reali parametri ottenuti con prove di laboratorio, ottenendo la legge matematica che esprime il valore di questi ultimi partendo dal valore della prova in sito.



Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

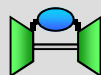
Inoltre la determinazione del modello geotecnico del sottosuolo e dei parametri caratteristici non è la sola finalità dell'esecuzione delle prove in sito; in molti casi può divenire lo strumento per la determinazione diretta della resistenza caratteristica di determinate **opere geotecniche**, quali, per esempio:

- 1) fondazioni superficiali
- 2) fondazioni profonde su pali.

Infatti, al § 6.2.4.1.2 – Resistenze, le NTC stabiliscono che:

«**Il valore di progetto della resistenza R_d** può essere determinato:

- a) *in modo analitico,*;
- b) *in modo analitico, con riferimento a correlazioni con i risultati di prove in sito, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;*
- c) *sulla base di misure dirette su prototipi,*»



Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

Con riferimento al **valore di progetto della resistenza R_d** , si ricorda che è quel valore per il quale, per ogni stato limite ultimo che preveda il raggiungimento della resistenza di un elemento strutturale (STR) o del terreno (GEO), come definiti al § 2.6.1, deve essere rispettata la condizione [6.2.1]:

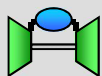
$$E_d \leq R_d$$

essendo E_d il **valore di progetto dell'azione** o dell'effetto dell'azione, definito dalle relazioni [6.2.2a] o [6.2.2b].

A titolo esemplificativo, nel § 6.4.3.1 – Verifiche agli stati limite SLU, relativo ai pali di fondazione, si cita:

La resistenza caratteristica R_k del palo singolo può essere dedotta da:

- a) risultati di prove di carico statico
- b) metodi di calcolo analitici, dove R_k è calcolata a partire dai valori caratteristici dei parametri geotecnici, oppure con l'impiego di **relazioni empiriche** che utilizzino direttamente i risultati di prove in sito (prove penetrometriche, pressiometriche, ecc.);



Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

Tra le indagini geotecniche in sito che generalmente si eseguono più frequentemente nella campagne geognostiche finalizzate alla determinazione del modello geotecnico del sottosuolo, vi si trovano le seguenti:

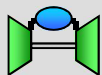
- 1) prova penetrometrica statica continua **CPT** - Cone Penetration Test;
 - L'indagine fornisce il valore **R_p** (resistenza alla punta) e **R_t** (resistenza totale = $R_p + R_l$ - resistenza laterale) in continuo lungo la verticale della prova.
 - La prova permette di ricavare con ottima approssimazione, soprattutto nei terreni coesivi, i valori della resistenza al taglio non drenata (Coesione non drenata - C_u).
- 2) prova penetrometrica dinamica **DPSH** - Dynamic Probing Super Heavy;
 - Forniscono il valore N-30 o N-20 (numero di colpi per l'affondamento di 30 o 20 cm della punta standard). La prova permette di ricavare con ottima approssimazione, soprattutto nei terreni granulari, i valori di attrito della resistenza al taglio drenata (Angolo di attrito - ϕ').
- 3) **Prova SPT – Standard Penetration Test.**



Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

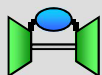
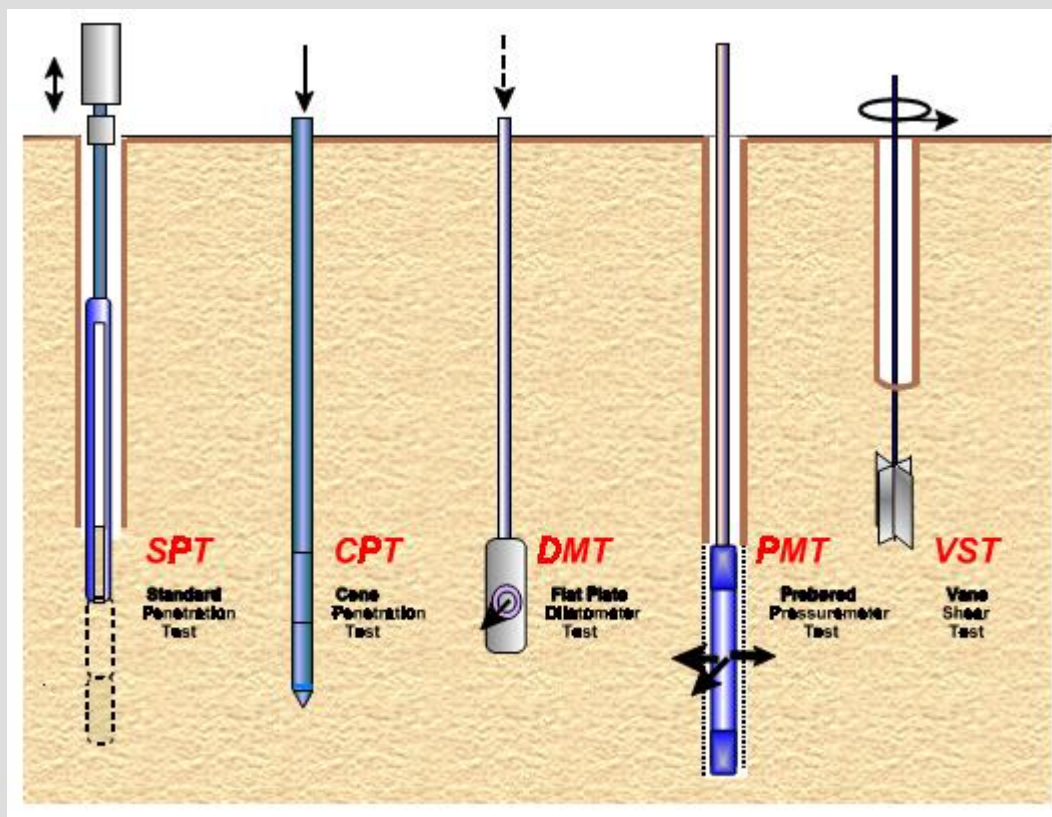
Le prime due possono ritenersi di **prove tipo continuo** e si eseguono direttamente senza l'ausilio di una perforazione (esse stesse perforano il terreno rispettivamente in modalità quasi statica e dinamica); i loro principali vantaggi delle prove geognostiche in continuo risiedono nella possibilità di:

- 1) verificare con ottimo dettaglio la successione dal punto di vista litologico (in particolare con le prove CPT)
- 2) determinare la presenza di sottili livelli deboli
- 3) ricavare indirettamente a mezzo di specifiche correlazioni analitiche e/o empiriche i valori puntuali delle proprietà geotecniche significative
- 4) effettuare analisi statistiche sui parametri direttamente ricavati dalla prova (es.: resistenza alla punta o alla superficie laterale) o sui parametri indirettamente ricavati attraverso correlazioni empiriche
- 5) determinare precisamente le unità geotecnicamente omogenee che si sviluppano all'interno della successione di cui al punto 1) e determinarne i valori caratteristici delle proprietà geotecniche significative.



Le NTC 2018 : Le INDAGINI IN SITO

Nell'immagine sottostante (da FHWA, 2002) sono rappresentate schematicamente le più comuni indagini in sito.



La prova SPT

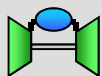
Le caratteristiche

Le prove in continuo dovrebbero essere eseguite tutte le volte che sono fisicamente possibili (assenza di granulometrie grossolane e di trovanti).

A differenza delle prime due prove citate, la prova SPT, che necessita di una perforazione (come le PMT e VST), è una prova:

- **Dinamica**: ossia la penetrazione locale della strumentazione di prova avviene a mezzo di colpi inferti da un maglio, quindi con modalità prettamente dinamica;
- **Discontinua**: ossia è eseguita solo in corrispondenza di determinate profondità della perforazione, scelte secondo intervalli regolari o irregolari, interrompendo la perforazione a carotaggio continuo o a distruzione.

Nonostante non sia una prova continua, la sua diffusione, economicità, versatilità e ripetibilità ne fanno una prova largamente praticata e ricchissima di correlazioni con molteplici parametri geotecnici a livello internazionale.



La prova SPT

Le caratteristiche

Nella sua concezione classica e originaria, la prova SPT viene eseguita durante l'avanzamento di una perforazione del terreno per ottenere una misura approssimativa della resistenza dinamica dello stesso, nonché un campione disturbato (tipo **split barrel**) di terreno.

Storicamente il test è stato introdotto dalla Raymond Pile Company nel **1902** e rimane oggi il più comune test in situ in tutto il mondo.

Le procedure per l'SPT sono dettagliate in ASTM D 1586 e AASHTO T-206.

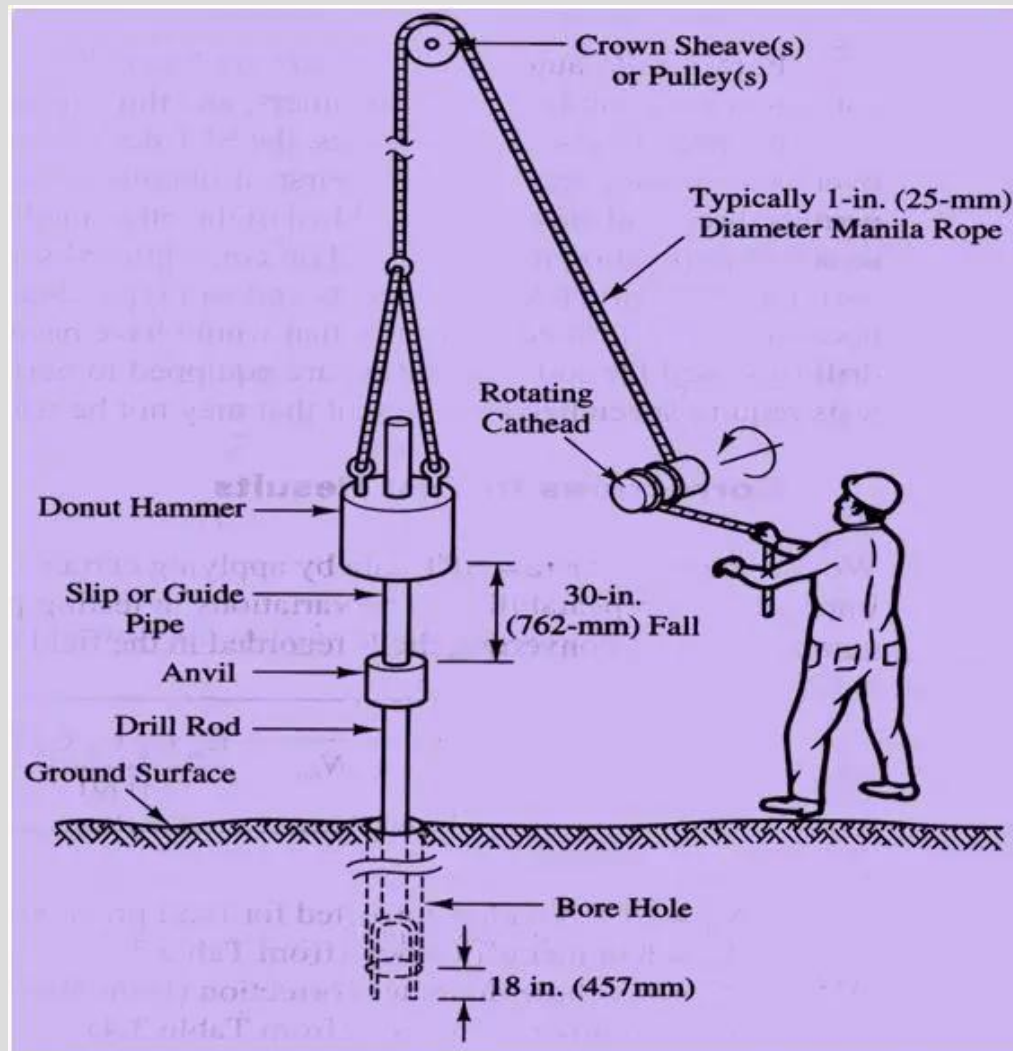
La procedura di prova prevede l'inserimento di un tubo campionatore (split barrel) a pareti spesse nel terreno e la misurazione del numero di colpi necessari per farlo avanzare per un tratto verticale di 300 mm (corrispondente a circa 1 piede).

Un sistema dinamico a caduta, in grado di sollevare e sganciare ripetutamente un maglio (o martello) il cui peso è pari a 63,5 kg (140 libbre) da un'altezza 0,76 m (30 pollici), costituisce il motore dell'affondamento (o avanzamento) del campionatore, il quale, sottoposto a tali impulsi, deve penetrare nel terreno per tre incrementi successivi di 150 mm (6 pollici) ciascuno.



La prova SPT

Le caratteristiche



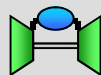
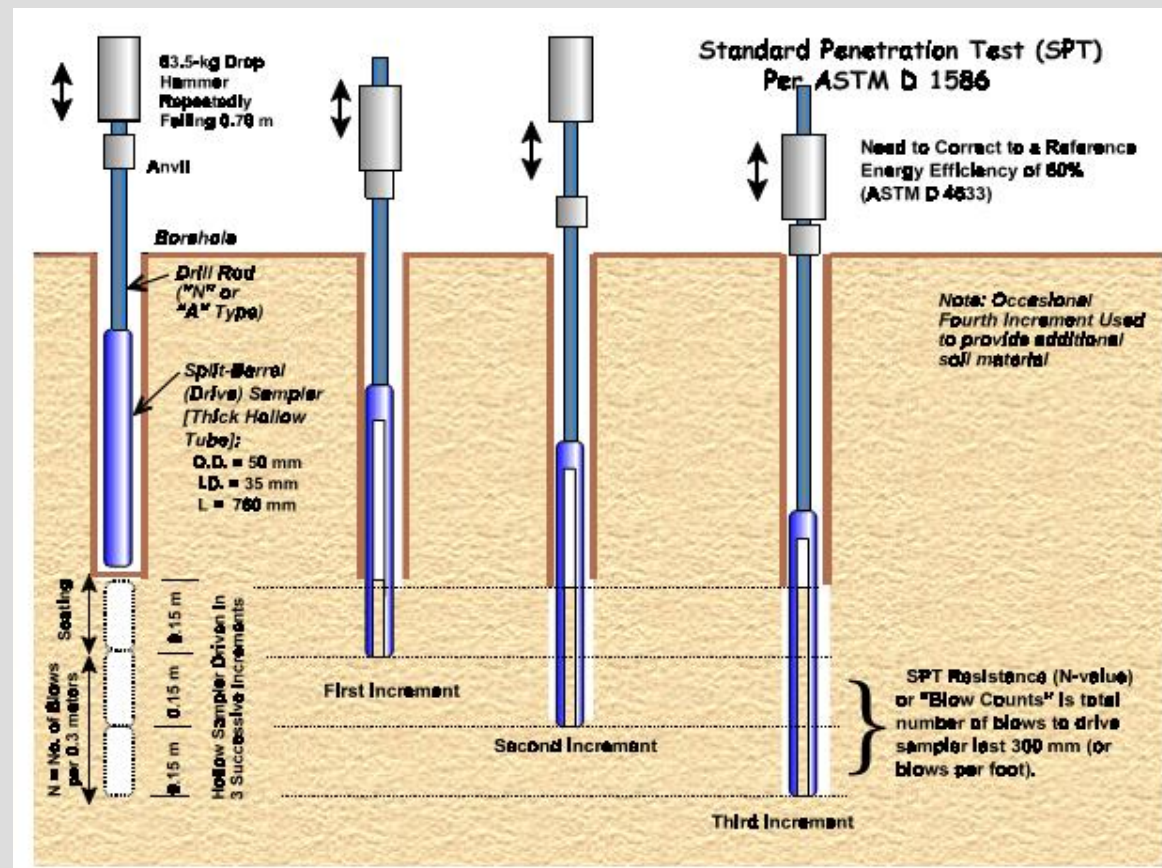
Nella figura a lato si illustra lo schema della prova nella sua applicazione originale.



