



STUDIO TECNICO
PETRACCI
&PARTNERS
INGEGNERIA ARCHITETTURA

Comune di Fermo

Provincia di Fermo

Progetto:

**COMPLETAMENTO SCUOLA E STRUTTURA
MULTIFUNZIONALE SALVANO
- PROGETTO ESECUTIVO -**

Richiedente: Comune di Fermo
via Mazzini n.4 - 63900 Fermo (FM)

Cantiere: C.da Salvano, via San Giacomo della Marca - 63900 Fermo (FM)

Elaborato:

ES.8

Oggetto:

ESECUTIVI STRUTTURALI
Relazione Geotecnica e sulle Fondazioni

Scala:

-

Il Progettista dell'esecutivo

Ing. Valerio Finucci _____

Il R.U.P.

Ing. Mauro Fortuna

Il Dirigente Servizio LL.PP.

Dott. Alessandro Paccapelo

Data Marzo 2017

Revisione

Aggiornamento

Protocollo

STUDIO TECNICO
PETRACCI
&PARTNERS

Via Bellesi n. 66 - 63900 Fermo (FM)
Tel. 0734 281470 - Mail: info@petracci.it
WWW.PETRACCI.IT

RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI

1 - DESCRIZIONE GENERALE DELL'OPERA

Il presente calcolo strutturale si riferisce alla sola porzione in ampliamento della Scuola Materna ed Elementare Salvano, sita a Fermo (FM) in località Salvano, Via S. Giacomo della Marca.

La presente relazione geotecnica riguarda le indagini, la caratterizzazione e modellazione geotecnica del "volume significativo" per l'opera in esame e valuta l'interazione opera/terreno ai fini del dimensionamento delle relative fondazioni. Questa relazione è stata redatta sulla base dei dati risultanti dalle prove di campagna e/o di laboratorio.

2 - NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative, per quanto applicabili in relazione al criterio di calcolo adottato dal progettista, evidenziato nel prosieguo della presente relazione:

- **Legge 5 novembre 1971 n. 1086** (G. U. 21 dicembre 1971 n. 321) "*Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica*".
- **Legge 2 febbraio 1974 n. 64** (G. U. 21 marzo 1974 n. 76) "*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*". Indicazioni progettive per le nuove costruzioni in zone sismiche a cura del Ministero per la Ricerca scientifica - Roma 1981.
- **D. M. Infrastrutture Trasporti 14 gennaio 2008** (G.U. 4 febbraio 2008 n. 29 - Suppl. Ord.) "*Norme tecniche per le Costruzioni*".

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, ad integrazione della norma precedente e per quanto con esse non in contrasto, sono state utilizzate le indicazioni contenute nella:

- **Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti** (G.U. 26 febbraio 2009 n. 27 – Suppl. Ord.) "*Istruzioni per l'applicazione delle 'Norme Tecniche delle Costruzioni' di cui al D.M. 14 gennaio 2008*".
- **Eurocodice 7 - "Progettazione geotecnica"** - ENV 1997-1 per quanto non in contrasto con le disposizioni del D.M. 2008 "*Norme Tecniche per le Costruzioni*".

3 - INDAGINI E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Sulla base di quanto dettagliato nella relazione geologica dell'area di sito, si è proceduto alla progettazione della campagna di indagini geognostiche finalizzate alla determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati dal "volume significativo" dell'opera in esame.

3.1 Area di sedime

L'area in oggetto ricade in Via San Giacomo della Marca, in località Salvano, in un contesto urbanizzato posto a circa 14-18 m s.l.m. in corrispondenza di una struttura di versante urbanizzata ed acclive, sulla sinistra idrografica rispetto al fiume Ete Vivo.

L'area non risulta ricompresa nella perimetrazione PAI, e dal punto di vista geolitologico è caratterizzata da depositi eluvio-colluviali che ricoprono, a varie altezze stratigrafiche, il basamento pelitico.

Le indagini dirette (prova penetrometrica CPT e tomografia digitale sismica passiva HVRS a stazione singola), eseguite nel marzo 2012, unitamente a numerosi dati reperiti (da sondaggi meccanici redatti precedentemente) hanno permesso quindi di ricostruire il profilo stratigrafico dell'area oggetto di intervento, meglio descritto in seguito e così sintetizzabile: coltre di copertura a gradazione fine (**limi argillosi-sabbiosi**) con intervalli locali di substrato marino alternato a livelli sabbiosi, talora centimetrici; substrato pelitico fratturato al tetto, e sempre

LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI

più pulito e compatto man mano che si aumenta la profondità di indagine, fino allo strato di basamento integro in **argille grigie** (10 - 12 m dal p.c.).

3.2 Prove effettuate e Caratterizzazione geotecnica

Al fine della determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni coinvolti nel "*volume significativo*" dell'opera in esame, sono state condotte delle prove geotecniche, riassunte nella relazione geologica.

Le indagini realizzate hanno permesso di ricostruire le seguenti stratigrafie per ognuna delle quali sono state definite le proprietà geotecniche dei singoli terreni coinvolti.

TERRENI

| N _{TRN} | γ _T | K | | | φ | c _u | c' | E _d | E _{cu} | A _{S-B} |
|--|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| | | K _X | K _Y | K _Z | | | | | | |
| | [N/m ³] | [N/cm ³] | [N/cm ³] | [N/cm ³] | [°] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | |
| Limi argillosi - sabbiosi | | | | | | | | | | |
| T001 | 19 500 | 4 | 4 | 1 | 21 | 0,060 | 0,007 | 4 | 1 | 0,000 |
| Argille fratturate alternate a strati sabbiosi | | | | | | | | | | |
| T002 | 19 500 | 10 | 10 | 1 | 22 | 0,140 | 0,010 | 7 | 1 | 0,000 |
| Argille stratificate integre | | | | | | | | | | |
| T003 | 20 000 | 22 | 22 | 33 | 24 | 0,250 | 0,025 | 10 | 1 | 0,000 |

LEGENDA:

| | |
|------------------|---|
| N _{TRN} | Numero identificativo del terreno. |
| γ _T | Peso specifico del terreno. |
| K | Valori della costante di sottofondo del terreno nelle direzioni degli assi del riferimento globale X (K _x), Y (K _y), e Z (K _z). |
| φ | Angolo di attrito del terreno. |
| c _u | Coesione non drenata. |
| c' | Coesione efficace. |
| E _d | Modulo edometrico. |
| E _{cu} | Modulo elastico in condizione non drenate. |
| A _{S-B} | Parametro "A" di Skempton-Bjerrum per pressioni interstiziali. |

