

# REALIZZAZIONE DI OPERE DI LAMINAZIONE NELL'ALTO SEVESO

CUP: B83H19000350002 – CIG: 8150878D4C

(CO-E-158)

## PROGETTO DEFINITIVO

MARZO 2022

ELABORATO:

### RELAZIONE GEOTECNICA ZONA NORD

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	VERIFICA
00	PRIMA EMISSIONE	MARZO 2022	S. Frati	G. B. Peduzzi
01				

RUP

*Dott. Ing. MARCO LA VEGLIA*

ATI:

MANDATARIA



20133 MILANO – via Bassini, 23 – tel. 0226681264  
fax 0226681553 – E-Mail: etatec@etatec.it

*Prof. Ing. ALESSANDRO PAOLETTI*  
*Dott. Ing. GIOVANNI BATTISTA PEDUZZI*  
*Dott. Ing. STEFANO CROCI*  
*Dott. Ing. FILIPPO MALINGENGO*  
*Dott. Ing. VINCENZO CICCARELLI*

MANDANTI

**STUDIO PAOLETTI**  
INGEGNERI ASSOCIATI

20133 MILANO – via Bassini, 23 – tel. 0226681264  
fax 0226681553 – E-Mail: studiopaoletti@etatec.it

*Dott. Ing. CRISTINA GIUSEPPINA PASSONI*

**Studio Frati**  
geologia applicata

22079 VILLA GUARDIA (CO) – via Monte Grappa, 43a  
Tel 3388587308 – E-Mail: frati@geologi.it

*Dott. Geol. STEFANO FRATI*

**FABRIZIO MONZA**  
ARCHITETTO

20014 NERVIANO (MI) – via Ticino, 27  
Tel. 0331415944 – E-Mail: studio@archimonza.it

*Arch. FABRIZIO MONZA*

  
DOTT. SSA  
**ILARIA FRONTORI**  
ARCHEOLOGA

20093 COLOGNO MONZESE (MI) – via Santa Margherita, 14  
Tel. 3383775512 – E-Mail: ilaria.frontori@gmail.com

*Dott. ILARIA FRONTORI*

## INDICE

1. PREMESSA.....	1
2. METODOLOGIA ELABORAZIONE PROVE.....	1
2.1 PROVE SPT IN FORO DI SONDAGGIO.....	1
2.2 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE (DPSH).....	2
2.3 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT) .....	3
2.4 CORRELAZIONI UTILIZZATE .....	4
3. MODELLO GEOTECNICO .....	6
4. VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE .....	9

---

Mandanti:

I

## 1. PREMESSA

Nella presente relazione vengono riportate le indicazioni di carattere geotecnico riferite all'Area Nord sulla base delle indagini geognostiche condotte.

Le indagini e le prove, descritte nella relazione geologica, oltre a consentire di determinare la successione litostratigrafica dei terreni presenti in sito, hanno permesso di ricavare i principali parametri geotecnici dei terreni subaffioranti.

Di seguito vengono riportate sia l'interpretazione delle indagini effettuate, sia le correlazioni semi-empiriche utilizzate (individuare come più affidabili nel contesto geologico in esame) e vengono quindi esposti i modelli litotecnici locali.

Per quanto riguarda il modello geologico si rimanda alla RELAZIONE GEOLOGICA specifica per l'Area Sud, mentre i report delle indagini sono allegati alla RELAZIONE SULLE INDAGINI (essi non sono riportati in allegato ma vanno letti congiuntamente al presente documento).

## 2. METODOLOGIA ELABORAZIONE PROVE

### 2.1 PROVE SPT IN FORO DI SONDAGGIO

Le prove S.P.T. (Standard Penetration Test) praticate nei fori dei sondaggi permettono di determinare le variazioni della resistenza alla penetrazione lungo la verticale di indagine. Si tratta di una prova puntuale e, quindi, si ottengono solo diagrammi discontinui in cui si ha la resistenza alla penetrazione in funzione della profondità.