La prova SPT

Le caratteristiche

Nell'immagine sottostante (da FHWA, 2002) è rappresentata schematicamente la prova SPT.



La prova SPT

Le caratteristiche

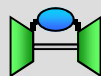
Il **primo avanzamento** (avanzamento 150 mm), che potremo denominare N1, viene considerato come di "assestamento", per recuperare eventuali rigonfiamenti del terreno e superare eventuali detriti di perforazione che in esso si sono accumulati.

Invece il **secondo e il terzo avanzamento** (avanzamento complessivo 300 mm), che potremo denominare N2 e N3, sono considerati utili ai fini della prova e vengono sommati per dare il valore N_{SPT} («numero di colpi» = $N2+N3$) che definisce la resistenza SPT.

Detto valore somma ha come unità di misura colpi/0,3 m o colpi per piede.

Qualora il campionatore non riesca ad avanzare per tutti i 450 mm della prova, viene registrato il numero di colpi per ogni incremento di 150 mm effettivamente realizzati e, laddove avviene il rifiuto alla penetrazione, l'avanzamento corrispondente ad un numero convenzionale di colpi, in genere pari a 50.

Per avanzamenti parziali viene registrata la profondità di penetrazione oltre al numero di colpi.



La prova SPT

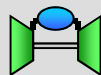
Le caratteristiche

Convenzionalmente la prova SPT può essere interrotta all'accadimento delle seguenti fattispecie:

- 1) sono stati raggiunti **100 colpi**
- 2) il numero di colpi **supera 50** in corrispondenza di un avanzamento di 150 mm
- 3) il campionatore non riesce ad avanzare per **10 colpi consecutivi**.

Il rifiuto SPT è definito da resistenze di penetrazione superiori a 100 colpi per 51 mm (100/2"), sebbene ASTM D 1586 abbia ridefinito questo limite a 50 colpi per 25 mm (50/1").

Qualora si incontri il substrato roccioso o un ostacolo come un masso (trovante), le norme americane prevedono che si possa avanzare utilizzando metodi di carotaggio diamantati o a rotazione con distruzione di nucleo (ASTM D 2113; AASHTO T 225) a discrezione del geotecnico.



La prova SPT

L'applicabilità secondo le norme

La prova SPT per l'EC 7.

Table 2.1 — Simplified overview of the applicability of field investigation methods^{a)} covered by Sections 3 and 4

| Field investigation methods ^{a)} | Possibly obtainable results | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|----|------------------|-----------------------------|-----|----------------------|-------------------|---------|----------|-----|-----|-------|--------------------------|-------------|---------------|
| | Sampling | | | | | | Field tests | | | | | | | | | | Groundwater measurements | | |
| | Soil | | | Rock | | | CPT & CPTU | Pressuremeter ^{a)} | RDT | Flexible Dilatometer | SPT ^{d)} | DPL/DPM | DPH/DPSH | WST | FVT | DMT | PLT | Open system | Closed system |
| Category A | Category B | Category C | Category A | Category B | Category C | | | | | | | | | | | | | | |
| Basic information | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Type of soil | C1 F1 | C1 F1 | C2 F2 | — | — | — | C2 F2 | C3 F3 | — | C3 F3 | C2 F1 | C3 F3 | C3 F3 | — | — | C2 F2 | — | — | — |
| Type of rock | — | — | — | R1 | R1 | R2 | R3 ^{e)} | R3 | R2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Extension of layers ^{b)} | C1 F1 | C1 F1 | C3 F3 | R1 | R1 | R2 | C1 F1 | R3 C3 F3 | R3 | C3 F3 | C2 F2 | C1 F2 | C1 F2 | F2 | — | C2 F1 | — | — | — |
| Groundwater level | — | — | — | — | — | — | C2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | R2 C1 F2 | R1 C1 F1 |
| Pore water pressure | — | — | — | — | — | — | C2 F2 | F3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | R2 C1 F2 | R1 C1 F1 |
| Geotechnical properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Particle size | C1 F1 | C1 F1 | — | R1 | R1 | R2 | — | — | — | — | C2 F1 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Water content | C1 F1 | C2 F1 | C3 F3 | R1 | R1 | — | — | — | — | — | C2 F2 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Atterberg limits | F1 | F1 | — | — | — | — | — | — | — | — | F2 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Density | C2 F1 | C3 F3 | — | R1 | R1 | — | C2 F2 | — | — | — | C2 F2 | C2 | C2 | — | — | C2 F2 | — | — | — |
| Shear strength | C2 F1 | — | — | R1 | — | — | C2 F1 | C1 F1 | — | — | C2 F3 | C2 F3 | C2 F3 | C2 | F1 | C2 F1 | R2 C1 F1 | — | — |
| Compressibility | C2 F1 | — | — | R1 | — | — | C1 F2 | C1 F1 | R1 | F1 | C2 F2 | C2 F2 | C2 F2 | C2 | — | C2 F1 | C1 F1 | — | — |
| Permeability | C2 F1 | — | — | R1 | — | — | C3 F2 | F3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | C2 F3 | C2 F2 |
| Chemical tests | C1 F1 | C1 F1 | — | R1 | R1 | — | — | — | — | — | C2 F2 | — | — | — | — | — | — | — | — |

^{a)} see sections 3 and 4 for nomenclature in horizontal and vertical direction

^{b)} will depend on pressuremeter type

^{c)} assuming sample is retained

^{d)} soft rock only

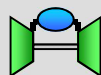
^{e)} main soil groups "coarse" and "fine" according to ISO 14688-1

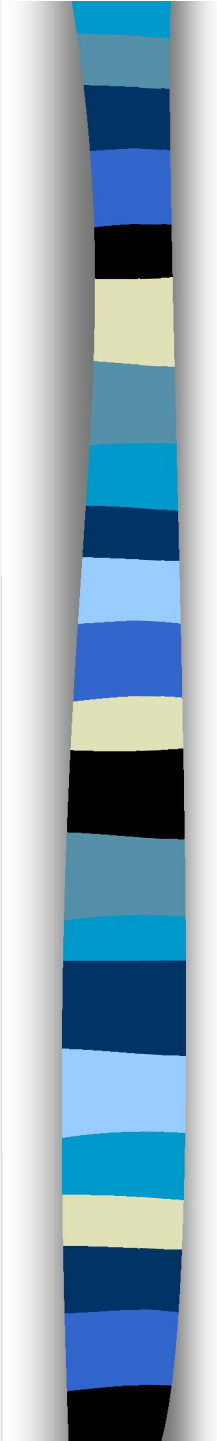
Applicability: R1 High for rock; C1 High for coarse soil^{e)}; F1 High for fine soil^{e)}; — not applicable

R2 Medium for rock; C2 Medium for coarse soil; F2 Medium for fine soil

R3 Low for rock; C3 Low for coarse soil; F3 Low for fine soil

NOTE Depending on the ground conditions (such as soil type, groundwater conditions) and the planned design, the selection of investigation methods will vary and may deviate from this table.





La prova SPT

Vantaggi e svantaggi

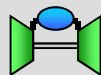
La prova SPT presenta i seguenti **vantaggi**:

- 1) Si ottiene sia un numero caratteristico che un campione (disturbato su cui possono essere fatte determinazioni e test di solo indice)
- 2) È una prova semplice e ripetibile
- 3) È adatta a molti tipi di terreno tra cui le rocce deboli
- 4) È largamente utilizzata e disponibile.

Per contro presenta anche i seguenti **svantaggi**:

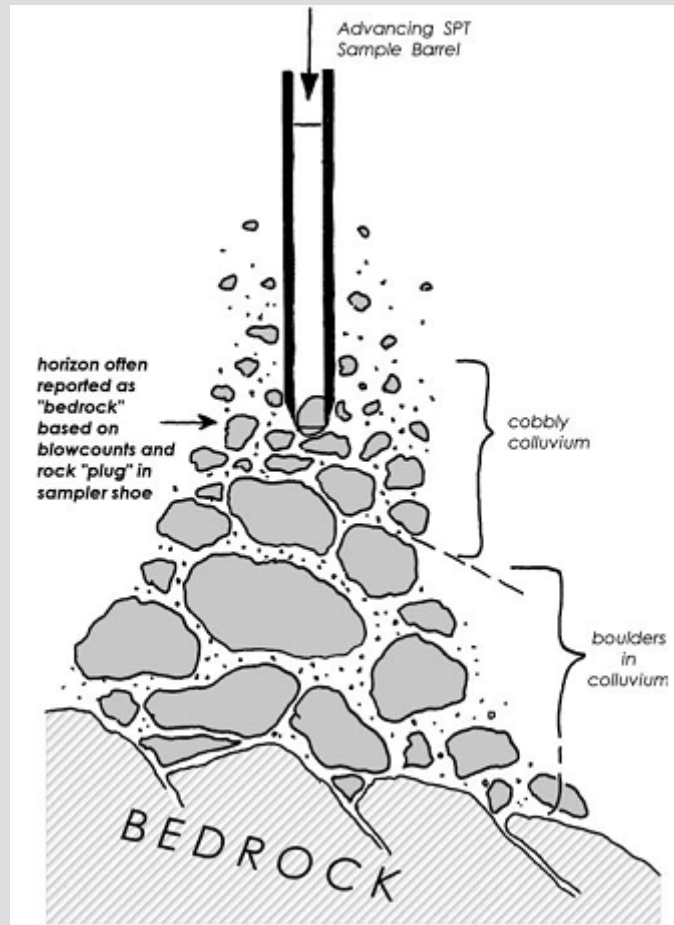
- 1) Non è sempre affidabile su argille soffici e limi
- 2) Presenta una elevata variabilità e incertezza.

Relativamente allo svantaggio di cui la p.to 1), esso può essere in parte superato grazie alla abbondante mole di correlazioni sperimentali su detti terreni, diffuse a livello internazionale; si deve osservare che il valore di resistenza alla penetrazione in terreni coesivi varia in funzione del **grado di saturazione locale del terreno**.



La prova SPT

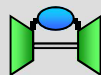
Vantaggi e svantaggi



Tra gli **svantaggi** della prova SPT si annovera il piccolo diametro della scarpa del campionatore standard.

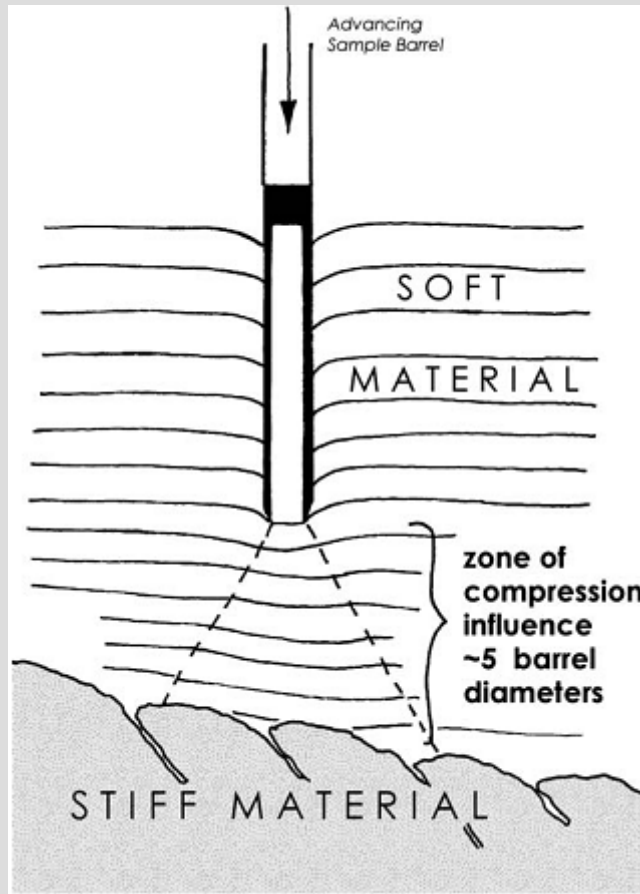
Anche se per la maggior parte è adatto a terreni granulari, il campionatore standard SPT non può recuperare clasti la cui misura diametricale è maggiore di 1 3/8 inch (corrispondenti a circa 3,5 cm). come mostrato nella figura a sx (da Rogers, 2006).

In questo caso possono nascere supposizioni errate in merito la posizione del substrato roccioso dato dall'apparente "rifiuto all'avanzamento".



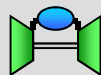
La prova SPT

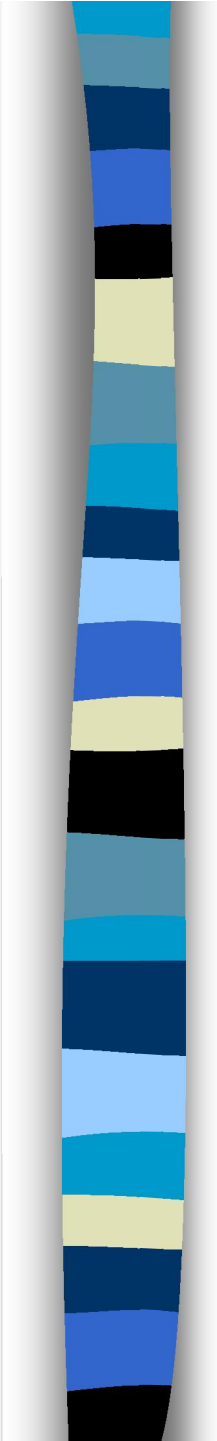
Vantaggi e svantaggi



Un ulteriore **svantaggio** della prova SPT risulta dal possibile avvicinamento a contatti stratigrafici rigidi; in questo caso il camionatore percepisce una crescente resistenza all'avanzamento, e il conteggio dei colpi aumenterà notevolmente, anche se il campionamento continua ad avvenire nel terreno soffice, come mostrato nella figura a sx (da Rogers, 2006).