STRATIGRAFIE

| N _{TRN} | Q _i | Q _f | Cmp. S. | Add | ΔEd |
|--|----------------|----------------|----------|---------|-------|
| | [m] | [m] | | | |
| [S002]-Stratigrafia Ampliamento Salvano (CPT1) | | | | | |
| T001 | 0,00 | -1,80 | coerente | sciolto | nulla |
| T002 | -1,80 | -10,00 | coerente | denso | nulla |
| T003 | -10,00 | INF | coerente | denso | nulla |

LEGENDA:

| | |
|------------------|---|
| N _{TRN} | Numero identificativo della stratigrafia. |
| Q _i | Quota iniziale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia). |
| Q _f | Quota finale dello strato (riferito alla quota iniziale della stratigrafia). INF = infinito (profondità dello strato finale). |
| Cmp. S. | Comportamento dello strato. |
| Add | Addensamento dello strato. |
| ΔEd | Variazione con la profondità del modulo edometrico. |

NB: Nel caso di fondazioni dirette con stratigrafia, il calcolo del carico limite (q_{lim}) viene fatto su un terreno "*equivalente*" con parametri geotecnici calcolati come media pesata degli strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità "*significativa*" (stabilita come "*Multiplo della dimensione Significativa della fondazione*").

$$\text{Parametro "J"} = \frac{\sum_{i=1}^n [\text{Parametro "J" (strato, i)} \cdot \text{Spessore (strato, i)}]}{\text{Profondità significativa}}$$

con i = 1, ..., n (numero di strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità significativa).

3.3 Idrogeologia

Non è stata riscontrata la presenza di falde acquifere a profondità di interesse relativamente al "*volume significativo*" investigato.

3.4 Problematiche riscontrate

Durante l'esecuzione delle prove e dall'elaborazione dei dati non sono emerse problematiche rilevanti alla realizzazione delle opere di fondazione.

4 - MODELLAZIONE GEOTECNICA E PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO

Le indagini effettuate, permettono di classificare il profilo stratigrafico, ai fini della determinazione dell'azione sismica, di categoria:

C [C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti], basandosi sulla valutazione della velocità delle onde di taglio (V_{s30}) e/o del numero di colpi dello Standard Penetration Test (N_{SPT}) e/o della resistenza non drenata equivalente ($c_{u,30}$).

Tutti i parametri che caratterizzano i terreni di fondazione sono riportati nei successivi paragrafi.

4.1 Modellazione geotecnica

Ai fini del calcolo strutturale, il terreno sottostante l'opera viene modellato secondo lo schema di Winkler, cioè un sistema costituito da un letto di molle elastiche mutuamente indipendenti. Ciò consente di ricavare le rigidezze offerte dai manufatti di fondazione, siano queste profonde o superficiali, che sono state introdotte direttamente nel modello strutturale per tener conto dell'interazione opera/terreno.

4.2 Pericolosità sismica

Ai fini della pericolosità sismica sono stati analizzati i dati relativi alla sismicità dell'area di interesse e ad eventuali effetti di amplificazione stratigrafica e topografica. Si sono tenute in considerazione anche la classe dell'edificio e la vita nominale.

Per tale caratterizzazione si riportano di seguito i dati di pericolosità come da normativa:

DATI GENERALI ANALISI SISMICA

| Ang | NV | CD | MP | Dir | TS | EcA | Ir _{Tmp} | C.S.T. | RP | RH | ξ |
|-----|----|----|----|--------|--------------------|-----|-------------------|--------|----|----|---|
| [°] | | | | | | | | | | | |
| 0 | 15 | B | ca | X Y | [T + C] [T + C] | S | N | C | SI | NO | 5 |

LEGENDA:

- Ang** Direzione di una componente dell'azione sismica rispetto all'asse X (sistema di riferimento globale); la seconda componente dell'azione sismica è assunta con direzione ruotata di 90 gradi rispetto alla prima.
- NV** Nel caso di analisi dinamica, indica il numero di modi di vibrazione considerati.
- CD** Classe di duttilità: [A] = Alta - [B] = Bassa - [ND] = Non Dissipativa - [-] = Nessuna.
- MP** Tipo di struttura sismo-resistente prevalente: [ca] = calcestruzzo armato - [caOld] = calcestruzzo armato esistente - [muOld] = muratura esistente - [muNew] = muratura nuova - [muArm] = muratura armata - [ac] = acciaio.
- Dir** Direzione del sisma.
- TS** Tipologia della struttura:
 Cemento armato: [T 1C] = Telai ad una sola campata - [T+C] = Telai a più campate - [P] = Pareti accoppiate o miste equivalenti a pareti - [2P NC] = Due pareti per direzione non accoppiate - [P NC] = Pareti non accoppiate - [DT] = Deformabili torsionalmente - [PI] = Pendolo inverso - [PM] = Pendolo inverso intelaiate monopiano;
 Muratura: [P] = un solo piano - [PP] = più di un piano;
 Acciaio: [T 1C] = Telai ad una sola campata - [T+C] = Telai a più campate - [CT] = controventi concentrici diagonale tesa - [CV] = controventi concentrici a V - [M] = mensola o pendolo inverso - [TT] = telaio con tamponature.
- EcA** Eccentricità accidentale: [S] = considerata come condizione di carico statica aggiuntiva - [N] = Considerata come incremento delle sollecitazioni.
- Ir_{Tmp}** Per piani con distribuzione dei tamponamenti in pianta fortemente irregolare, l'eccentricità accidentale è stata incrementata di un fattore pari a 2: [SI] = Distribuzione tamponamenti irregolare fortemente - [NO] = Distribuzione tamponamenti regolare.
- C.S.T.** Categoria di sottosuolo: [A] = Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi - [B] = Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti - [C] = Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti - [D] = Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti - [E] = Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m - [S1] = Depositati di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche - [S2] = Depositati di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.
- RP** Regolarità in pianta: [SI] = Struttura regolare - [NO] = Struttura non regolare.
- RH** Regolarità in altezza: [SI] = Struttura regolare - [NO] = Struttura non regolare.
- ξ** Coefficiente viscoso equivalente.