La prova si esegue durante la perforazione e consiste nell'infiggere nel terreno un tubo campionario di dimensioni standard o di una punta chiusa collegati alla superficie mediante batteria di aste in testa alle quali agisce un maglio del peso di 63,5 kg che cade liberamente da un'altezza di 0,76 m. La prova comporta un'infissione preliminare di 15 cm contando ed annotando il numero di colpi del maglio ( $N_1$ ), fino ad un massimo di 50 colpi; successivamente si procede all'infissione del tratto di 30 cm contando ed annotando il numero di colpi relativi ai primi 15 cm ( $N_2$ ) in ed ai secondi 15 cm ( $N_3$ ) fino ad un massimo di 100 colpi per un avanzamento minore o uguale a 30 cm. I valori riferiti ai primi 15 cm generalmente non vengono considerati in quanto rappresentativi di un terreno disturbato dalla

perforazione.

$$N = N_{spt} = N_2 + N_3$$

A tale valore sono poi stati applicati dei fattori di correzione al fine di riportare il valore di N ad un'energia standardizzata al 60% secondo la seguente equazione:

$$N_{60} = N * C_E * C_B * C_S * C_R$$

e con la seguente equazione:  $C_E = E_R/60$

dove

N = numero colpi per l'affondamento di 30 cm

N<sub>60</sub> = valore di N corretto per un'efficienza del 60%

C<sub>E</sub> = correzione rapporto energia

C<sub>B</sub> = correzione diametro foro

C<sub>S</sub> = correzione metodo di campionamento

C<sub>R</sub> = correzione lunghezza aste

E<sub>R</sub> = rendimento del sistema di battuta secondo la norma ASTM D-4633-86

Il valore N<sub>60</sub> così ottenuto è stato normalizzato per la pressione litostatica efficace con la seguente relazione:

$$N_{160} = N_{60} * CN$$

dove  $CN = \text{coefficiente di Liao \& Whitmann - 1986} = \sqrt{98,1 / \sigma'_v}$  (CN ≤ 1,5)  
 con  $\sigma'_v$  = tensione litostatica efficace (kPa)

## 2.2 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE (DPSH)

Per le prove penetrometriche dinamiche continue il metodo di interpretazione usato consiste nel risalire da N<sub>30</sub> (numero di colpi del penetrometro necessari per l'infissione della punta di 30 cm) a N<sub>spt</sub> (numero di colpi della prova standard penetration test) ed usare le correlazioni riportate in letteratura per le prove in foro di sondaggio.

Il valore di N<sub>spt</sub> si ricava dalla formula di LaCroix & Horn (1973), secondo cui:

$$N_{spt} = \left( \frac{W * H}{6,2 * D^2 * L} \right) * N$$

dove

W = peso del maglio in Kg

H = altezza di caduta in cm

D = diametro del cono in cm

L = penetrazione standard in cm

N = numero di colpi misurato nella prova penetrometrica

Il valore della costante di trasformazione per il penetrometro utilizzato è pari a 1,16 ( $N_{spt} = 1,16 * N_{30}$ ).

Si applica poi la stessa procedura esposta per le prove SPT ottenendo  $N_{60}$  e  $N_{160}$ .

### 2.3 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT)

La prova penetrometrica statica CPT (Cone Penetration Test) consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica, di dimensioni e caratteristiche standard, infissa a velocità costante nel terreno, tramite un dispositivo di spinta che agisce alternativamente su una batteria di aste esterna e su una interna.

Le letture di campagna durante l'infissione sono le seguenti:

- Lettura alla punta LP = prima lettura di campagna durante l'infissione relativa all'infissione della sola punta
- Lettura laterale LT = seconda lettura di campagna relativa all'infissione della punta + manicotto
- Lettura totale LLTT = terza lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne ( tale lettura non sempre viene rilevata in quanto non è influente metodologicamente ai fini interpretativi).

I dati misurati della prova sono quindi una coppia di valori per ogni intervallo di lettura costituiti da LP (Lettura alla punta) e LT (Lettura della punta + manicotto), le relative resistenze vengono quindi desunte per differenza.