Anche in questo caso possono nascere interpretazioni non corrette del numero dei colpi, dando luogo a determinazioni non conformi alla realtà fisica locale.



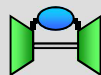


La prova SPT

Vantaggi e svantaggi

Inoltre uno **svantaggio** della prova SPT risulta dal fatto che la capacità di risoluzione del test è accettabile solo nel caso della presenza di orizzonti stratigrafici di spessore maggiore di circa 12 inch, corrispondenti a circa 30 cm, che è appunto l'avanzamento standard che genera il numero della resistenza N_{SPT} .

Per questo motivo la **procedura SPT tende a «mediare» la resistenza penetrometrica** dei terreni in avanzamento, per cui l'effetto e la presenza degli orizzonti di spessore pari a 20÷26 inch (corrispondenti a circa 51÷66 cm) viene perso, nonostante però la loro esistenza può essere desunta dall'ispezione visiva dei campioni recuperati.



La prova SPT

Attrezzature

L'attrezzatura per l'esecuzione della prova SPT è costituita (ISSMFE, 1989) dagli elementi utilizzati per guidare il campionatore nel terreno che comprendono:

Campionatore: un assieme tubolare in acciaio avente il componenti descritti oltre

Aste di azionamento: aste in acciaio che collegano il campionatore alla testa motrice

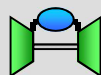
Testa motrice: un'incudine d'acciaio attaccata alla parte superiore delle aste di comando mediante filettature. Nel caso di alcuni gruppi di martelli, noti come sicurezza martelli, questa parte è interna

Martello: un corpo in acciaio del peso di 63,5 kgf

Guida: un'asta d'acciaio per guidare il martello senza intoppi attraverso una caduta libera di 760 mm

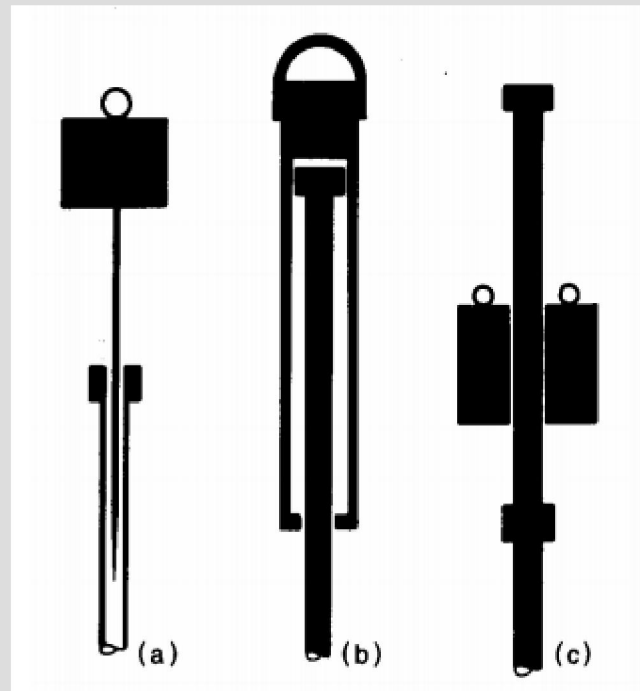
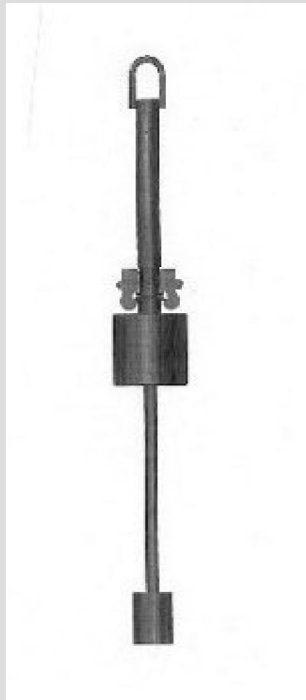
Meccanismo di rilascio: un dispositivo di rilascio meccanico per garantire che il martello abbia una caduta libera costante di 760 mm.

Possono esserci diverse varianti realizzative.



La prova SPT Attrezzature

L'attrezzatura correntemente utilizzata nella pratica americana, vede **tre tipi di martelli a caduta** (a «donut», di sicurezza e automatici), il cui uso modifica i parametri di correzione della prova SPT.



Nelle figure a fianco:

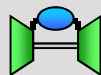
A sx: automatica
hammer

A dx:

(a) pinweight
hammer;

(b) safety hammer;

(c) donut hammer
(after Riggs 1986).



La prova SPT

Attrezzature

Al seguito lo schema dei principali sistemi.

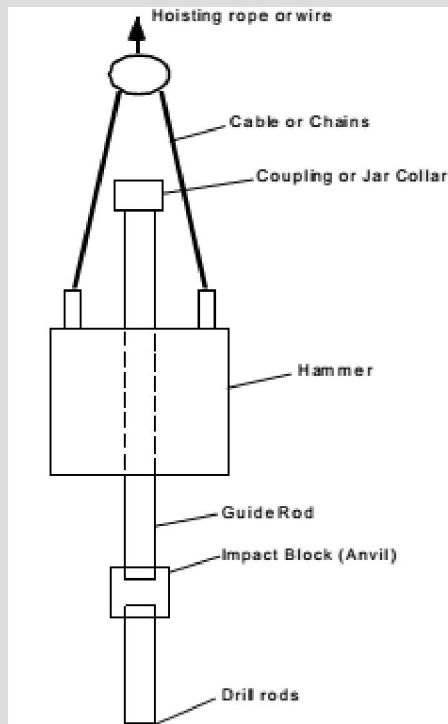


Figure 1. Donut hammer

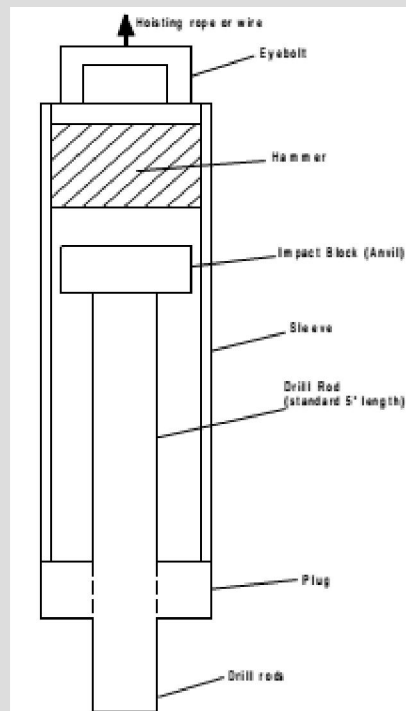


Figure 2. Safety hammer

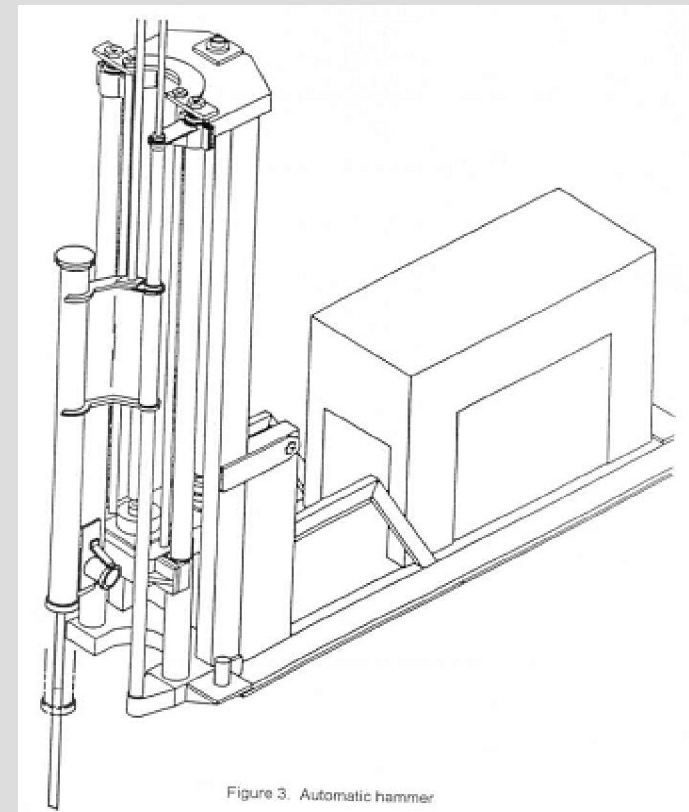
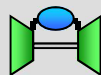


Figure 3. Automatic hammer



La prova SPT

Attrezzature ed efficienza

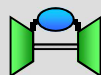
Le differenti attrezzature differiscono, oltre che per l'uso, per la loro **efficienza nella trasmissione dell'energia dinamica sulle aste.**

Detta efficienza di trasmissione dipende inoltre anche dai seguenti **fattori correttivi:**

- 1) Lunghezza delle aste
- 2) Rivestimento
- 3) Diametro del foro
- 4) Tipo e peso dell'incudine su cui batte il maglio
- 5) Frequenza dei colpi di battuta sull'incudine.

Poiché per rendere paragonabile il valore di resistenza SPT dedotto dalle prove occorre renderlo standard, in bibliografia vi sono molti metodi di correzione di tale valore in funzione dei fattori appena descritti.

Pertanto detti fattori correttivi possono differire anche significativamente in funzione dell'autore che li propone e dell'ambiente di sperimentazione (caratteristica sito-specifica).





La prova SPT

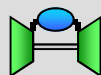
Fattori correttivi standard

In generale si considera che i **fattori correttivi standard** siano i seguenti:

- 1) C_N = fattore correttivo per la pressione litostatica (overburden pressure)
- 2) C_E = fattore correttivo per il rapporto di energia (energy ratio)
- 3) C_B = fattore correttivo per il diametro del foro (borehole diameter)
- 4) C_R = fattore correttivo per la lunghezza delle aste (rod length)
- 5) C_S = fattore correttivo per metodo di campionamento (sampling method).

Tra gli autori che hanno proposto la quasi totalità dei fattori correttivi, si citano, in ordine cronologico:

- Skempton (1986)
- Bowles (1996)
- Robertson & Wride (1997)
- Youd et Alii (2000).

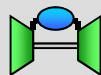


La prova SPT

Fattori correttivi standard

Si riportano alcune tabelle dei fattori correttivi standard in uso.
Robertson and Wride (1997) modificato, da Skempton (1986).

| Factor | Equipment Variable | Term | Correction |
|---------------------|------------------------|-------|---|
| Overburden pressure | | C_N | $(Pa/\sigma'_{vo})^{0.5}$ but $C_N \leq 2$ |
| Energy ratio | Donut hammer | C_E | 0.5–1.0 |
| | Safety hammer | | 0.7–1.2 |
| | Automatic hammer | | 0.8–1.5 |
| Borehole diameter | 65–115 mm | C_B | 1.0 |
| | 150 mm | | 1.05 |
| | 200 mm | | 1.15 |
| Rod length | 3–4 m | C_R | 0.75 |
| | 4–6 m | | 0.85 |
| | 6–10 m | | 0.95 |
| | 10–30 m | | 1.0 |
| | >30 m | | <1.0 |
| Sampling method | Standard sampler | C_s | 1.0 |
| | Sampler without liners | | 1.1–1.3 |



La prova SPT

Fattori correttivi standard

Si riportano alcune tabelle dei fattori correttivi standard in uso.

Corrections proposed by Bowles (1996)

| Factor | Variable | Term | Correction |
|---------------------|-------------------------------|------|--------------|
| Energy Ratio | Trip or Automatic Hammer | n1 | 1.14 – 1.42* |
| | Rope and Pulley Safety Hammer | | 1 – 1.14* |
| | Rope and Pulley Donut Hammer | | 0.64* |
| Rod Length (meters) | Length | | |
| | *10 m+ (100 ft+) | | 1 |
| | *6 – 10 m (20 – 30 ft) | | 0.95 |
| | *4 – 6 m (13 – 20 ft) | | 0.85 |
| Sampler | *0 – 4 m (10 – 13 ft) | | 0.75 |
| | Without liner | | 1 |
| | With liner: dense sand, Clay | | 0.8 |
| Bore Hole Diameter | With liner: loose sand | | 0.9 |
| | *60 – 120 mm (2.5 – 4.5 in) | | 1 |
| | *150 mm (6 in) | | 1.05 |
| | *200 mm (8 in) | | 1.15 |

* where $n1 = (Er/70)$ example for ER = 80% – 100% $n1 = 1.14 – 1.43$

Corrections proposed by Seed (1984) per McGregor and Duncan (1998)

| Factor | Variable | Correction |
|---------------------|-------------------------------|------------|
| Energy Ratio | Trip or Automatic Hammer | 1.67 |
| | Rope and Pulley Safety Hammer | 1 |
| | Donut Hammer | 0.75 |
| Rod Length (meters) | Over 10 m (+30 ft) | 1 |
| | *6 – 10 m (20 – 30 ft) | 1 |
| | *4 – 6 m (13 – 20 ft) | 1 |
| | *3 – 4 m (10 – 13 ft) | 1 |
| | *0 – 3 m (0 – 10 ft) | 0.75 |



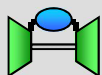
La prova SPT

Fattori correttivi standard

Si riportano alcune tabelle dei fattori correttivi standard in uso.