DATI GENERALI ANALISI SISMICA - FATTORI DI STRUTTURA

| Dir. X | | | | Dir. Y | | | | Dir. Z |
|--------|----------------|---------------------|----------------|--------|----------------|---------------------|----------------|--------|
| q | q ₀ | α_u/α_1 | K _w | q | q ₀ | α_u/α_1 | K _w | q |
| 3,120 | 3,90 | 1,30 | - | 3,120 | 3,90 | 1,30 | - | 1,500 |

LEGENDA:

- q** Fattore di riduzione dello spettro di risposta sismico allo SLU (Fattore di struttura).
- q₀** Valore di base.
- α_u/α_1** Rapporto di sovraresistenza.
- K_w** Fattore di riduzione di q₀.

LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI

| Stato Limite | T _r | a _g /g | Amplif. Stratigrafica | | F ₀ | T _c * | T _B | T _C | T _D |
|--------------|----------------|-------------------|-----------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| | [t] | | S _s | C _c | | [s] | [s] | [s] | [s] |
| SLO | 45 | 0,0582 | 1,500 | 1,584 | 2,466 | 0,288 | 0,152 | 0,456 | 1,833 |
| SLD | 75 | 0,0749 | 1,500 | 1,579 | 2,514 | 0,290 | 0,153 | 0,459 | 1,900 |
| SLV | 712 | 0,2106 | 1,385 | 1,537 | 2,490 | 0,315 | 0,162 | 0,485 | 2,442 |
| SLC | 1462 | 0,2749 | 1,288 | 1,524 | 2,498 | 0,324 | 0,164 | 0,493 | 2,700 |

LEGENDA:

- T_r Periodo di ritorno dell'azione sismica. [t] = anni.
a_g/g Coefficiente di accelerazione al suolo.
S_s Coefficienti di Amplificazione Stratigrafica allo SLO/SLD/SLV/SLC.
C_c Coefficienti di Amplificazione di T_c allo SLO/SLD/SLV/SLC.
F₀ Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.
T_c* Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.
T_B Periodo di inizio del tratto accelerazione costante dello spettro di progetto.
T_C Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro di progetto.
T_D Periodo di inizio del tratto a spostamento costante dello spettro di progetto.

| CI Ed | V _N | V _R | Lat. | Long. | Q _a | CTop | CATop |
|-------|----------------|----------------|---------|---------|----------------|------|-------|
| | [t] | [t] | [°ssdc] | [°ssdc] | [m] | | |
| 3 | 50 | 75 | 43.1602 | 13.7834 | 25 | T1 | 1,00 |

LEGENDA:

- CI Ed Classe dell'edificio.
Lat. Latitudine geografica del sito.
Long. Longitudine geografica del sito.
Q_a Altitudine geografica del sito.
CTop Categoria topografica (Vedi NOTE).
CATop Coefficiente di amplificazione topografica.
NOTE [-] = Parametro non significativo per il tipo di calcolo effettuato.
Categoria topografica.
T1: Superficie piane, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°.
T2: Pendii con inclinazione media i > 15°.
T3: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media 15° < i ≤ 30°.
T4: Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media i > 30°.

5 - SCELTA TIPOLOGICA DELLE OPERE DI FONDAZIONE

La tipologia delle opere di fondazione sono consone alle caratteristiche meccaniche del terreno definite in base ai risultati delle indagini geognostiche.

Nel caso in esame, la struttura di fondazione è costituita da **fondazioni indirette di tipo a pali**.

6 - VERIFICHE DI SICUREZZA

Nelle verifiche allo stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

- E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;
R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni, sono state effettuate con l'**Approccio 2** come definito al par. 2.6.1 del D.M. 14/01/2008, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**. Le azioni sono state amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 (STR) definiti nella tabella 6.2.I del D.M. 14/01/2008.

Tabella 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni [D.M. 14/01/2008]

| CARICHI | EFFETTO | Coefficiente parziale γ _F (o γ _E) | A1 (STR) | A2 (GEO) |
|----------------------------|-------------|---|----------|----------|
| Permanenti | Favorevole | γ _{G1} | 1,00 | 1,00 |
| | Sfavorevole | | 1,30 | 1,00 |
| Permanenti non strutturali | Favorevole | γ _{G2} | 0,00 | 0,00 |
| | Sfavorevole | | 1,50 | 1,30 |
| Variabili | Favorevole | γ _{Qi} | 0,00 | 0,00 |
| | Sfavorevole | | 1,50 | 1,30 |

I valori di resistenza del terreno sono stati ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella tabella 6.2.II del D.M. 14/01/2008.

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**

Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno [EN 1997-1:2005 (EC7)]

| PARAMETRO GEOTECNICO | Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale | Coefficiente parziale γ_M | M1 | M2 |
|---------------------------|---|----------------------------------|------|------|
| Angolo di attrito | $\tan \phi_k$ | $\gamma_{\phi'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Coesione efficace | c'_k | $\gamma_{c'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Coesione non drenata | c_{uk} | γ_{cu} | 1,00 | 1,40 |
| Peso dell'unità di volume | γ | γ_γ | 1,00 | 1,00 |

Per le fondazioni su pali, i valori calcolati delle resistenze totali dell'elemento strutturale sono stati divisi per i coefficienti R3 della tabella 6.4.II del D.M. 14/01/2008.

Per le varie tipologie di fondazioni sono di seguito elencate le metodologie ed i modelli usati per il calcolo del carico limite ed i risultati di tale calcolo.

6.1 Carico limite per i pali

Calcolo del carico limite verticale

Per il calcolo del carico limite verticale viene adottato il metodo dell'equilibrio limite in base al quale il carico limite verticale q_{lim} è dato dalla somma della resistenza laterale P_l e della resistenza alla punta P_p :

$$q_{lim} = P_p + P_l$$

Stimando il carico limite sia in condizione drenate che non drenate è fondamentale nella stratigrafia il comportamento del singolo strato (coerente/incoerente).

In particolare se uno strato è stato dichiarato incoerente il suo contributo al carico limite viene sempre valutato in condizioni drenate a prescindere dal metodo di calcolo richiesto (drenato/non drenato).