L'elaborazione prevede il calcolo delle resistenze specifiche  $Q_c$  (Resistenza alla punta  $R_p$ ) e  $Q_l$  (Resistenza Laterale  $R_L$  o  $f_s$  attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) tramite opportune costanti e sulla base dei valori specifici dell'area di base della punta e dell'area del manicotto di frizione laterale.

L'analisi dei risultati di prove C.P.T. consente in primo luogo il riconoscimento litologico dei terreni attraversati.

Nel caso in esame questa tipologia di prove ha indagato solamente gli orizzonti litologici A e B (parzialmente). Esse hanno sostanzialmente confermato quanto ricavato dalle analisi granulometriche effettuate in tali livelli, ovvero un Orizzonte A costituito da limi con sabbia argillosi e un Orizzonte B da sabbia con ghiaia debolmente limoso/argillosa.

Tramite correlazioni empiriche è stato possibile ottenere le caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno di fondazione dai valori ottenuti per  $q_c$  e  $f_s$ .

## 2.4 CORRELAZIONI UTILIZZATE

I valori adottati come rappresentativi delle caratteristiche geotecniche dei terreni investigati sono quelli calcolati con le relazioni degli autori di seguito riportate.

### Peso di volume naturale e peso di volume saturo

Valori stimati sulla base dei dati medi riportati in letteratura e tenendo conto della relazione di Paikowsky et al. (1995).

$$Y = 0,88 * [N_{160}] + 99 \quad \text{con } Y \leq 146 \text{ pcf} \quad \text{Paikowsky et al}$$

*l'unità di misura risultante è espressa in pcf (Pound-force per Cubic Foot), equivalente a libbra per piede cubo (lb/ft<sup>3</sup>) e che corrisponde a circa 0.1571 kN/m<sup>3</sup>*

### Angolo di resistenza al taglio $\phi$

L'angolo d'attrito efficace ( $\phi$ ) è stato determinato utilizzando le formulazioni di due differenti Autori: Meyerhof '65 e Wolff '89 per le prove dinamiche e De Beer e Koppeijan per le prove statiche.

$$\phi = 23,7 + 0,57 * N_{spt} - 0,006 * N_{spt}^2 \quad \text{con limo} > 5\% \quad \text{utilizzata Meyerhof 65}$$

$$\phi = 29,47 + 0,46 * N_{spt} - 0,004 * N_{spt}^2 \quad \text{con limo} < 5\% \quad \text{Meyerhof 65}$$

$$\phi = 27,1 + 0,3 * N_{160} - 0,00054 * N_{160}^2 \quad \text{Wolff '89 (utilizzando } N_{spt} = N_{160})$$

$$\phi = 5,9 + 4,76 * \ln (Q_c / \sigma'_v) \quad \text{per terreni sovraconsolidata occorre aumentare il valore di } 1-2^\circ \quad \text{De Beer}$$

$$\phi = 5,8 + 5,21 * \ln (Q_c / \sigma'_v) \quad \text{Koppeijan}$$

*La resistenza alla punta e della tensione verticale efficace espresse in kg/m<sup>2</sup>*

### **Modulo di deformazione (modulo di Young) E**

Per ricavare tale modulo è stata utilizzata la correlazione fornita da AASHTO (1996) per le prove dinamiche e De Beer per le prove statiche.

#### **AASHTO**

$E = 0,4 * N_{160}$	per limi, sabbie limose, miscele leggermente coesive
$E = 0,7 * N_{160}$	per sabbie pulite da fini a medie, sabbie leggermente limose
$E = 1 * N_{160}$	per sabbie grossolane e sabbie con poca ghiaia
$E = 1,2 * N_{160}$	per ghiaie sabbiose

*risultato espresso in MPa*

#### **De Beer**

$E = 1,5 * Q_c$	per sabbia limosa
$E = 2 * Q_c$	per sabbia mediamente densa
$E = 3 * Q_c$	per sabbia densa
$E = 5 * Q_c$	per sabbia e ghiaia