Table 8. Overburden correction factors (C_N) (after Carter and Bentley, 1991)

| Reference | Correction Factor (C_N) | Units of overburden pressure (σ_v') |
|------------------------------|---|--|
| Peck and Bazaraa (1969) | $C_N = \begin{cases} \frac{4}{1+2\sigma_v'} & \sigma_v' \leq 1.5 \\ \frac{4}{3.25+0.5\sigma_v'} & \sigma_v' > 1.5 \end{cases}$ | ksf |
| Peck et al. (1974) | $C_N = 0.77 \log_{10} \frac{20}{\sigma_v'}$ | kg/cm ² or tsf |
| Tokimatsu and Yoshimi (1983) | $C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma_v'}$ | kg/cm ² or tsf |
| Liao and Whitman (1986) | $C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma_v'}}$ | kg/cm ² or tsf |
| Skempton (1986) | $C_N = \begin{cases} \frac{2}{1 + \sigma_v'} & \text{For fine sands of medium relative density} \\ \frac{3}{2 + \sigma_v'} & \text{For dense, coarse sands when normally consolidated} \\ \frac{1.7}{0.7 + \sigma_v'} & \text{For overconsolidated fine sands} \end{cases}$ | kg/cm ² or tsf |



La prova SPT

Attrezzature ed efficienza

La finalità dei fattori correttivi come illustrati è quella di determinare il seguente parametro standard:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} C_N C_E C_B C_R C_S = \text{numero di colpi SPT standardizzato}$$

Si osservi che esiste anche il parametro precedente (che esclude la correzione per la pressione litostatica), solo successivamente superato:

$$N_{60} = N_{SPT} E_m C_B C_R C_S / 0,60 = \text{numero di colpi SPT corretto per procedure e per una efficienza standard del 60\%, corrispondente ad una energia standard del 60\%}$$

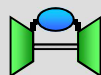
$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N_{60}$$

dove:

E_m = efficienza del martello percussore

0,60 = efficienza del martello SPT originale pari al 60%

Gibbs & Holtz (1957) aggiunsero successivamente il fattore C_N .



La prova SPT

Attrezzature ed efficienza

L'efficienza può essere ottenuta confrontando il lavoro sviluppato ($W = F \times d =$ forza per spostamento) o l'energia cinetica ($K_E = \frac{1}{2}mv^2$) data dalla caduta libera, con l'energia potenziale del sistema ($P_E = mgh$), dove $m =$ massa, $v =$ velocità di impatto, $g = 9,8 \text{ m/s}^2 = 32,2 \text{ piedi/s}^2 =$ costante gravitazionale e $h =$ altezza di caduta.

Quindi, il rapporto di energia (**Energy Ratio**) è definito come il rapporto:

$$\mathbf{ER = W/P_E}$$

Oppure:

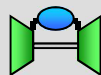
$$\mathbf{ER = K_E/P_e}$$

detto rapporto è chiamato anche efficienza di trasferimento energetico:

$\mathbf{ER_f =}$ energia di avanzamento impressa / energia di caduta libera.

In sintesi il valore ER è il **rendimento meccanico del sistema**
(30÷90%)

È importante notare che la prassi geotecnica e le conseguenti determinazioni di ingegneria geotecnica sono basati sulle correlazioni SPT sviluppate con una pratica standard, corrispondente a un **ER medio del 60%**.



La prova SPT

Attrezzature ed efficienza

In altre parole si può statuire che:

$$N_{60} = N_f (ER_f / 60) =$$

Dove:

N_{60} = valore di N_{SPT} corretto per il 60% della energia cinetica di caduta libera del maglio

N_f = valore di N_{SPT} ottenuto in campo

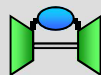
ER_f = rapporto di energia alle aste in funzione del martello utilizzato nell'indagine (valore misurato).

In alcuni test si riporta che in genere il trasferimento di energia dal **martello automatico** è il più alto di tutti i martelli.

In particolare si è rilevato che il martello automatico fornisce una gamma di energia trasferita efficienze dal 77,18% all'89,36% con una media dell'81,41%. Gli stessi test hanno rilevato per gli altri martelli:

Safety hammer \Rightarrow 51,5÷93, valore medio = 70,2 %

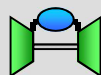
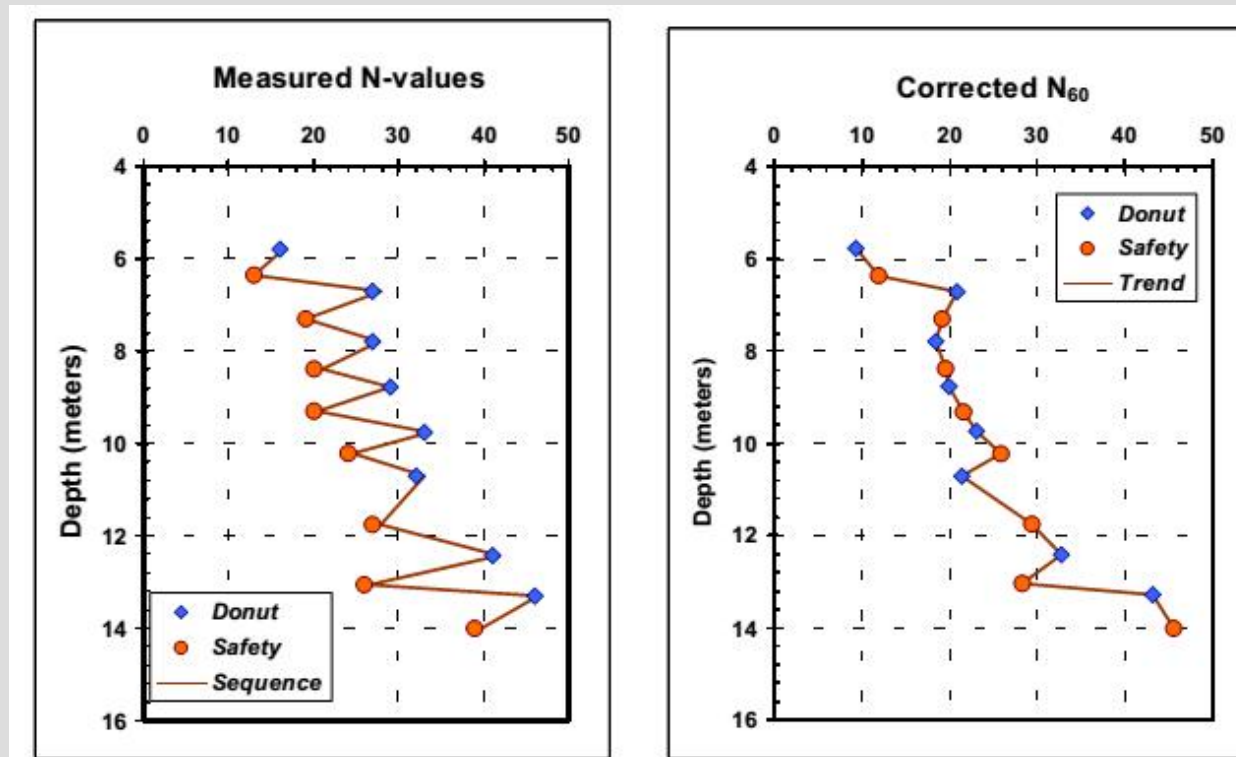
Donut hammer \Rightarrow 51÷73,6, valore medio = 63,5 %



La prova SPT

Attrezzature ed efficienza

La differente **efficienza dei sistemi** si può cogliere dalla figura successiva (da FHWA, 2002), dove si evince che il donut hammer necessita di valori N_{SPT} alla penetrazione maggiori rispetto al safety hammer a causa della sua minor efficienza.



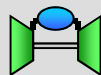
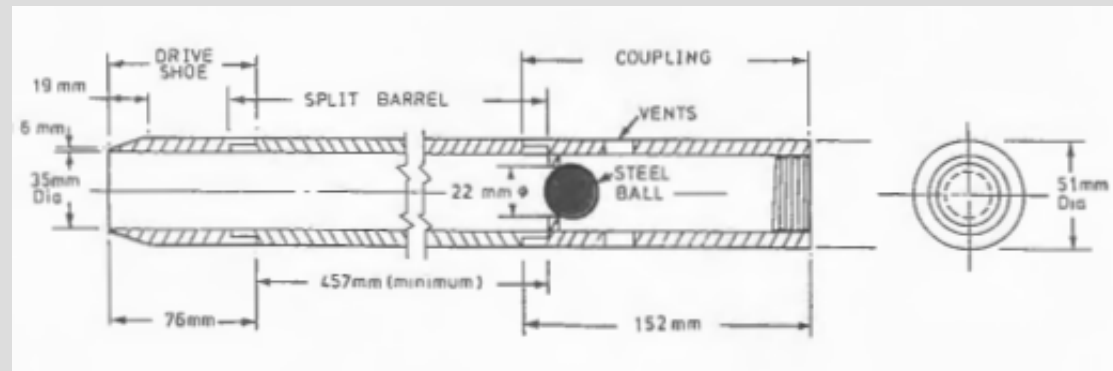
La prova SPT

Il campionatore standard

Il **campionatore standard** deve avere le seguenti caratteristiche essenziali (ISSMFE, 1898):

- 1) Il tubo del campionatore deve essere di acciaio temprato con superfici interna ed esterna lisce
- 2) Il diametro esterno deve essere $51 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
- 3) Il diametro interno deve essere di $35 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.
- 4) La lunghezza deve essere di 457 mm minimo.

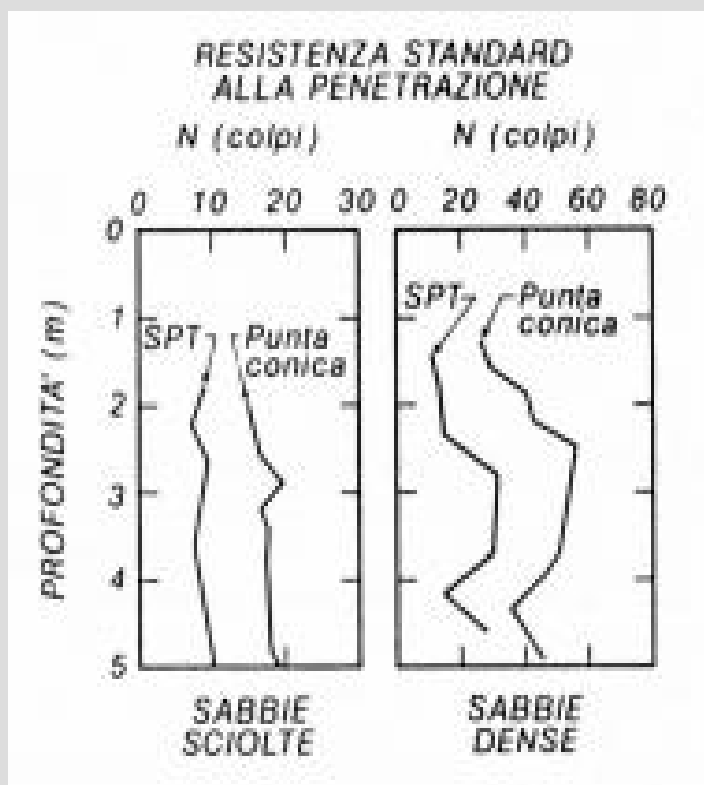
Un campionatore tipo è mostrato nella figura sottostante (ISSMFE, 1989).



La prova SPT

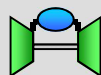
La punta conica

Nonostante non sia una procedura standardizzata, è molto diffuso anche l'utilizzo di una **punta conica** in luogo del campionatore standard aperto tipo Raymond.



L'uso della punta conica porta però a rendere inapplicabili le numerose correlazioni esistenti in letteratura a causa della sua differente resistenza alla penetrazione dovuta alla punta conica; in generale, non operando con il campionatore e dovendo avanzare nel terreno spostandolo e non campionandolo, presenta valori di N_{SPT} maggiori rispetto a quelli ottenuti dal campionatore standard, sovrastimando la resistenza all'avanzamento.

Si veda al proposito la figura a lato (da Cestari, 1990).



La prova SPT

La punta conica

Poche sono le correzioni per l'uso della **punta conica** rintracciabili in letteratura.

Per esempio Lacroix e Horn (1973) hanno proposto correlazioni per punte coniche con la resistenza alla penetrazione standard, N_{SPT} , sulla base delle differenze nell'energia di avanzamento e della misura di penetrazione.

Determinano quindi che l'energia necessaria per avanzare la punta conica di una certa misura o "profondità" (L) è direttamente proporzionale al quadrato del diametro esterno (D) del cono e alla lunghezza di penetrazione mentre è inversamente proporzionale all'energia per colpo.

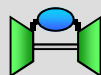
In estrema sintesi essi determinano che:

$$N_{SPT} = 0,44 \div 0,64 N_1$$

Dove:

N_1 = numero di colpi ricavato dalla prova non standard.

L'applicazione di tali correlazioni è sempre da considerare attentamente.



La prova SPT

Le classificazione dei terreni con l'SPT

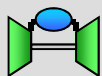
La prova SPT per lungo tempo e tutt'ora è utilizzata per una **classificazione preliminare** dei terreni indagati.

Correlazioni tra densità relativa, resistenza penetrometrica, peso di volume asciutto, a angolo di attrito di **terreni granulari** (da Duncan and Buchignani, 1976).

| Descriptive Relative Density | Relative Density ** | Standard Penetration Resistance N_1 (see Note) * | Static Cone Resistance q_c | Angle of Internal Friction ϕ | Dry Unit Weight |
|---------------------------------|-------------------------------|---|--|---|--------------------|
| | % | blows/foot | tsf or kgf/cm^2 | degrees | KN/m^3 |
| Very Loose | < 15 | < 4 | < 50 | < 30 | < 14 |
| Loose | 15 - 35 | 4 - 10 | 50 - 100 | 30 - 32 | 14 - 16 |
| Medium Dense | 35 - 65 | 10 - 30 | 100 - 150 | 32 - 35 | 16 - 18 |
| Dense | 65 - 85 | 30 - 50 | 150 - 200 | 35 - 38 | 18 - 20 |
| Very Dense | 85 - 100 | > 50 | > 200 | > 38 | > 20 |

* N_1 = valore corretto per la pressione litostatica di 100 kPa

** Depositi recenti, sabbie NC





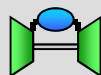
La prova SPT

Le classificazione dei terreni con l'SPT

La prova SPT per lungo tempo e tutt'ora è utilizzata per una **classificazione preliminare** dei terreni indagati.

Valori approssimativi della resistenza al taglio non drenata per terreni coesivi basato sui valori N_{SPT} (da Terzaghi e Peck, 1967).

| Soil Consistency | SPT N (See Note) | S_u (psf) |
|------------------|---------------------|-------------|
| Very Soft | < 2 | < 250 |
| Soft | 2 - 4 | 250 - 500 |
| Medium | 4 - 8 | 500 - 1000 |
| Stiff | 8 - 15 | 1000 - 2000 |
| Very Stiff | 15 - 30 | 2000 - 4000 |
| Hard | > 30 | > 4000 |





La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

La maggior parte delle correlazioni è ricavata direttamente dal valore N_{SPT} , nonostante come abbiamo visto esso non è sempre in grado di rappresentare adeguatamente la resistenza locale del terreno.

