



COMUNE DI BOLOGNA



COMUNE DI CALDERARA DI RENO



COMUNE DI CAMUGNANO



COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO



COMUNE DI CASTEL DI CASIO



COMUNE DI CREVALCORE



COMUNE DI GRIZZANA MORANDI



COMUNE DI MARZABOTTO



COMUNE DI SAN GIOVANNI IN PERSICETO

Realizzazione del percorso del II lotto prioritario della Ciclovía del Sole completamento tronchi n. 3, 4 e 7 nella Città Metropolitana di Bologna - Codice opera 2023VIPCSNC01

CUP: C31B22001500006



PROGETTO PER CONFERENZA DEI SERVIZI



MATE Soc. Coop.



Coopprogetti Soc. Coop.

PARCIANELLO PARTNERS Parcianello & Partners engineering s.r.l.

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: Ing. Lino Pollastri

RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO:
Ing. Chiara Ferrari

SUPPORTO AL RUP:
arch. Federica Sodano
arch. Carla Maria Costanza Di Martino

GEOLOGIA, GEOTECNIA, SISMICA Report indagini geognostiche

Fase C	Categoria GEN	Sottocategoria GE	Progressivo 04	Tipo elaborato RE	Progressivo 02	Revisione B
Codice commessa BOLO24030	Redatto Caprara	Controllato Pollastri	Approvato Pollastri	Scala -	Descrizione Emissione	Data Novembre 2024

ALLEGATO A

REPORT DI PROVA SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Rif.:

Data: 45464

Committente: **MATE Engineering Soc. Coop.va**

Ora: /

Località: **Quartieri Borgo Panigale e Barca, Bologna e Casalecchio**

Profondità del sondaggio: **19.80 m**

Quota iniziale s.l.m.: m

Profondità falda dal p.c.: **16.00 m**

Perforazione: **rotazione**

Diametro del foro: **120 mm**

Colonna stratigrafica Profondità (m)	Falda (m)	Spessori (m)	Campioni (sigla)	SPT		Descrizione litologica
				prof. (m)	(Colpi/ft)	
0		1.00				Terreno di riporto, con sabbia limosa e sabbia e ghiaietto. Presenza di trovanti
1						sabbia e sabbia limosa, con livelli consolidati e addensati, di color marrone
2		1.80				
3				3,00-3,45	36-27-21	ghiaia e con sabbie da medie a grossolane in matrice, da scarsa a media. Ghiaia con ciottoli di dimensione fino a dm. Spesso ghiaia grano-sostenuta.
4						
5						
6				6,00-6,45	34-45-35	
7						
8						
9				9,00-9,45	R-R-R	
10						livello di sabbia limosa e ghiaia a 10,1-10,3
11						
12						livello di sabbia limosa e ghiaia a 12,0-12,1
13						livello di sabbia limosa e ghiaia a 12,8-13,2
14						
15						
16		13.20 0.40				limo sabbioso nocciola plastico e umido p.p. = 1,0 - 1,6
17						
18						ghiaia e sabbia come sopra
19						
20		3.40				
21						