La **resistenza alla punta (P_p)** si calcola con la seguente formula:

$$P_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (c \cdot N_c + q \cdot N_q)$$

dove:

- per la determinazione dei valori di N_q vengono usati i grafici di Berezantzev $N_q = N_q(L/D; \phi)$ in cui L è la lunghezza del palo, D è il diametro e ϕ è l'angolo di attrito;
 - $N_c = (N_q - 1) \cdot \cot \phi$;
 - c è la coesione;
- q è la pressione litostatica alla punta del palo.

Nel calcolo della resistenza alla punta si fa distinzione tra condizioni drenate e non drenate.

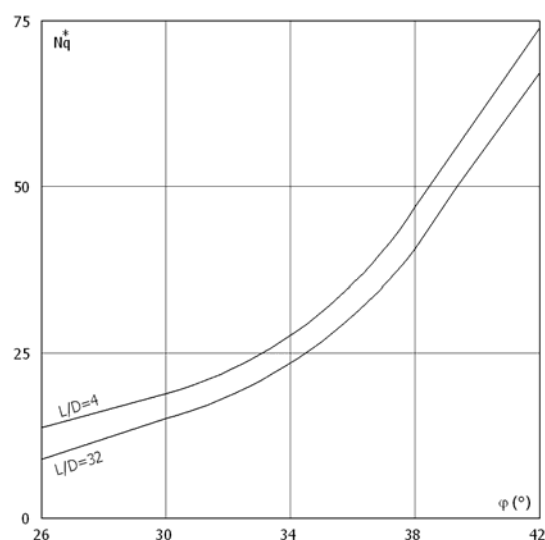
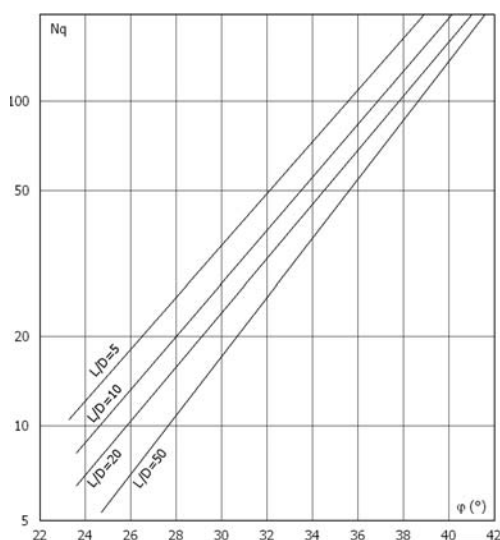
In caso di:

- **condizioni drenate** si assume $c = c'$ (coesione efficace) e q calcolata per pressioni effettive.
- **condizioni non drenate** si assume $q = q_{tot}$ (pressione totale), $c = c_u$ (coesione non drenata), $\phi = 0$ e $N_c = 9$.

Se lo strato in cui arriva il palo è stato dichiarato coerente la stima della resistenza alla punta viene fatta in condizioni drenate o non drenate a seconda del metodo di calcolo richiesto. Viceversa, se lo strato in cui arriva il palo è stato dichiarato incoerente la stima della resistenza alla punta viene fatta sempre in condizioni drenate indipendentemente dal tipo di calcolo richiesto (drenato o non drenato). La portanza viene valutata portando in conto che la resistenza alla punta di un palo si mobilita per determinati valori di cedimento proporzionali al diametro del palo.

Pertanto, viene fatta la distinzione fra pali di medio e grande diametro (> 80 cm), per i quali la resistenza alla punta non viene mobilitata se non dopo un cedimento che può essere notevole (in tal caso si utilizza un valore di N_q^* ridotto rispetto a N_q).

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**



Per il calcolo della **resistenza laterale (P_l)** si usa invece la formula:

$$P_l = \pi \cdot D \cdot L \cdot s,$$

in cui **s** è la somma di un termine di adesione **a** indipendente dalla tensione normale (orizzontale σ_h) e da un termine attritivo dipendente da quest'ultima e dalla tecnologia con cui viene realizzato il palo (battuto, trivellato, ...):

$$s = a + \sigma_h \cdot \mu$$

con μ dipendente dalla scabrezza dell'interfaccia palo/terreno.

Anche per il calcolo della resistenza laterale si distingue tra condizioni drenate e non drenate. In **condizioni drenate** si assume $a = 0$, pertanto, $s = \sigma_h \cdot \mu$ (con $\mu = \tan(\phi \cdot A)$, dove A è il coefficiente riduttivo relativo all'attrito palo-terreno). In **condizioni non drenate** si assume che l'adesione sia un'aliquota della coesione non drenata, per cui $a = \alpha \cdot c_u$ con α dipendente dalla tecnologia esecutiva del palo stesso.

In caso di terreni stratificati la resistenza laterale è la somma delle resistenze offerte dai singoli strati, calcolate a seconda della tipologia del terreno (coerente/incoerente).

Pertanto, il calcolo del palo in condizioni non drenate, per gli strati coerenti il contributo alla portanza laterale del singolo strato viene stimato in funzione della coesione non drenata, mentre per gli strati incoerenti in funzione dell'attrito.

Invece, richiesto un calcolo del palo in condizioni drenate, sia per gli strati coerenti che per quelli incoerenti il contributo alla portanza laterale del singolo strato viene stimato in funzione dell'attrito.

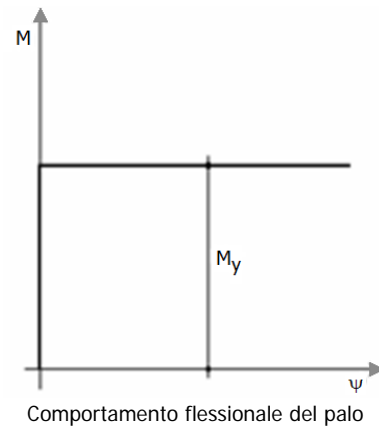
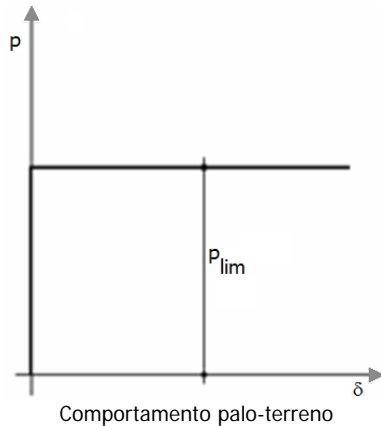
Calcolo del Carico Limite Orizzontale per terreni monostrato

Per la valutazione del carico limite orizzontale si è fatto riferimento alla teoria di Broms e al caso di pali supposti vincolati in testa (rotazione impedita).