Terreni granulari (prevalentemente sabbiosi)

Il valore N_{SPT} rappresenta la forza o l'energia necessaria a provocare la rottura (dinamica) del terreno in cui avviene l'avanzamento, pertanto quella necessaria al campionatore per affondare nel terreno di prova nelle condizioni in cui esso si presenta.

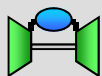
Ne consegue che la resistenza al taglio opposta dal terreno all'avanzamento, è una misura che si può stimare con il valore di resistenza N_{SPT} dedotto dalla prova.

La resistenza al taglio dei terreni (τ) dalla legge di Coulomb è ricavabile dalla nota (in condizioni drenate):

$$\tau = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

Dove, con nota conoscenza dei termini:

c' = coesione efficace





La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Il valore di resistenza penetrometrica ricavato dalle prove SPT presenta numerose correlazioni esistenti nella bibliografia nazionale e internazionale.

Alcune di esse hanno validità generale (quasi), altre sono particolarmente sito-specifiche.

La maggior parte delle correlazioni determina differenti caratteristiche in funzione della tipologia e natura dei terreni per i quali sono:

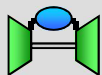
Terreni granulari

- a) Densità relativa
- b) Angolo di resistenza al taglio
- c) Modulo di deformabilità

Terreni coesivi

- a) Coesione non drenata
- b) Modulo edometrico

Vi sono poi anche molte altre correlazioni con altri parametri di interesse, quali per esempio i valori ricavabili con altre prove in sito (es.: permeabilità, resistenza alla liquafazione, prove SCPT, ecc.).



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con la D_R (da Cap. 12 – Indagini in sito, UniFI).

$$N_{SPT} = \left(17 + 24 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right) \cdot D_R^2 \quad (\text{Gibbs e Holtz, 1957}) \quad (\text{Eq. 12.2})$$

in cui p_a è la pressione atmosferica ($p_a=100$ se σ'_{v0} è espresso in kPa)

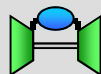
$$D_R = 1,5 \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{F} \right)^{0,222} - 0,6 \quad \text{con} \quad F = 0,65 \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)^2 + 16,8 \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right) + 14 \quad (\text{Eq. 12.3})$$

(Gibbs e Holtz, 1957)

$$D_R = 0,21 \cdot \sqrt{\frac{N_{SPT}}{\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} + 0,7}} \quad (\text{Meyerhof, 1957}) \quad (\text{Eq. 12.4})$$

$$N_{SPT} = 20 \cdot \left(1 + 4,1 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right) \cdot D_R^2 \quad \text{per} \quad \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \leq 0,732 \quad (\text{Eq. 12.5})$$

$$N_{SPT} = 20 \cdot \left(3,24 + 1,024 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right) \cdot D_R^2 \quad \text{per} \quad \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} > 0,732$$



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con la D_R (da Cap. 12 – Indagini in sito, UniFI).

(Bazaara, 1967), più adatta a sabbie sovraconsolidate o costipate in cantiere

$$D_R = \sqrt{\frac{C_N \cdot N_{SPT}}{60}} \quad \text{con} \quad \begin{cases} C_N = \frac{2}{1 + \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}} & \text{per sabbie fini} \\ C_N = \frac{3}{2 + \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}} & \text{per sabbie grosse} \end{cases} \quad (\text{Eq. 12.6})$$

(Skempton, 1986)

$$D_R = 0,22 \cdot N_{SPT}^{0,57} \cdot \left(100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right)^{-0,14} \quad \text{Sabbia fine}$$

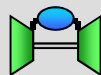
$$D_R = 0,18 \cdot N_{SPT}^{0,57} \cdot \left(100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right)^{-0,14} \quad \text{Sabbia 75\%, ghiaia 25\%}$$

$$D_R = 0,25 \cdot N_{SPT}^{0,44} \cdot \left(100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right)^{-0,13} \quad \text{Sabbia 50\%, ghiaia 50\%}$$

$$D_R = 0,25 \cdot N_{SPT}^{0,46} \cdot \left(100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right)^{-0,12} \quad \text{Tutti i terreni granulari}$$

(Eq. 12.7)

(Yoshida e Kokusho, 1988)



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con l'angolo φ' e il loro campo di applicazione:

Schmertmann, 1977

$$\varphi' = 28^\circ + 0,14 D_R \quad \text{sabbia fine uniforme}$$

$$\varphi' = 31,5^\circ + 0,115 D_R \quad \text{sabbia media uniforme e sabbia fine ben gradata}$$

$$\varphi' = 34,5^\circ + 0,10 D_R \quad \text{sabbia grossa uniforme e sabbia media ben gradata}$$

$$\varphi' = 38,5^\circ + 0,08 D_R \quad \text{ghiaia media e fine e sabbia e ghiaia poco limosa}$$

Per l'EC 7 si possono utilizzare, nel caso di sabbie silicee, le seguenti correlazioni:

| D_R (%) | Grana fine | | Grana media | | Grana grossa | |
|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | Uniforme | Ben gradata | Uniforme | Ben gradata | Uniforme | Ben gradata |
| 40 | 34 | 36 | 36 | 38 | 38 | 41 |
| 60 | 36 | 38 | 38 | 41 | 41 | 41 |
| 80 | 39 | 41 | 41 | 43 | 43 | 44 |
| 100 | 42 | 43 | 43 | 44 | 44 | 46 |



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con con l'angolo φ' (da Cap. 12 – Indagini in sito, UniFI).

Wolff, 1989

$$\varphi'(^{\circ}) = 27,1 + 0,3 \cdot C_N \cdot N_{SPT} - 0,00054 \cdot (C_N \cdot N_{SPT})^2$$

$$C_N = \frac{2}{1 + \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}}$$

per sabbie fini

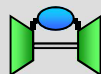
(Eq. 12.9)

$$C_N = \frac{3}{2 + \frac{\sigma'_{v0}}{P_a}}$$

per sabbie grosse

Kulhawhy & Mayne, 1980

$$\varphi' = \arctan \left[\frac{N_{SPT}}{12,2 + 20,3 \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)} \right]^{0,34} \quad (\text{Eq. 12.10})$$



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con con l'angolo ϕ' (da Cap. 12 – Indagini in sito, UniFI).

| Soil Type | ϕ (degrees) | Reference |
|--|--|-------------------------------|
| Angular and well-grained soil particles | $\phi = (12N)^{0.5} + 25$ (See Note) | Dunham (1954) (#1) |
| Round and well-grained or angular and uniform-grained soil particles | $\phi = (12N)^{0.5} + 20$ (See Note) | Dunham (1954) (#2) |
| Round and uniform-grained soil particles | $\phi = (12N)^{0.5} + 15$ (See Note) | Dunham (1954) (#3) |
| Sandy | $\phi = (20N)^{0.5} + 15$ (See Note) | Ohsaki et al. (1959) |
| Granular | $\phi = 20 + 3.5(N)^{0.5}$ (See Note) | Muromachi et al. (1974) |
| Sandy | $\phi = (15N)^{0.5} + 15 \leq 45$ (N > 5) (See Note) | Japan Road Association (1990) |
| Sandy | $\phi = (20N_1)^{0.5} + 20$ N ₁ = N-value normalized to 1 tsf of overburden pressure using the Liao and Whitman (1986) equation. It is the recommendation of this report to use N _{1,60} with this correlation. | Hatanaka and Uchida (1996) |

Correlazioni di N_{SPT} con l'angolo di attrito (da Hatanaka & Uchida (1996) e Broms & Flodin (1988)).

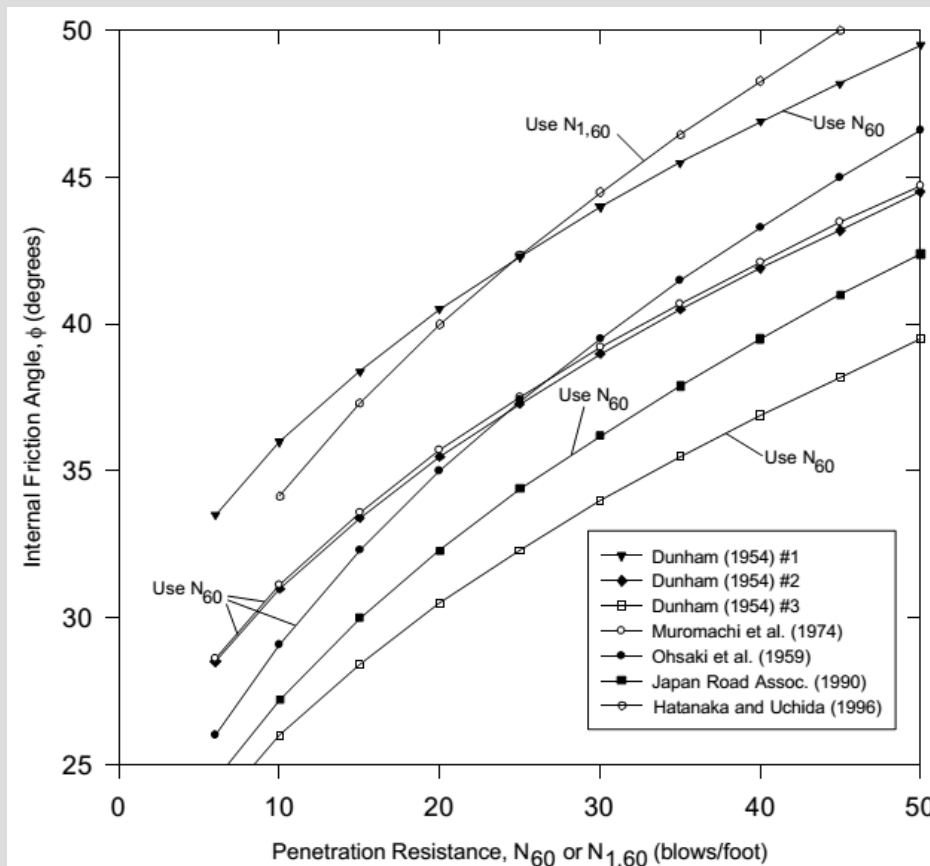
Nota: queste correlazioni utilizzavano il conteggio dei colpi SPT non corretto. Tuttavia, poiché i martelli con efficienza del 60% sono i più diffusi, e probabilmente i dati delle correlazioni sono stati ottenute principalmente da essi, sembra logico usare N₆₀ con queste correlazioni.



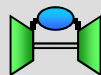
La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con con l'angolo ϕ' (da Cap. 12 – Indagini in sito, UniFI).



Correlazioni di N_{SPT} con l'angolo di attrito (da autori vari).





La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con il **modulo di deformabilità E** nei terreni granulari

Schultze & Mezembach, 1961

$$E \text{ [MPa]} = 0,517 N_{\text{SPT}} + 7,46 - \text{valida per sabbie}$$

D'Appolonia et Alii, 1970

$$E \text{ [MPa]} = 0,756 N_{\text{SPT}} + 18,75 - \text{valida per sabbie e ghiaie}$$

$$E \text{ [MPa]} = 1,043 N_{\text{SPT}} + 36,79 - \text{valida per sabbie}$$

Callanan & Kulhawhy, 1985

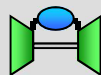
$$E/p_a = 5 N_{60} - \text{valida per sabbie con fine}$$

$$E/p_a = 10 N_{60} - \text{valida per sabbie pulite NC}$$

$$E/p_a = 15 N_{60} - \text{valida per sabbie pulite OC}$$

Dove:

$$p_a = \text{pressione atmosferica } 101,3 \text{ kPa}$$

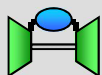


La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con il **modulo di deformabilità E** nei terreni granulari.
Equazioni per il modulo sforzo-deformazione [kPa] con il metodo SPT
(secondo Tan et al., 1991)

| Soil | Stress-Strain Modulus, E_s * (See Note) |
|----------------------------|--|
| Normally consolidated sand | $E_s = 500(N_{60} + 15)$ #1 $E_s = (15000 \text{ to } 22000) \ln N_{60}$ #2 |
| Over-consolidated sand | $E_s = 18000 + 750N_{60}$ $E_{s,OCR} = E_{s,NC} (OCR)^{0.5}$ |
| Gravelly sand and gravel | $E_s = 600(N_{60} + 6)$ $N_{60} \leq 15$ $E_s = 600(N_{60} + 6) + 2000$ $N_{60} > 15$ |
| Clayey sand | $E_s = 320(N_{60} + 15)$ |
| Silty sand | $E_s = 300(N_{60} + 6)$ |



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con la Coesione non Drenata c_u

In genere le correlazioni sono espresse tramite la nota relazione:

$$c_u = f N_{SPT}$$

Dove:

f = parametro di correlazione indipendente (Stroud, 1974, variabile da 3,1 a 7,6 kN/m² o kPa)

Hara et Alii, 1971

$$c_u \text{ [KPa]} = 29 N_{SPT}^{0,72}$$

Sowers

$$c_u \text{ [KPa]} = 11,8 N_{SPT} \text{ valida per argille a alta plasticità}$$

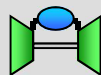
$$c_u \text{ [KPa]} = 7,1 N_{SPT} \text{ valida per argille a media plasticità}$$

$$c_u \text{ [KPa]} = 3,25 N_{SPT} \text{ valida per argille a bassa plasticità e limi plastici}$$

Shioi & Fukui, 1982

$$c_u \text{ [kg/cm}^2\text{]} = 0,025 N_{SPT} \text{ valida per argille a media plasticità}$$

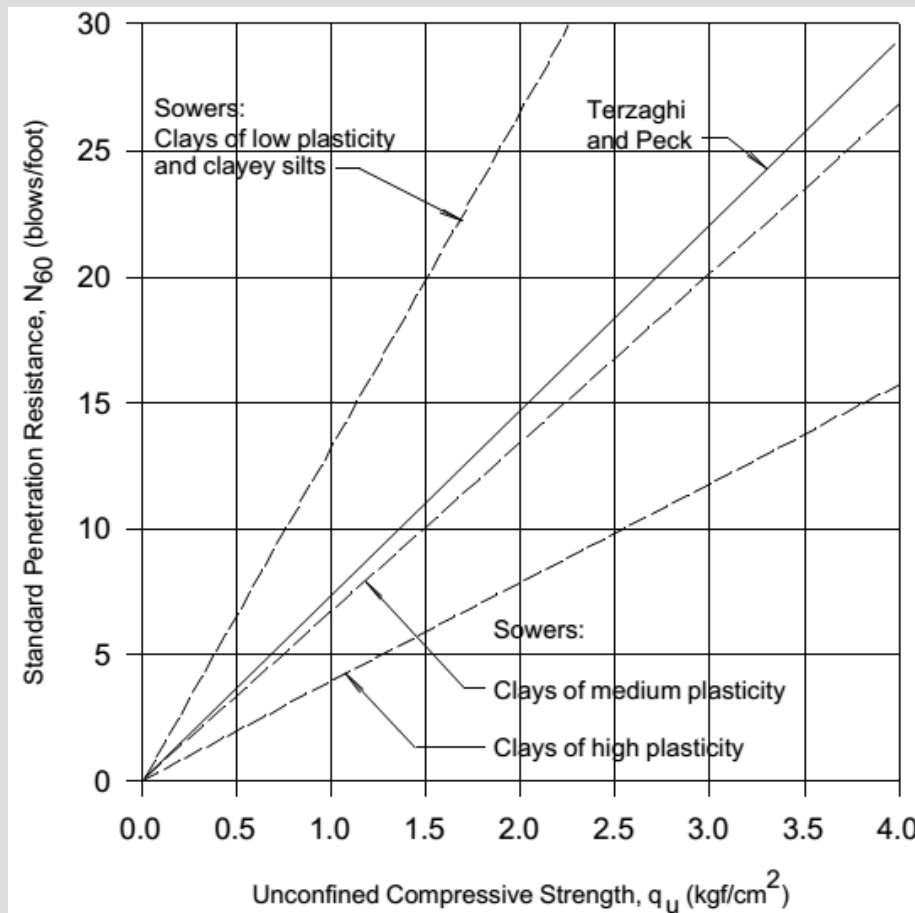
$$c_u \text{ [kg/cm}^2\text{]} = 0,050 N_{SPT} \text{ valida per argille a alta plasticità}$$



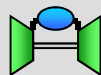
La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

Le correlazioni con il la resistenza a compressione non confinata q_u



Correlazioni di N_{SPT} con la resistenza a compressione monoassiale (da NAVFAC, 1982).