Sondaggio S1



Figura 1: foto cassetta catalogatrice da 0,0 m a -5,0 m



Figura 2: foto cassetta catalogatrice da -5,0 m a -10,0 m

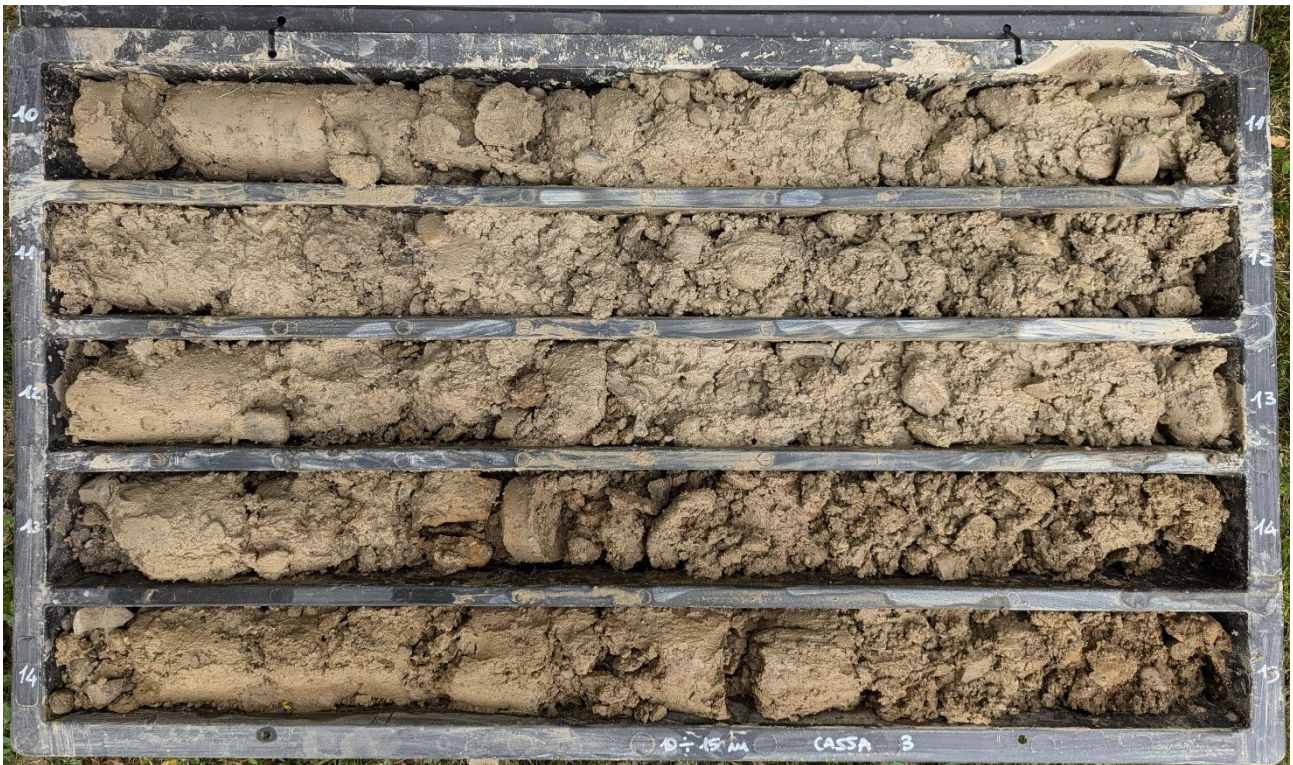


Figura 3: foto cassetta catalogatrice da -10,0 m a -15,0 m



Figura 4: foto cassetta catalogatrice da -15,0 m a -20,0 m

Rif.:

Data: 45464

Committente: MATE Engineering Soc. Coop.va

Ora: /

Località: Quartieri Borgo Panigale e Barca, Bologna e Casalecchio

Profondità del sondaggio: 20.00 m

Quota iniziale s.l.m.: m

Profondità falda dal p.c.: 16.00 m

Perforazione: rotazione

Diametro del foro: 120 mm

Colonna stratigrafica Profondità (m)	Falda (m)	Spessori (m)	Campioni (sigla)	SPT prof. (m)	(Colpi/ft)	Descrizione litologica
0						Terreno di riporto, con sabbia limosa e sabbia e ghiaietto. Presenza di trovanti
1						
2		2.10 0.20				sabbia e sabbia limosa, con livelli consolidati e addensati, di color marrone
3				3,00-3,45	25-R-R	ghiaia e con sabbie da medie a grossolane in matrice, da scarsa a media. Ghiaia con ciottoli di dimensione fino a dm. Spesso ghiaia grano-sostenuta.
4						
5						
6				6,00-6,45	35-26-27	
7						
8						
9				9,00-9,45	R-R-R	
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18		15.70				limo sabbioso nocciola plastico e umido p.p. = 1,0 - 1,6
19		1.20				
20		0.80				ghiaia e sabbia come sopra
21						

Sondaggio S2



Figura 5: foto cassetta catalogatrice da 0,0 m a -5,0 m



Figura 6: foto cassetta catalogatrice da -5,0 m a -10,0 m



Figura 7: foto cassetta catalogatrice da -10,0 m a -15,0 m



Figura 8: foto cassetta catalogatrice da -15,0 m a -20,0 m

ALLEGATO B

METODO E REPORT DI PROVA PENETROMETRICA DINAMICA MEDIA (DPM)

Penetrometro utilizzato: "GeoTOOL"

1. PROVA PENETROMETRICA DINAMICA MEDIA

Le prove penetrometriche dinamiche medie consentono una definizione della successione stratigrafica anche nelle aree più impervie, che non è possibile raggiungere con altri mezzi. Nonostante i dati possano risultare grossolani e imprecisi, da tali indagini è comunque possibile ricostruire una successione stratigrafica con modelli semplici e collaudati.

1.1. METODOLOGIA DI INDAGINE

La prova penetrometrica dinamica media (DPM) consiste nel registrare il numero dei colpi di una massa battente di 30 Kg con volata di 20 cm, che consente l'avanzamento di 10 cm di una punta conica di 10 cm² di superficie.