Le ipotesi assunte da *Broms* sono le seguenti:

- comportamento dell'interfaccia palo-terreno di tipo rigido-perfettamente plastico, cioè la resistenza del terreno si mobilita interamente per un qualsiasi valore non nullo dello spostamento e resta poi costante al crescere dello spostamento;
- forma del palo influente rispetto al carico limite orizzontale il quale risulta influenzato solo dal diametro del palo stesso;
- in presenza di forze orizzontali la resistenza della sezione strutturale del palo può essere chiamata in causa poiché il regime di sollecitazione di flessione e taglio che consegue all'applicazione di forze orizzontali è molto più gravoso dello sforzo normale che consegue all'applicazione di carichi verticali;
- anche il comportamento flessionale del palo è assunto di tipo rigido-perfettamente plastico, cioè le rotazioni plastiche del palo sono trascurabili finché il momento flettente non attinge al valore M_{plast} ovvero Momento di plasticizzazione. A questo punto nella sezione si forma una cerniera plastica ovvero la rotazione continua indefinitamente sotto momento costante.

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**



La resistenza limite laterale di un palo è determinata dal minimo valore fra:

- il carico orizzontale necessario per produrre il collasso del terreno lungo il fusto del palo;
- il carico orizzontale necessario per produrre la plasticizzazione del palo.

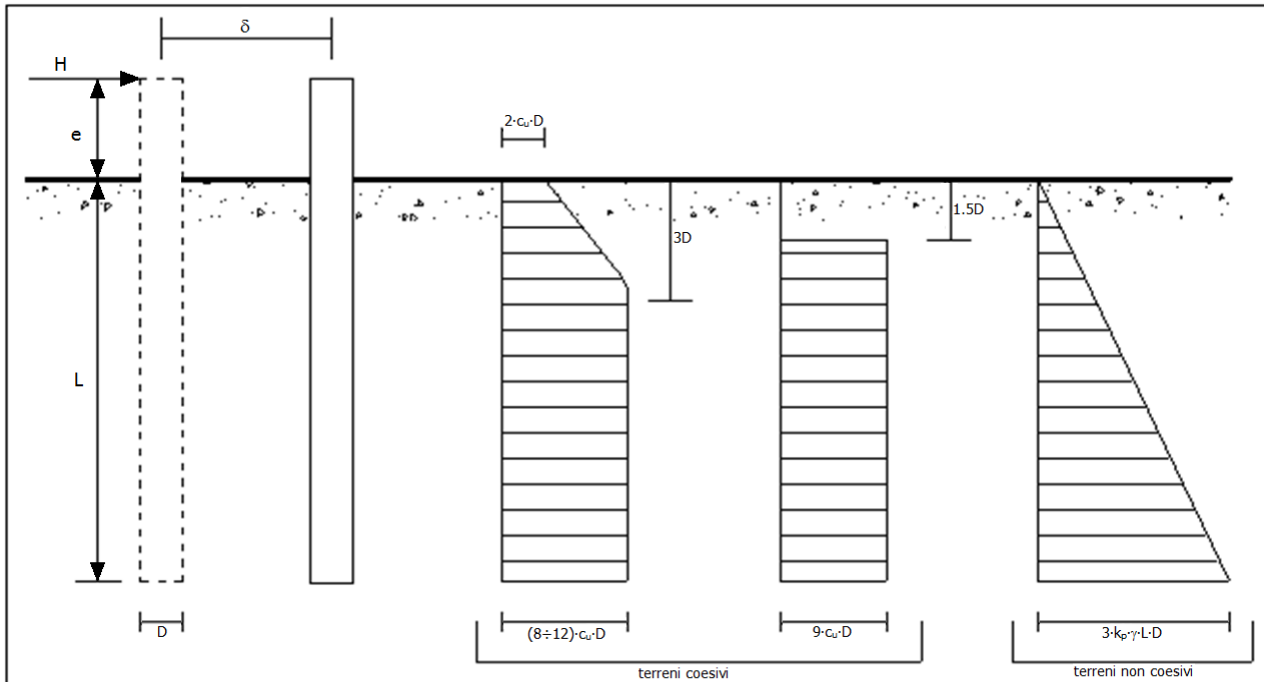
Il primo meccanismo (plasticizzazione del terreno) si verifica nel caso di pali molto rigidi in terreni poco resistenti (meccanismo di palo corto).

Mentre, il secondo meccanismo si verifica nel caso di pali aventi rigidezze non eccessive rispetto al terreno d'infissione (meccanismo di palo lungo o intermedio, con la formazione rispettivamente di due ed una cerniera plastica).

La resistenza limite del terreno rappresenta il valore limite di resistenza che esso può esplicare quando il palo è soggetto ad un carico orizzontale e dipende dalle caratteristiche del terreno e dalla geometria del palo.

Per quanto riguarda la resistenza del terreno, secondo la teoria di Broms, si considerano separatamente i casi di:

- *terreni coesivi o coerenti* (rottura non drenata);
- *terreni non coesivi o incoerenti* (rottura drenata).



Andamento della resistenza del terreno, secondo la teoria di Broms

Quindi, nella fase di calcolo, occorre verificare se il meccanismo di rottura del palo è per:

- **Palo corto** \Rightarrow (plasticizzazione terreno)
- **Palo intermedio** \Rightarrow (plasticizzazione palo)
- **Palo lungo**

Nel caso di *terreni non coesivi* ($c=0$), la teoria di **Broms** assume che la resistenza laterale sia variabile linearmente con la profondità dal valore $p = 0$ (in testa) fino al valore $p = 3 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot L \cdot D$ (alla base), essendo K_p il

LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI

coefficiente di resistenza passiva. Nel calcolo della resistenza laterale si tiene conto dell'eventuale interrimento della testa del palo rispetto al piano campagna, il che comporta che la pressione litostatica in testa al palo sia non nulla. Inoltre, un ulteriore settaggio, presente nelle preferenze del software, consente di trascurare o meno la presenza della falda nella valutazione della pressione litostatica.