La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

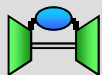
Le correlazioni con la potenzialità alla **liquefazione sismica**.

L'EC 8 indica che la valutazione della potenzialità di liquefazione sismica dei terreni richiede specifiche indagini tra cui devono essere comprese almeno l'esecuzione di test di penetrazione standard in prove in sito SPT o prove CPT, nonché la determinazione delle curve di distribuzione granulometrica in laboratorio.

Nel codice sono riportati **grafici classificativi** basati sul conteggio dei colpi SPT.

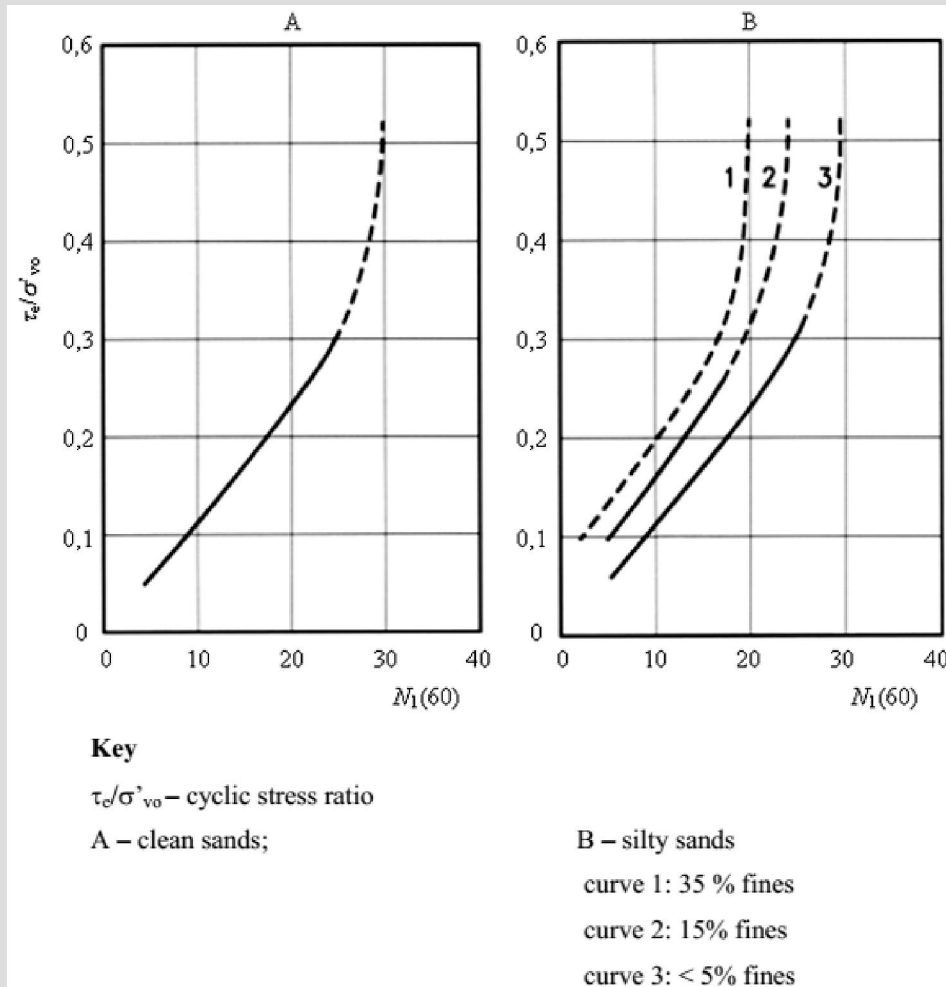
Tra i più utilizzati ci sono i grafici illustrato riportato nella slide successiva per sabbie pulite e sabbie limose. Il valore del numero di colpi SPT deve essere normalizzato per gli effetti della tensione litostatica e per rapporto energetico $N_{1(60)}$.

Il grafico esprime l'improbabilità che la liquefazione avvenga al di sotto di una certa soglia di τ_c , perché il terreno si comporta in modo elastico e non si verifica alcun accumulo di pressione interstiziale.



La prova SPT

Le correlazioni empiriche con i parametri

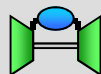


Relazione tra rapporti di stress che causano liquefazione e $N_1(60)$.

Valori per sabbie pulite e limose per terremoti $M_S=7,5$ (da EC 8).

Per applicare il presente criterio a magnitudo del terremoto diverse da $M_S = 7,5$, le ordinate delle curve di figura devono essere moltiplicate per un fattore CM indicato nella tabella sottostante.

| M_S | CM |
|-------|------|
| 5,5 | 2,86 |
| 6,0 | 2,20 |
| 6,5 | 1,69 |
| 7,0 | 1,30 |
| 8,0 | 0,67 |





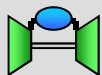
La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

La prova SPT può essere utilizzata per la determinazione delle caratteristiche di **capacità e deformabilità di fondazioni**.

L'**EC 7** osserva che:

- 1) *Quando si ha a che fare con le sabbie, è disponibile un'ampia esperienza empirica nell'uso di questo test, ad esempio per quanto riguarda la valutazione quantitativa dell'indice di densità, della resistenza portante e del cedimento delle fondazioni, anche se i risultati devono essere considerati solo come un'approssimazione approssimativa.*
- 2) *La maggior parte dei metodi esistenti si basa ancora su valori non corretti o parzialmente corretti.*
- 3) *Non esiste un accordo generale sull'uso dei risultati SPT in terreni argillosi. In linea di principio, esso dovrebbe essere limitato ad una valutazione qualitativa del profilo del suolo o ad una stima qualitativa di le proprietà di resistenza del suolo.*
- 4) *I risultati SPT possono talvolta essere utilizzati in modo quantitativo in terreni argillosi in condizioni locali ben note, quando direttamente correlati ad altri test appropriati.*





La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

In particolare, circa l'uso diretto della prova SPT per il calcolo delle fondazioni, L'EC 7 osserva che:

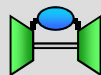
Fondazioni superficiali

I metodi di progettazione diretta si basano sul confronto dei valori N e sui risultati della prova di carico su piastra o su rilevazioni dei cedimenti misurati delle fondazioni.

La resistenza ammissibile per un cedimento massimo di 25 mm o il cedimento corrispondente ad una data pressione applicata può essere ottenuto attraverso le corrispondenti procedure con riferimento alla larghezza del plinto, il suo approfondimento rispetto al p.c. e la posizione della falda freatica.

Fondazioni profonde

Se la resistenza alla compressione o alla trazione ultima dei pali è derivata dai risultati SPT secondo l'EN 1997-1:2004, 7.6.2.3 o 7.6.3.3, devono essere utilizzate le correlazioni tra i risultati della prova di carico statico e i risultati SPT basate dalle regole stabilite localmente (vedi metodo NTC 2018, § 6.4.3.1.1 b).





La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

L'SPT per la stima della **capacità portante delle fondazioni superficiali.**

$$q_{ult} = \frac{\bar{N}B}{10} \left(C_{w1} + C_{w2} \frac{D_f}{B} \right) R_f$$

where

q_{ult} = ultimate bearing capacity in tsf

\bar{N} = the average blow count corrected for submergence in saturated very fine or silty sand as shown in Section 5. N is averaged over a depth $1.5B$ below the footing (Meyerhof, 1956). It is the recommendation of this report to use N_{60} with this correlation.

B = footing width (least dimension) in feet

D_f = embedment depth (depth from ground surface to base of footing) in feet

C_{w1} , C_{w2} = water table correction factors (D_w = distance from the ground surface to the water table)

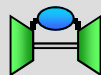
$C_{w1} = C_{w2} = 1.0$ for $D_w \geq D_f + 1.5B$

$C_{w1} = 0.5$ and $C_{w2} = 1.0$ for $D_w = D_f$

$C_{w1} = 0.5$ and $C_{w2} = 0.5$ for $D_w = 0$

R_f = load inclination factor from Table 31a or 31b

Values of C_{w1} and C_{w2} for other positions of the water table (between $D_w = 0$ and $D_w = D_f + 1.5B$) can be determined by interpolation (Tan et al., 1991).



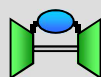
La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

Il valore N_{SPT} può essere utilizzato per stimare i cedimenti elastici (immediati) di fondazioni superficiali su terreni sabbiosi, sulla base di valori di modulo stimati da valori N_{SPT} e la teoria dei cedimenti elastici

Le correlazioni relative agli insediamenti direttamente ai valori N sono state suggerite da Bazaraa (1967), Duncan e Buchignani (1976), Parry (1977), Burland e Burbridge (1985) e Terzaghi et al. (1996) come mostrato nelle successive tabelle ($1 \text{ tsf} \approx 100 \text{ kPa}$).

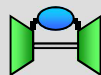
| Settlement Equation | Parameters | Notes | Reference |
|---|---|-------|----------------|
| $p = \rho \frac{\bar{N} [B + 1]^2}{3 [2B]}$ | <p>p = bearing pressure corresponding to a given magnitude of settlement (ρ) in tsf</p> <p>ρ = settlement in inches</p> <p>\bar{N} = average SPT blowcount (See Note)</p> <p>B = footing width in feet</p> | | Bazaraa (1967) |



La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

| | | | |
|----------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| $\rho_i = \frac{5p}{(N-1.5)C_B}$ | <p>ρ_i = maximum value of immediate settlement in inches</p> <p>p = bearing pressure in tsf</p> <p>N = minimum average SPT blowcount * (See Note)</p> <p>C_B = width correction factor (see Table 30)</p> | <p>* Average blowcounts for all borings over a depth B (B = footing width) below the base. Use the minimum of these values in the settlement equation. If the sand is saturated and silty with $N > 15$, correct the N-value as outlined in the correction section</p> | <p>Duncan and Buchignani (1976)</p> |
| $\rho = 300 \frac{qB}{N_m}$ | <p>ρ = settlement in mm</p> <p>q = bearing pressure in MN/m^2</p> <p>B = width of footing in m</p> <p>N_m = representative SPT N-value at a depth of $(3/4)B$ below foundation level (See Note)</p> | <p>Design value of settlement</p> | <p>Parry (1977)</p> |





La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

L'SPT per la stima della **capacità portante delle fondazioni profonde**.
Meyerhof (1976) resistenza di punta unitaria per pali in sabbia satura:

$$q_u = 0,4 N_1 D_b / B \leq q_{lim}$$

Dove:

q_u = carico limite dovuto alla punta [tsf \approx 100 kPa]

N_1 = originariamente pari a N_{SPT} ma raccomandato sia il valore $(N_1)_{60}$ alla base del palo

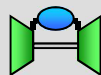
D_b = approfondimento del palo nello strato di base granulare

B = diametro del palo

q_{lim} = limite della resistenza di punta:

= 4 N_1 per sabbie

= 3 N_1 per limi non plastici





La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

L'SPT per la stima della **capacità portante delle fondazioni profonde**.
Meyerhof (1976) resistenza laterale unitaria per pali in sabbia satura:

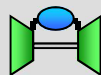
$$\mathbf{q_s} = N_1 / 50 \quad \text{per pali a spostamento di terreno}$$
$$\mathbf{q_s} = N_1 / 100 \quad \text{per pali senza spostamento di terreno}$$

Dove:

q_s = resistenza laterale [tsf \approx 100 kPa]

N_1 = originariamente pari a N_{SPT} ma raccomandato sia il valore $(N_1)_{60}$ medio lungo lo sviluppo laterale del palo negli strati granulari.