### **Modulo edometrico Ed**

E' stata utilizzata la formulazione empirica di Robertson & Campanella (da diagramma di Schmertmann).

$$Ed = 0,03 * Q_c + 11,7 * \sigma'_{v0} + 0,79 * Dr (\%)$$

*risultato espresso in kg/cm<sup>2</sup>*

### 3. MODELLO GEOTECNICO

Le tabelle seguenti sono riportati i principali parametri litotecnici delle varie unità rilevate e riportate nel modello geologico, facendo riferimento alle singole indagini condotte.

prova penetrometrica dinamica (DPSH) – P1											
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		colpi			Peso di volume naturale	Peso di volume saturo	Angolo d'attrito	Modulo elastico	Resistenza al taglio non drenata
		da	a	N <sub>30</sub>	N <sub>60</sub>	N <sub>160</sub>	Y	Ysat	φ	E	Cu
		m	m				g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
A	1	0,0	-0,6	2,5	2,9	4,3	-	-	-	-	-
B	2	-0,6	-8,1	4,0	4,6	5,4	1,66	1,96	26,6	38	-
B	3	-8,1	-10,2	21,0	24,2	20,4	1,87	2,17	32,5	146	-

prova penetrometrica dinamica (DPSH) – P2											
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		colpi			Peso di volume naturale	Peso di volume saturo	Angolo d'attrito	Modulo elastico	Resistenza al taglio non drenata
		da <i>m</i>	a <i>m</i>	N <sub>30</sub>	N <sub>60</sub>	N <sub>160</sub>	Y <i>g/cm<sup>3</sup></i>	Y <sub>sat</sub> <i>g/cm<sup>3</sup></i>	φ °	E <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Cu <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
A	1	0,0	-2,1	1,4	1,6	2,5	1,62	-	25,1	10	-
B	2	-2,1	-6	3,2	3,6	4,7	1,65	1,95	26,2	34	-
B	3	-6	-9,9	15,5	17,8	17,8	1,84	2,14	31,9	127	-
B	4	-9,9	-15	5,1	5,9	4,9	1,66	1,96	26,3	35	-

Mandanti:

6

Prove SPT in foro di sondaggio – PZ1											
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		colpi			Peso di volume naturale	Peso di volume saturo	Angolo d'attrito	Modulo elastico	Resistenza al taglio non drenata
		da <i>m</i>	a <i>m</i>	N <sub>30</sub>	N <sub>60</sub>	N <sub>160</sub>	Y <i>g/cm<sup>3</sup></i>	Y <sub>sat</sub> <i>g/cm<sup>3</sup></i>	φ °	E <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Cu <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
B	2	-1,5	-1,95	4,0	3,2	4,7	1,65	-	26,3	34	-
B	2	-3	-3,45	3,0	2,7	3,8	1,64	1,94	25,8	27	-
C	3	-4,5	-4,95	11,0	9,8	12,1	1,76	2,06	29,7	87	-
C	3	-6	-6,45	9,0	9,0	10,8	1,74	2,04	29,2	77	-
C	3	-7,5	-7,95	15,0	15,0	15,3	1,80	2,10	31,0	109	-
C	3	-9	-9,45	10,0	10,0	9,5	1,72	2,02	28,6	68	-

Prove SPT in foro di sondaggio – PZ2											
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		colpi			Peso di volume naturale	Peso di volume saturo	Angolo d'attrito	Modulo elastico	Resistenza al taglio non drenata
		da <i>m</i>	a <i>m</i>	N <sub>30</sub>	N <sub>60</sub>	N <sub>160</sub>	Y <i>g/cm<sup>3</sup></i>	Y <sub>sat</sub> <i>g/cm<sup>3</sup></i>	φ °	E <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Cu <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
B	2	-1,5	-1,95	6,0	4,7	7,1	1,69	-	29,2	72	-
B	5	-3	-3,45	47,0	41,9	56,0	1,98 - 2,15	-	≥ 38	≥ 650	-
B	5	-4,5	-4,95	70,0	R	R	1,98 - 2,16	-	≥ 38	≥ 650	-
B	5	-6	-6,45	R	R	R	1,98 - 2,17	-	≥ 38	≥ 650	-
B	5	-7,5	-7,95	R	R	R	1,98 - 2,18	-	≥ 38	≥ 650	-
B	5	-9	-9,45	R	R	R	1,98 - 2,19	-	≥ 38	≥ 650	-