Per quanto riguarda i *terreni coesivi* la resistenza laterale parte in testa al palo con un valore di $p = 2 \cdot c_u \cdot D$, cresce linearmente fino alla profondità $3D$ per poi rimanere costante e pari a $p = (8 \div 12) \cdot c_u \cdot D$ per tutta la lunghezza del palo. In alternativa, è possibile utilizzare un diagramma semplificato, di valore $p = 0$ fino alla profondità $1.5 \cdot D$ e con valore costante e pari a $9 \cdot c_u \cdot D$ per tutta la lunghezza del palo.

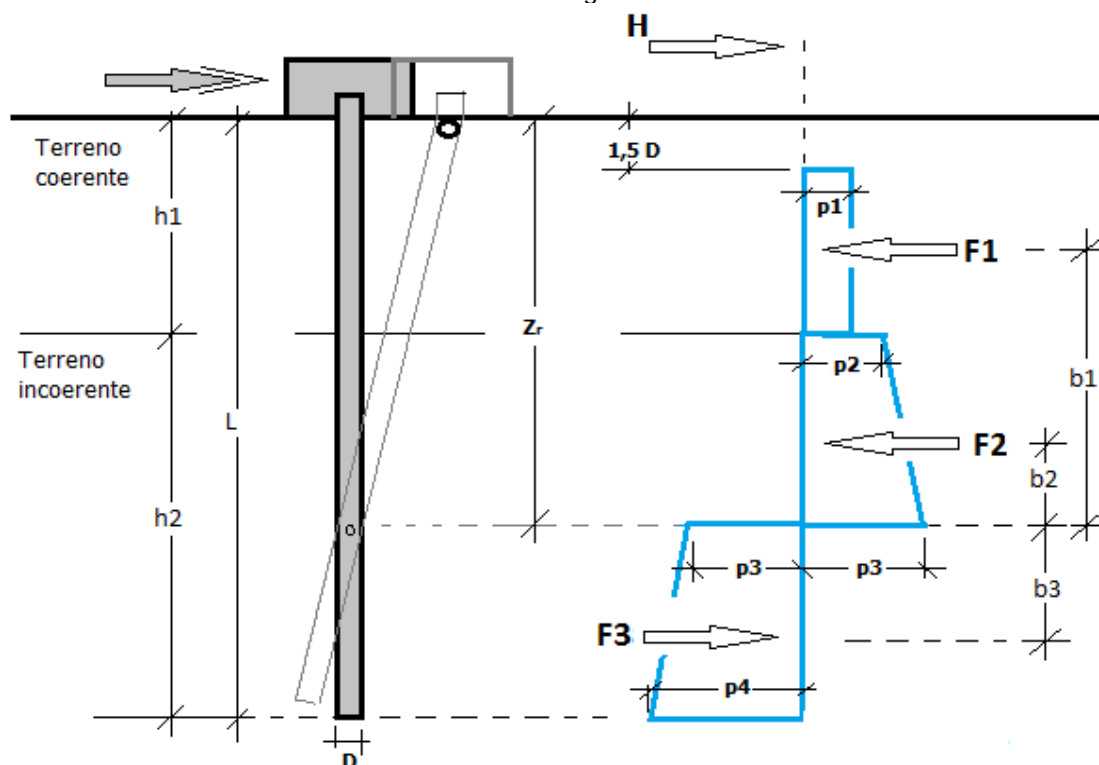
Oltre ai parametri meccanici del terreno viene considerato anche il Momento Ultimo M_p del palo che è funzione oltre che dell'armatura anche dello sforzo assiale agente. Se il comportamento è a palo lungo viene calcolata anche la profondità di formazione della seconda cerniera plastica.

Calcolo del Carico Limite Orizzontale per terreni stratificati

La teoria di Broms è formulata per terreni omogenei, di tipo coerente o incoerente; in caso di terreni stratificati, la teoria di Broms viene generalizzata formulando le seguenti ipotesi aggiuntive, rispetto al caso del terreno monostrato:

- **terreno coerente:** la resistenza laterale per unità di superficie p_i viene considerata costante, secondo l'ipotesi di Broms, a partire da una profondità pari ad $1.5 \cdot D$, ritenendo nulla la reazione per strati di altezza inferiore a $1.5 \cdot D$. La resistenza p_i è indipendente dalla pressione litostatica.
- **terreno incoerente:** la resistenza laterale per unità di superficie p_i varia con legge lineare lungo l'altezza, secondo l'ipotesi di Broms. La resistenza p_i è dipendente dalla pressione litostatica $\gamma \cdot z$, per cui nel calcolo di tali resistenze si tiene conto del peso degli eventuali strati sovrastanti. Un ulteriore settaggio, presente nelle preferenze del software, consente di trascurare o meno la presenza della falda nella valutazione della pressione litostatica.

Per un terreno di due strati lo schema considerato è il seguente:



Nella fase di calcolo, si verifica se il meccanismo di rottura del palo, ipotizzato vincolato in testa (rotazione alla testa impedita) sia di:

- **Palo CORTO**

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**

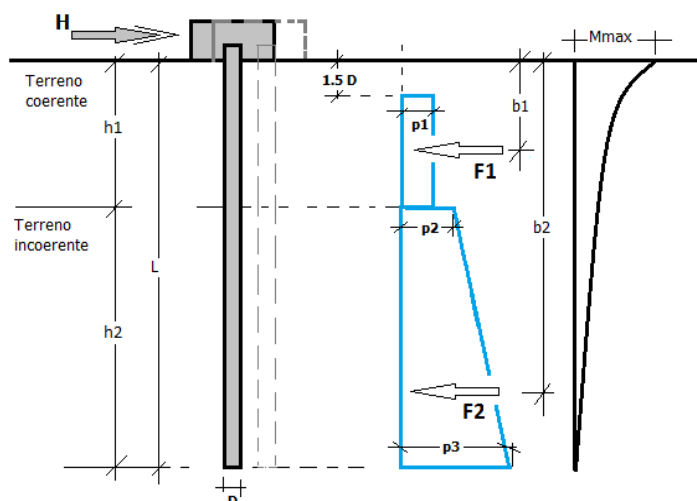
Si valuta il diagramma dei momenti, ipotizzando che il palo non subisca plasticizzazioni. Sotto l'azione della forza H il palo subisce una traslazione rigida. Nell'ipotesi di cui in figura seguente, le resistenze laterali valgono:

$$\begin{aligned} p_1 &= 9 \cdot c_u \cdot D; \\ p_2 &= 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot \gamma_1 \cdot h_1; \\ p_3 &= 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot (\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot h_2). \end{aligned}$$

Da cui:

$$\begin{aligned} F_1 &= p_1 \cdot (h_1 - 1,5 \cdot D); \\ F_2 &= (p_1 + p_2) \cdot h_2 / 2. \end{aligned}$$

Indicando con M_p il momento resistente del palo, se risulta $M_{\max} = F_1 \cdot b_1 + F_2 \cdot b_2 < M_p$ l'ipotesi di palo corto è soddisfatta, altrimenti occorre procedere con l'ipotesi di palo intermedio.