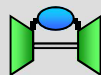
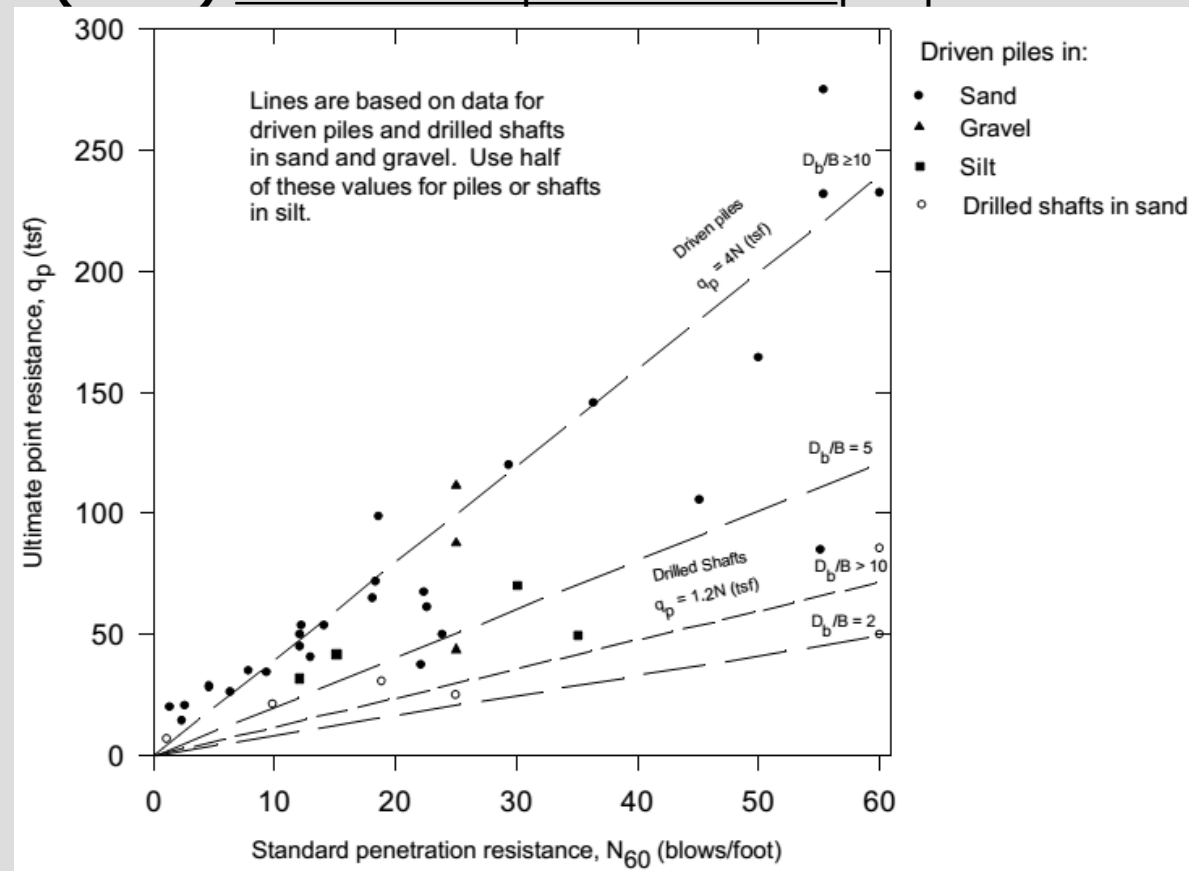
Le equazioni di Meyerhof presentate sopra si applicano a condizioni omogenee.



La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

L'SPT per la stima della **capacità portante delle fondazioni profonde**.
Meyerhof (1976) resistenza di punta unitaria per pali in sabbia satura:

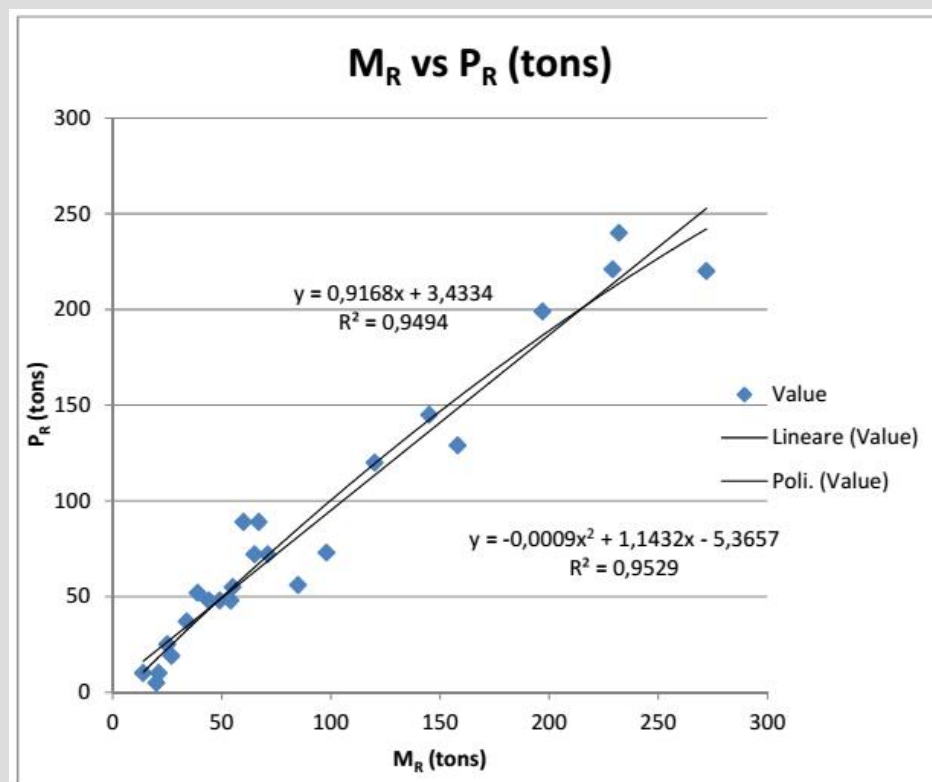


La prova SPT

l'uso della SPT per le previsioni geotecniche

L'SPT per la stima della **capacità portante delle fondazioni profonde**.
E' ottima la previsione nel caso di pali battuti.

Come si nota dal grafico a lato (da dati estratti da: FHWA Manual-Load and Resistance Factor Design for Highway Bridge Substructures, 2001), essendo la meccanica dell'infissione del campionatore SPT molto simile a quella di infissione dei pali battuti, la correlazione tra dati di portanza previsti (P_R) e quelli misurati (M_R) è molto fedele.



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

Il **software** è realizzato con strumenti Microsoft® o similari open source, pertanto gira su piattaforma Windows®; esso è stato realizzato per la versione Windows® 8.1 (vers. 2013), per la quale è stato testato.

- L'esecuzione del programma non richiede alcuna installazione, ma solo il lancio per mezzo di doppio click sul file .exe.
- Le elaborazioni del software sono basate, laddove presenti, sulle normative internazionali di comprovata validità, oltre che sulla bibliografia specialistica specifica disponibile sul web.
- In particolare si fa riferimento alle principali prassi in uso.

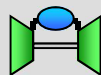


La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

Il software permette le seguenti operazioni (vedi schermate grafiche):

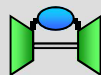
- 1) INPUT DEI DATI GENERALI DELLA PROVA (committente, lavoro, data, località, n° sondaggio e n° prova)
- 2) INPUT DELLA PROFONDITÀ DELLA PROVA E DELLA PROFONDITÀ DELLA FALDA
- 3) INPUT DEI VALORI DI DENSITÀ DI VOLUME DEL TERRENO ALLA PROFONDITÀ DI PROVA
- 4) DESCRIZIONE DELLA LITOLOGIA ALLA PROFONDITA' DELLA PROVA
- 5) SCELTA GUIDATA DELLA LITOLOGIA COME DA CLASSIFICAZIONE AGI
- 6) IN AUTOMATICO CI VERRA' FORNITA, SULLA BASE DELLA LITOLOGIA, UNA VALUTAZIONE, CON RELATIVE INFO, DI:
 - DELL'AFFIDABILITA' DELLA PROVA
 - DEL TIPO DI COMPORTAMENTO GEOTECNICO
- 7) SCELTA GUIDATA DELLE CARATTERISTICHE ESECUTIVE DELLA PROVA (tipo di percussione, tipo di utensile, diametro del foro, lunghezza della fune di sgancio)



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

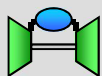
- 8) IL SOFTWARE CALCOLERA' IN AUTOMATICO I VALORI DI CORREZIONE COMPETENTI ALLE CARATTERISTICHE ESECUTIVE SCELTE
- 9) INPUT DEI VALORI DI PROVA, RICORDANDO CHE IL PRIMO VERRA' SCARTATO
- 10)GRAFICIZZAZIONE A BARRE DEI VALORI RILEVATI
- 11)VERIFICA DELL'AFFIDABILITA' DELLA PROVA E/O PROSECUZIONE SENZA VERIFICA
- 12)CALCOLO DELLA TENSIONE EFFETTIVA (caso granulari sotto falda) E DEI VALORI NORMALIZZATI DELLA PROVA
- 13)SCELTA GUIDATA DELLA CORRELAZIONE IDONEA
- 14)ELABORAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DELLO STATO DI ADDENSAMENTO O COMPATTEZZA E DELLA RESISTENZA CALCOLATA SULLA BASE DEL DATO RILEVATO (sulla base delle principali correlazioni internazionali, generalmente sulla base del dato grezzo rilevato)



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

- 15) ACQUISIZIONE DEI PRINCIPALI PARAMETRI CALCOLATI IN TABELLA
- 16) RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI VALORI NORMALIZZATI N1-60 IN FUNZIONE DELLA PROFONDITA' CON RAPPRESENTAZIONE DEL LIVELLO DI FALDA
- 17) SALVATAGGIO DEI DATI DEL SINGOLO LAVORO
- 18) CARICAMENTO DEI DATI DI UN LAVORO SALVATO
- 19) RAPPRESENTAZIONE DEI VALORI DI SETTAGGIO CORRENTI
- 20) RAPPRESENTAZIONE DELLA METODOLOGIA DI PROVA E DEI PRINCIPALI LIMITI DELLA STESSA.



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

Le **correlazioni** in uso nel software.

Considerato l'elevato numero delle correlazioni empiriche presenti nella bibliografia specialistica e nelle norme internazionali, sono state implementate quelle ritenute maggiormente affidabili anche osservando i seguenti criteri:

- **terreni granulari:** correlazioni dirette da NSPT valide in genere per tutte le tipologie di terreno; in questo caso il programma permette di calcolare anche il valore medio delle correlazioni proposte;
- **terreni coesivi:** correlazioni dirette da NSPT valide in genere per le principali tipologie di terreno distinte sulla base della loro plasticità.

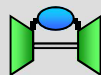


La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

Utilizzo dei dati elaborati e stampa dei risultati.

- La **stampa** dei risultati avviene semplicemente catturando graficamente il form con l'insieme dei comandi Ctrl+Alt+Stamp per poi copiarlo in altra sede, oppure con un qualsiasi comando di screenshot di Windows®.
- La **tabella** può essere copiata integralmente o in parte selezionandone il settore di interesse e copiandone la selezione (Ctrl+C) incollandola (Ctrl+V) su un elaboratore di testi e/o un foglio elettronico; le modalità di selezione integrale o parziale sono di immediata comprensione.
- La **tabella** può essere modificata nell'ordine di apparizione delle colonne, così come selezionando la singola colonna può essere disposto in ordine progressivo il contenuto delle singole righe; si consiglia di inserire le singole prove con numero progressivo crescente con la profondità così da effettuare correttamente il sorting con la colonna della numerazione.



La prova SPT

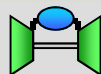
Il programma Prova SPT v.1.0

Schermata principale

The screenshot displays the main interface of the 'Prova SPT v.1.0' software. The window title is 'by Froidi 2021 SPT-v.1.0'. The file path is 'C:\Users\BEPPE\Desktop\prova SPT granulare multipla.bt'. The interface is divided into several sections:

- Input Fields:** Committente: Laboratorio di Geingegneria; Lavoro: Software Prova SPT; Data: domenica 16 gennaio 2022; Località: Parma; Sondaggio: S1; Prova numero: 7; Profondità inizio prova [m]: 21; Peso di volume naturale [kN/mc]: 18; Profondità fine prova [m]: 21,45; Peso di volume saturo [kN/mc]: 19; Soggiacenza falda [m]: 10; Sfondo: Standard; Descrizione litologica: Limo con; Descrizione litologica AGI: limo; Affidabilità: buona; Tipo di comportamento geotecnico: coesivo, tipico dei terreni con drenaggio impedito; Metodologia SPT: med; Tipo di percussione: AUTOMATIC HAMMER; Tipo di utensile: Standard; Diametro del foro [mm]: da 65 a 115 mm; Lunghezza fune di sgancio [m]: da 3 a 4 m; N_p: 1,15; N_u: 1; N_d: 1; N_l: 0,75; Numero di colpi N1 (scarto): 10; Numero di colpi N2: 11; Numero di colpi N3: 12; Valore N-SPT: 23; Valore N-60 norm. proc. esecutive: 19,8; Tensione effettiva [kN/mq]: 191,025; N_t: 0,72; Valore (N1)-60: 19,8; Metodo: Terzaghi & Peck, argille CM, 1967; Coesione non drenata-CU [kN/mq]: 143,8.
- Data Table:** A table with 7 rows and 6 columns: Prova, Prof. [m], (N1)60, P_h ['], CU [kN/mq], Comportamento. The data is as follows:

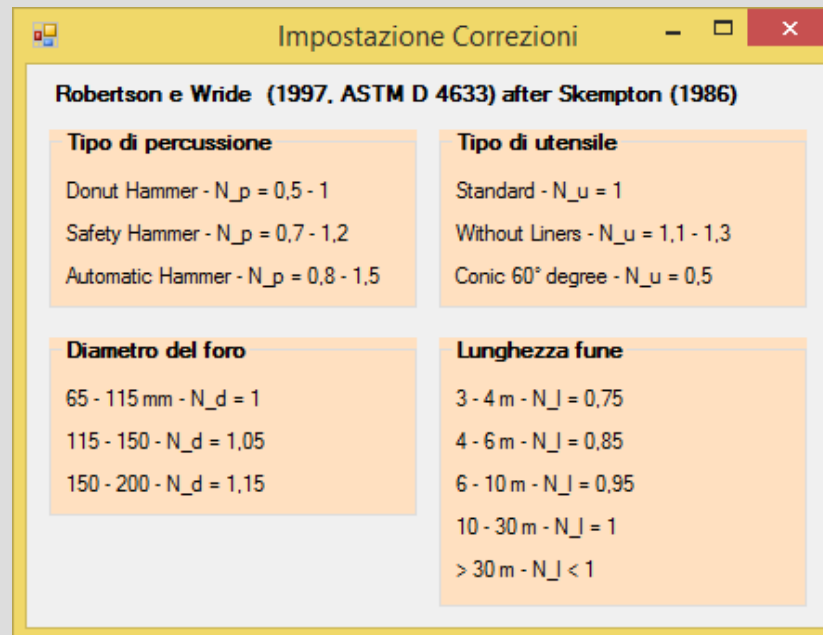
| Prova | Prof. [m] | (N1)60 | P _h ['] | CU [kN/mq] | Comportamento |
|-------|-----------|--------|--------------------|------------|---------------|
| 1 | 3,225 | 3,2 | 0 | | granulare |
| 2 | 6,225 | 15 | 30,9 | | granulare |
| 3 | 9,225 | 14,2 | 31,5 | | granulare |
| 4 | 12,225 | 12,3 | 31,4 | | granulare |
| 5 | 15,225 | 16,4 | | 47,5 | coesivo |
| 6 | 18,225 | 24,1 | | 70 | coesivo |
| 7 | 21,225 | 19,8 | | 57,5 | coesivo |
- Graph:** A scatter plot titled 'Valori di (N1)60' showing the relationship between depth (Prof.) and (N1)60 values. The x-axis ranges from 0 to 100, and the y-axis ranges from 0 to 25. Data points are plotted for each trial, showing a general increase in (N1)60 with depth.
- Buttons:** 'ACQUISISCI PROVA' and 'DISEGNA GRAFICO' are located at the bottom right.