prova penetrometrica statica (CPT) – P3								
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		Qc <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	fs <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Angolo d'attrito $\varphi$ °	Modulo elastico <b>E</b> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Modulo edometrico <b>Ed</b> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
		da <i>m</i>	a <i>m</i>					
<b>A</b>	<b>1</b>	0,0	-1,8	21,7	1,22	27,8	33	47
<b>B</b>	<b>3</b>	-1,8	-4,4	67,5	1,4	30,8	135	-
<b>B</b>	<b>4</b>	-4,4	-10,0	34,6	1,03	26,2	52	-

prova penetrometrica statica (CPT) – P4								
Orizzonti geologici	Livelli litotecnici	profondità		Qc <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	fs <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Angolo d'attrito $\varphi$ °	Modulo elastico <b>E</b> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>	Modulo edometrico <b>Ed</b> <i>kg/cm<sup>2</sup></i>
		da <i>m</i>	a <i>m</i>					
<b>A</b>	<b>1</b>	0,0	-1,2	14,8	1,17	31	22	57
<b>B</b>	<b>3</b>	-1,2	-2,8	85,5	2,49	34,8	171	-
<b>B</b>	<b>4</b>	-2,8	-5	26,2	1,10	26,9	39	-

Il livello litotecnico 2 non è stato individuato dalle prove statiche in quanto presenta caratteristiche molto simili al livello 1.

\*\*\*\*\*

Per quanto riguarda le indagini di laboratorio, a titolo indicativo sono state applicate alcune correlazioni riportate in letteratura tra i limiti di Atterberg e alcuni parametri geotecnici:

- coefficiente di compressibilità (Cc) (Terzaghi-Peck 1967) – basato su WL

I valori ottenuti sono i seguenti

orizzonte geologico A				
Scavo	WL	IP		Cc
NA1	20	6	poco plastico	0,09
NC4	29	9	poco plastico	0,17

Mandanti:

8

orizzonte geologico B				
Scavo	WL	IP		Cc
NA2	23	5	poco plastico	0,12
NA3	32	9	poco plastico	0,20
NA4	37	13	poco plastico	0,24
NA5	38	14	poco plastico	0,25
NB1	21	nd	non plastico	0,10

#### 4. VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

Con riferimento a quanto riportato nella relazione geologica (capitolo 8) per il sito in esame può essere attribuito (per quanto riguarda il modello sismico) una categoria di sottosuolo C ed una categoria topografica T1,

Le NTC richiedono di verificare che il sito sul quale è ubicato il nuovo manufatto risulti stabile nei confronti della liquefazione. Si definisce liquefazione, la riduzione di resistenza e/o rigidità causata durante il sisma, dall'aumento delle pressioni interstiziali in terreni saturi non coesivi, tale da provocare deformazioni permanenti significative o persino da indurre nel terreno una condizione di sforzi efficaci quasi nulli. Ciò può avvenire e nei depositi di sabbie fini sciolte quando, sotto l'azione dei carichi applicati o di forze idrodinamiche, la pressione dell'acqua dei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, cioè fino a quando gli sforzi efficaci si riducono a zero,

Come consentito dal D.M. 14,01,08, viene omessa la verifica alla liquefazione in quanto gli eventi sismici attesi sull'area mostrano accelerazioni massime al piano campagna (stato limite SLV) minori di 0,1 g (valido, con le assunzioni riportate sopra, per qualsiasi classe d'uso dell'opera).

Villa Guardia, dicembre 2021

Dott. geologo  
Frati Stefano



Mandanti:

9