– Palo INTERMEDIO

Si valuta il diagramma dei momenti, ipotizzando che il palo subisca una plasticizzazione all'attacco con la fondazione e che al piede sia presente un vincolo alla traslazione orizzontale. Sotto l'azione della forza H il palo subisce una traslazione ed una rotazione rigida.

Nell'ipotesi di cui in figura seguente, le resistenze laterali valgono:

$$\begin{aligned} p_1 &= 9 \cdot c_u \cdot D; \\ p_2 &= 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot \gamma_1 \cdot h_1; \\ p_3 &= 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot (\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot h_2). \end{aligned}$$

Da cui:

$$\begin{aligned} F_1 &= p_1 \cdot (h_1 - 1,5 \cdot D); \\ F_2 &= (p_1 + p_2) \cdot h_2 / 2. \end{aligned}$$

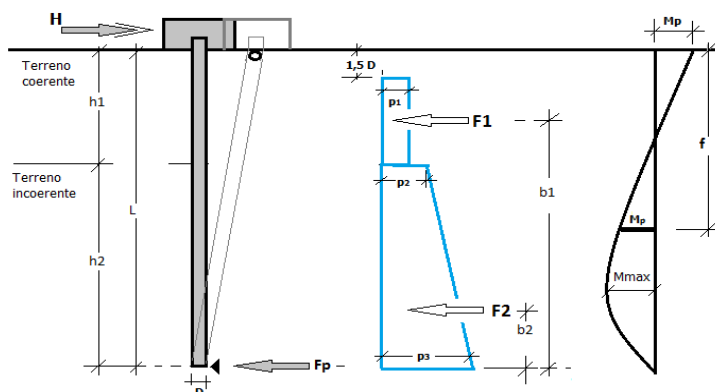
Applicando l'equilibrio alla rotazione intorno al piede del palo:

$$M_p + F_1 \cdot b_1 + F_2 \cdot b_2 - H \cdot L = 0$$

si determina il valore dell'azione H che sollecita il palo.

Una volta note tutte le forze in gioco, si determina il diagramma del momento lungo il fusto del palo.

Indicando con M_p il momento resistente del palo, se risulta $M_{\max} < M_p$ l'ipotesi di palo intermedio è soddisfatta, altrimenti occorre procedere con l'ipotesi di palo lungo.



– Palo LUNGO

Si valuta il diagramma dei momenti, ipotizzando che il palo subisca una plasticizzazione all'attacco con la fondazione e lungo il fusto. Sotto l'azione della forza H il palo subisce una traslazione ed una rotazione rigida. Nell'ipotesi di cui in figura seguente, le resistenze laterali valgono:

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**

$$p_1 = 9 \cdot c_u \cdot D;$$

$$p_2 = 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot \gamma_1 \cdot h_1;$$

$$p_3 = 3 \cdot k_{p,2} \cdot D \cdot [\gamma_1 \cdot h_1 + \gamma_2 \cdot (f - h_1)].$$

Da cui:

$$F_1 = p_1 (h_1 - 1,5 \cdot D);$$

$$F_2 = (p_2 + p_3) (f - h_1) / 2.$$

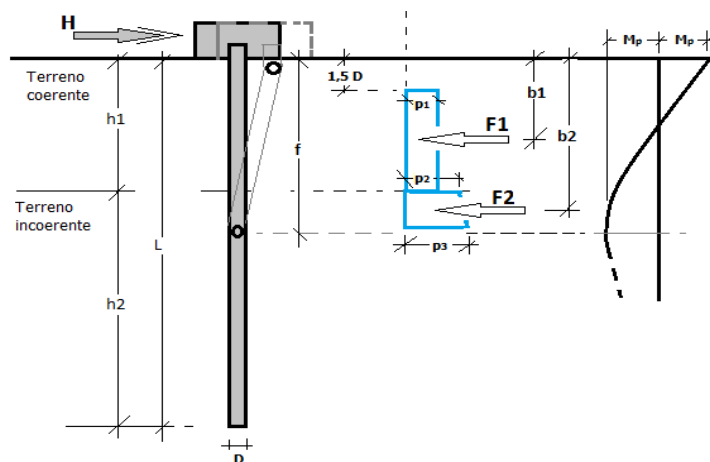
Applicando l'equilibrio alla traslazione si ha:

$$H = F_1 + F_2$$

Imponendo l'equilibrio alla rotazione intorno alla seconda cerniera plastica:

$$H f - F_1 \cdot (f - b_1) - F_2 \cdot (f - b_2) - 2M_p = 0$$

si determina la profondità f della seconda cerniera plastica.



Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU)

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa relativa alle verifiche delle fondazioni su pali eseguite per i seguenti stati limite:

- collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
- collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali.

Si precisa che i valori relativi alle colonne Q_{Rd} , di cui nella tabella relativa alle verifiche, sono da intendersi come il valore di progetto della resistenza R_d ossia il rapporto fra il carico limite q_{lim} (calcolato come sopra esposto) ed il valore del coefficiente parziale di sicurezza γ_R , relativo all'approccio utilizzato.