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

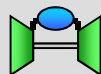
Schermata di impostazione delle correzioni per metodologia



Robertson e Wride (1997, ASTM D 4633) after Skempton (1986)

| Tipo di percussione | Tipo di utensile |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| Donut Hammer - $N_p = 0,5 - 1$ | Standard - $N_u = 1$ |
| Safety Hammer - $N_p = 0,7 - 1,2$ | Without Liners - $N_u = 1,1 - 1,3$ |
| Automatic Hammer - $N_p = 0,8 - 1,5$ | Conic 60° degree - $N_u = 0,5$ |

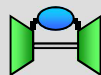
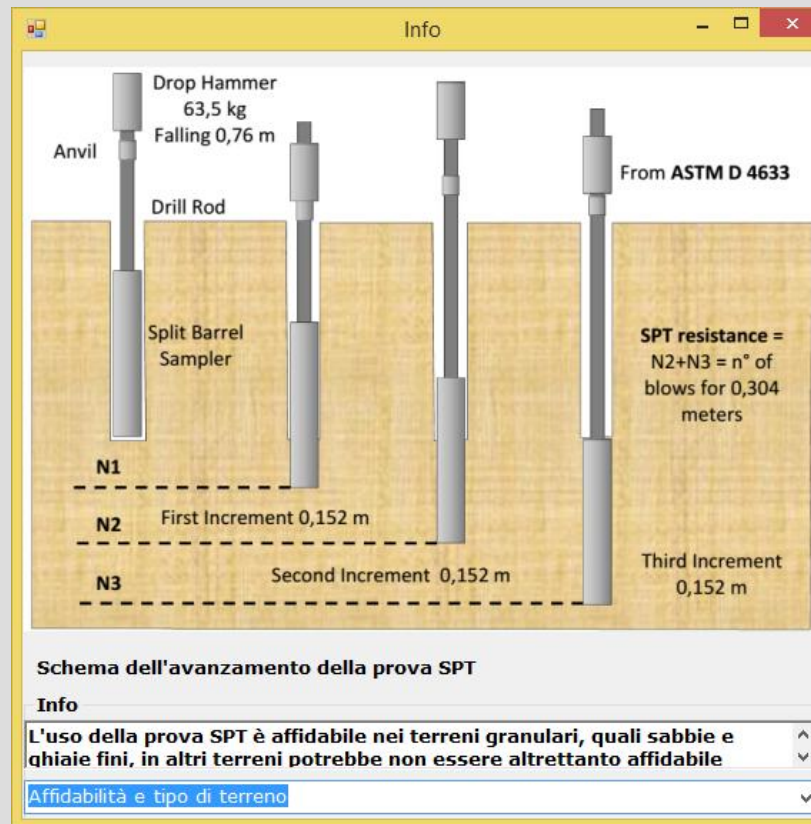
| Diametro del foro | Lunghezza fune |
|--------------------------|-------------------------|
| 65 - 115 mm - $N_d = 1$ | 3 - 4 m - $N_l = 0,75$ |
| 115 - 150 - $N_d = 1,05$ | 4 - 6 m - $N_l = 0,85$ |
| 150 - 200 - $N_d = 1,15$ | 6 - 10 m - $N_l = 0,95$ |
| | 10 - 30 m - $N_l = 1$ |
| | > 30 m - $N_l < 1$ |



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

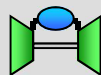
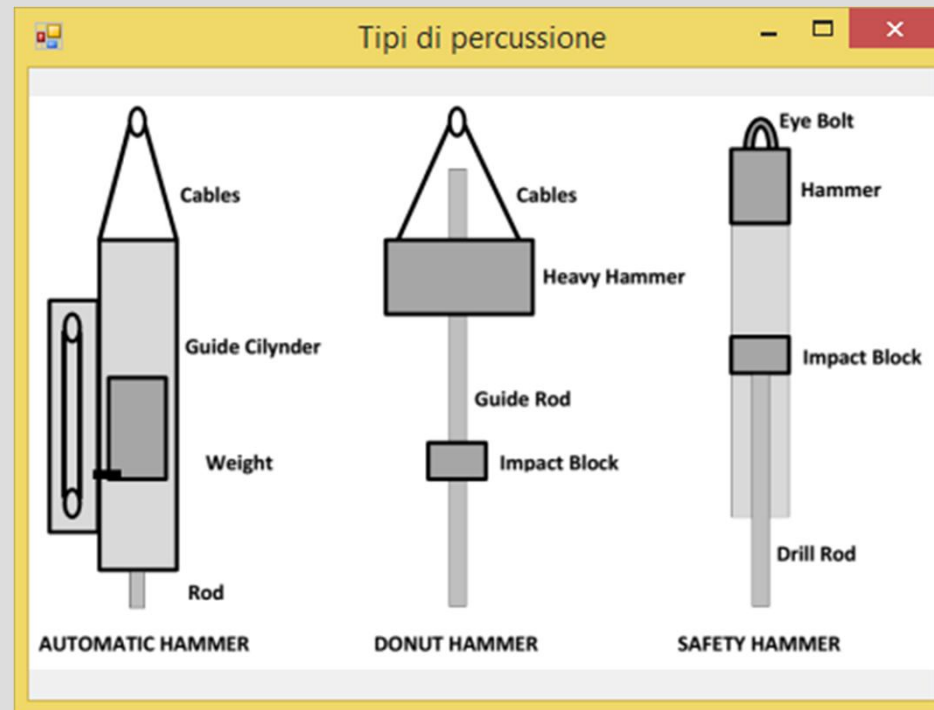
Schermata di informazioni e delle limitazioni della prova



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

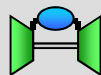
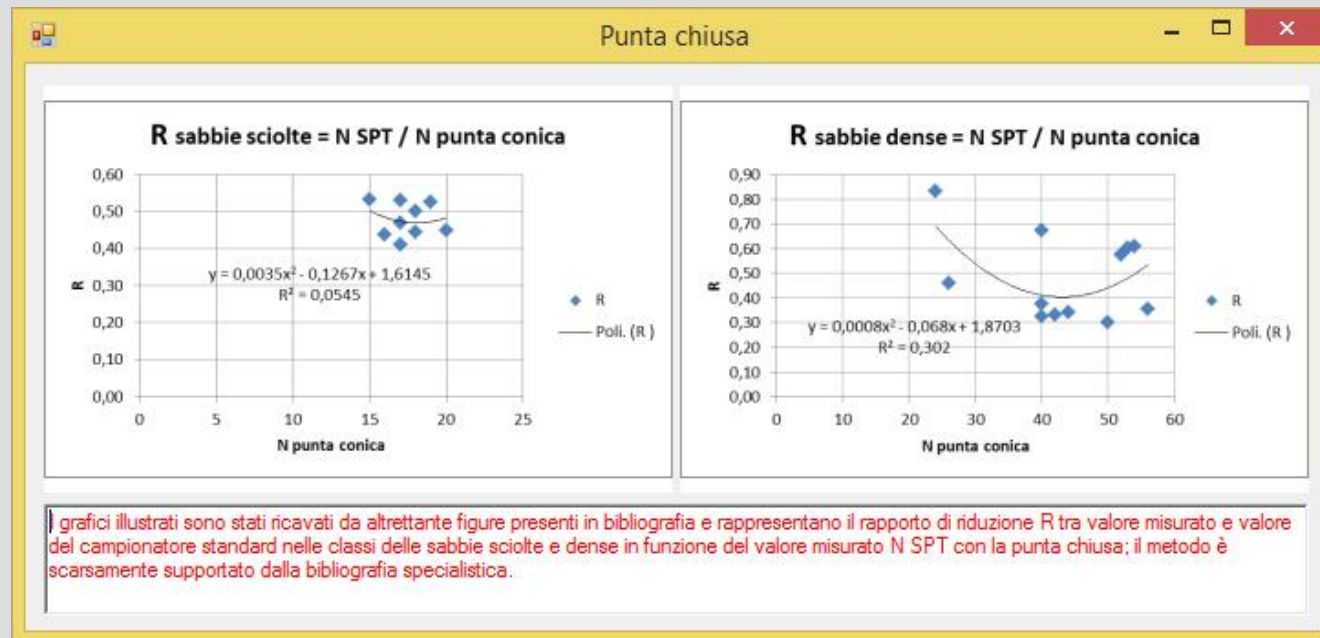
Schermata illustrativa del tipo di percussione



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

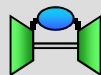
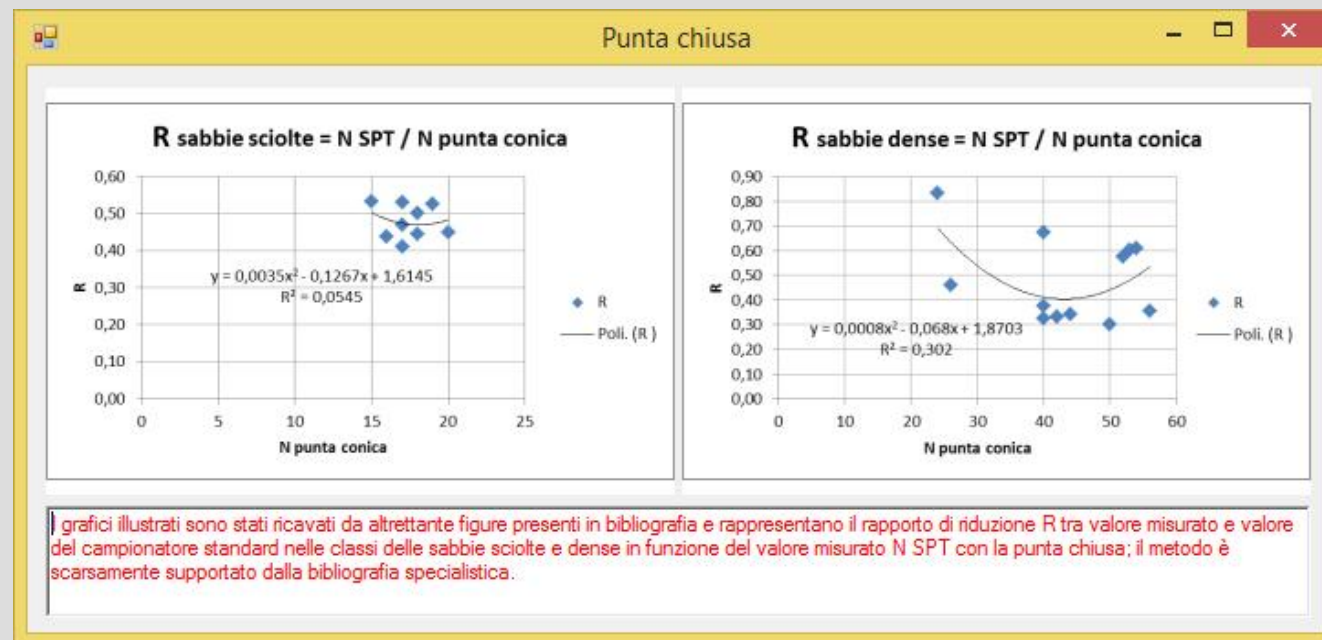
Schermata dei grafici di correlazione per punta conica chiusa



La prova SPT

Il programma Prova SPT v.1.0

Schermata dei grafici di correlazione per punta conica chiusa





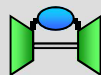
Le NTC 2018: Le INDAGINI GEOTECNICHE

Il Cap. 6 - Progettazione geotecnica delle NTC 2018, stabilisce che, nell'ambito del progetto, debbano essere sviluppate e redatte le seguenti relazioni:

- 1) RELAZIONE GEOLOGICA
- 2) **RELAZIONE GEOTECNICA**

La prima è stato stabilito essere di competenza esclusiva del Geologo (vedi giurisprudenza).

La seconda deve contenere *"Le scelte progettuali, **il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica**, di cui al 6.2.2, unitamente ai calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive,.."*; essa è di competenza "concorrente" ovvero può essere sviluppata sia dall'Ingegnere che da Geologo (vedi sentenza TAR Lazio 5231/2009), specificatamente per i progetti sottoposti alle NTC 2008 (cfr. CDS, IV, n° 491/2002; IV, n° 705/1998; V, n° 701/1995; Ad. Gen. N° 154/1994; n° 164/1992).



FINE DELLA PRESENTAZIONE

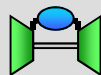
Per info sui programmi di calcolo utilizzati nel presente corso chiedere direttamente all'autore attraverso i seguenti riferimenti:

Dott. Ing. Geol. Piergiuseppe Froidi
Ingénieur Géotechnique CNAM - Paris
Via Emilia Est, 202
43123 - Parma (PR)

Tel. 0521-483979 - Cell. 329-2171997

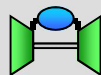
e-mail: piergiuseppefroidi@libero.it

<https://piergiuseppefroidi.wixsite.com/geoingegneria>



BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE - Norme

- [1] UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 (2005) – Progettazione geotecnica – Parte 1 : Regole generali. Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1997-1.
- [2] UNI EN 1997-2:2007 Eurocodice 7 (2007) – Progettazione geotecnica – Parte 2 : Indagini e prove nel sottosuolo. Versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1997-2.
- [3] Decreto 17 Gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Roma.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Circolare 21 Gennaio 2019, n. 7 (2019) - Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 Gennaio 2018. Roma.



BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE – Libri e paper

- [5] EPRI (1990) – Manual on estimating soil properties for foundation design.
- [6] Virginia Polytechnic Institute and State University (1998) – Performance and Use of the Standard Penetration Test in Geotechnical Engineering Practice.
- [7] U.S. Army Corps of Engineers (2001) - Geotechnical Investigations.
- [8] Maryland Department of Transportation State Highway Administration (2001) - RESEARCH REPORT STANDARD PENETRATION TEST (SPT) CORRECTION.
- [9] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2002) - Subsurface Investigations — Geotechnical Site Characterization, Reference Manual.
- [10] Rogers, J., D. [2006] - Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test. Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XII, No. 2, May 2006, pp. 161–179.
- [11] Progettazione delle opere geotecniche secondo le NTC 2018 e gli Eurocodici (2020) – Maggioli Editore. Santarcangelo di Romagna (RN).