Tabella 6.4.II - Coefficienti parziali γ_R di pali soggetti a carichi assiali

| Resistenza | Simbolo | infissi | trivellati | ad elica continua |
|--------------------------|----------------|---------|------------|-------------------|
| | γ_R | R3 | R3 | R3 |
| Base | γ_b | 1,15 | 1,35 | 1,30 |
| Laterale in compressione | γ_s | 1,15 | 1,15 | 1,15 |
| Totale ^(*) | γ_t | 1,15 | 1,30 | 1,25 |
| Laterale in trazione | $\gamma_{s,t}$ | 1,25 | 1,25 | 1,25 |

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

Tabella 6.4.VI - Coefficienti parziali γ_T da applicare alle resistenze di pali soggetti a carichi trasversali

| Coefficiente parziale γ_T (R3) |
|--|
| 1,30 |

Con riferimento alle procedure analitiche che prevedono l'utilizzo dei parametri geotecnici, il valore caratteristico della resistenza R_k è dato dal valore ottenuto applicando alle resistenze calcolate R_{cal} i fattori di correlazione ξ riportati nella tabella 6.4.IV, in funzione del numero n di verticali di indagine:

$$R_k = \frac{R_{cal}}{\xi_3}$$

Tabella 6.4.IV - Fattori di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate.

| Numero di verticali indagate | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | ≥ 10 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| ξ_3 | 1,70 | 1,65 | 1,60 | 1,55 | 1,50 | 1,45 | 1,40 |

Si precisa che, nella sottostante tabella, la coppia $Q_{Ed,V} - Q_{Rd,V}$ e $Q_{Ed,O} - Q_{Rd,O}$ è relativa alla combinazione di carico, fra tutte quelle esaminate, che da luogo al minimo coefficiente di sicurezza (CS).

N.B: il valore del $Q_{Ed,V}$ rappresenta l'azione agente sulla testa del palo a cui si sottrae la differenza fra il peso del palo ed quello del volume di terreno occupato dal palo.

PALI - VERIFICHE A CARICO LIMITE VERTICALE E ORIZZONTALE ALLO SLU

| Id PI/Pnt PI | Id Nd, sup | $Q_{Ed,V}$ [N] | $Q_{Ed,O}$ [N] | $Q_{Rd,V}$ [N] | $Q_{Rd,V,Pt}$ [N] | $Q_{Rd,V,Lt}$ [N] | $Q_{Rd,O}$ [N] | $M_{max,O}$ [N·m] | T.R. | $Z_{c,pls}$ [m] | CS _V | CS _O |
|--------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| PALO4 | 00042 | 665 525 | 114 423 | 691 136 | 282 193 | 408 943 | 124 008 | 164609 | Palo Lungo | 1,56 | 1,04 | 1,08 |
| PALO8 | 00043 | 674 219 | 106 079 | 691 136 | 282 193 | 408 943 | 124 008 | 164609 | Palo Lungo | 1,56 | 1,03 | 1,17 |

**LAVORI DI COMPLETAMENTO SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE SALVANO
PROGETTO ESECUTIVO STRUTTURALE – RELAZIONE GEOTECNICA E SULLE FONDAZIONI**

| Id_{PI/Pnt PI} | Id_{Nd,sup} | Q_{Ed,V} | Q_{Ed,O} | Q_{Rd,V} | Q_{Rd,V,Pt} | Q_{Rd,V,Lt} | Q_{Rd,O} | M_{max,O} | T.R. | Z_{c,pls} | CS_V | CS_O |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | [N] | [N] | [N] | [N] | [N] | [N] | [N·m] | | [m] | | |
| PALO1 | 00054 | 626 280 | 162 366 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,91 | 1,22 |
| PALO2 | 00029 | 717 143 | 155 040 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 225 645 | 365905 | Palo Lungo | 1,81 | 1,67 | 1,46 |
| PALO3 | 00037 | 669 812 | 161 073 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,78 | 1,23 |
| PALO6 | 00030 | 829 667 | 139 275 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,44 | 1,42 |
| PALO5 | 00031 | 797 499 | 143 977 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,50 | 1,37 |
| PALO7 | 00032 | 842 421 | 143 730 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,42 | 1,37 |
| PALO10 | 00025 | 701 029 | 143 596 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,70 | 1,37 |
| PALO9 | 00026 | 681 514 | 149 307 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,75 | 1,32 |
| PALO11 | 00038 | 611 346 | 149 434 | 1 194 538 | 771 810 | 422 728 | 197 399 | 313633 | Palo Lungo | 1,75 | 1,95 | 1,32 |
| PALO14 | 00036 | 447 683 | 118 457 | 623 716 | 262 149 | 361 567 | 176 349 | 253199 | Palo Lungo | 1,70 | 1,39 | 1,49 |
| PALO12 | 00033 | 548 386 | 118 794 | 623 716 | 262 149 | 361 567 | 191 484 | 280272 | Palo Lungo | 1,74 | 1,14 | 1,61 |
| PALO13 | 00028 | 605 293 | 114 103 | 623 716 | 262 149 | 361 567 | 176 349 | 253199 | Palo Lungo | 1,70 | 1,03 | 1,55 |

LEGENDA:

| | |
|-------------------------------|---|
| Id_{PI/Pnt PI} | Identificativo del palo o del plinto su pali. |
| Id_{Nd,sup} | Identificativo del nodo all'estremo superiore del palo o della pilastrata cui il plinto è collegato. |
| Q_{Ed,V} | Carico verticale di progetto. |
| Q_{Ed,O} | Carico orizzontale di progetto. |
| Q_{Rd,V} | Resistenza di progetto verticale. |
| Q_{Rd,V,Pt} | Aliquota della resistenza di progetto verticale dovuto alla resistenza alla punta. |
| Q_{Rd,V,Lt} | Aliquota della resistenza di progetto verticale dovuto alla resistenza laterale. |
| Q_{Rd,O} | Resistenza di progetto orizzontale. |
| M_{max,O} | Momento massimo lungo il palo per carichi orizzontali. |
| T.R. | Modalità di rottura per carico limite orizzontale (Palo Corto, Palo Medio, Palo Lungo). |
| Z_{c,pls} | Profondità della seconda cerniera plastica. |
| CS_V | Coefficiente di sicurezza per azioni verticali ([NS] = Non Significativo per valori di CS >= 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta). |
| CS_O | Coefficiente di sicurezza per azioni orizzontali ([NS] = Non Significativo per valori di CS >= 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta). |

Fermo, Marzo 2017

Il progettista strutturale

Ing. FINUCCI Valerio