Da ciò è possibile ottenere il valore di resistenza dinamica alla punta "rpd", ricavato secondo "la formula degli olandesi":

$$Rpd = M^2 * h/A * e * (M + P) \text{ [kPa]}$$

Dove:

M = peso massa battente (30 kg);

h = altezza di caduta(20 cm);

e = infissione media per colpo (δ/n);

P = peso totale aste (2.0 kg/m) e sistema battuta (6.5 kg);

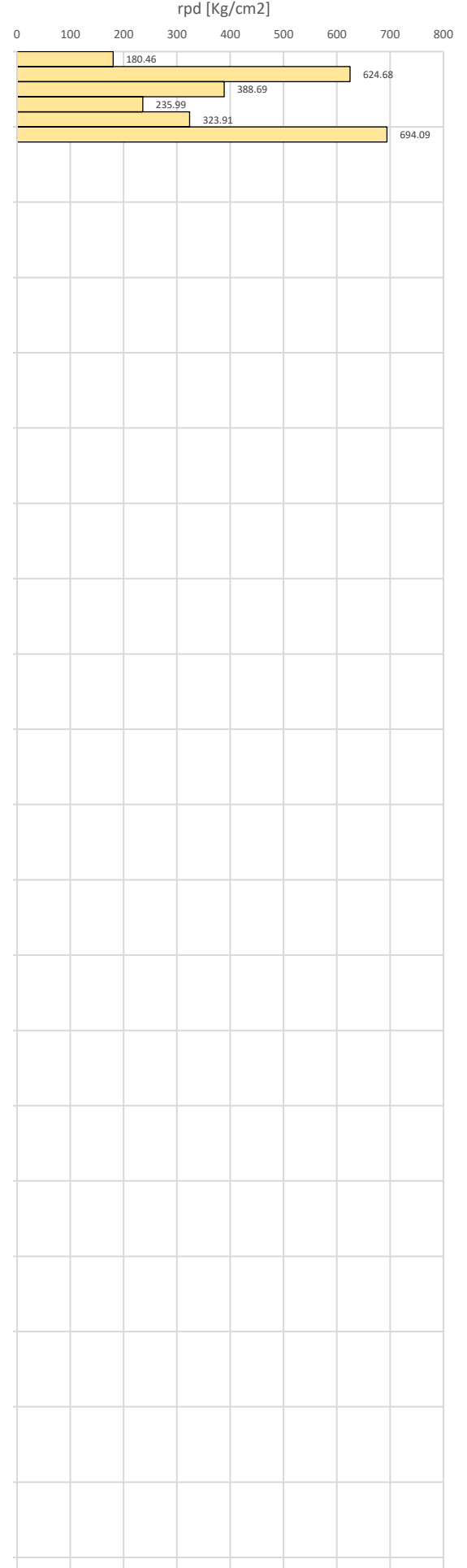
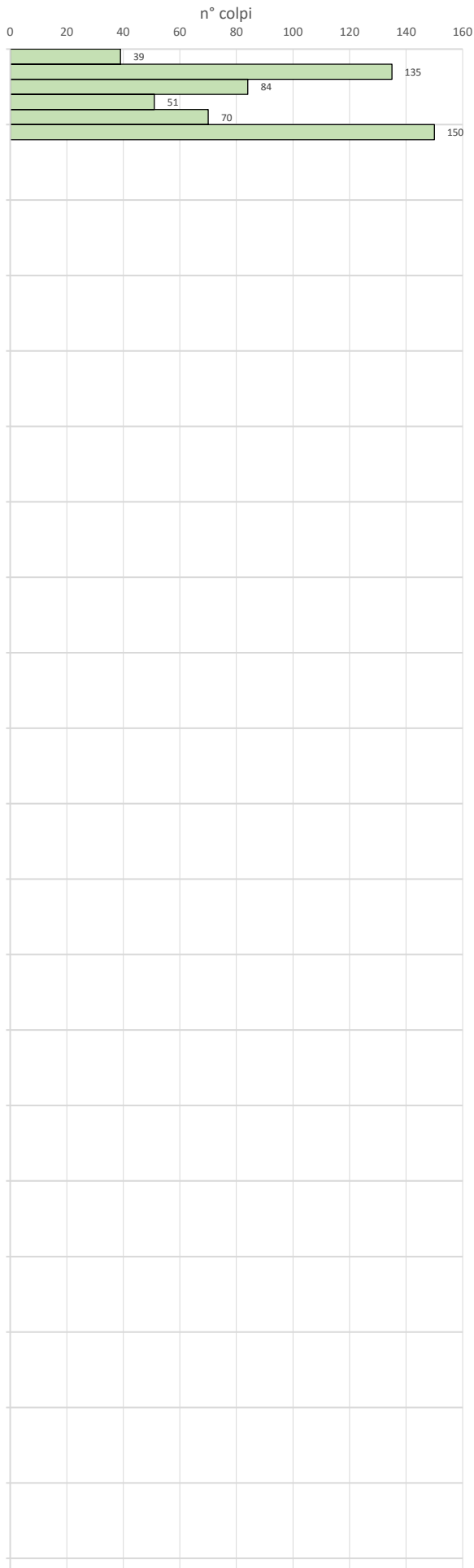
A = area della punta (10 cm²).

Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	25/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM1	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO

Dott. Alberto Caprara

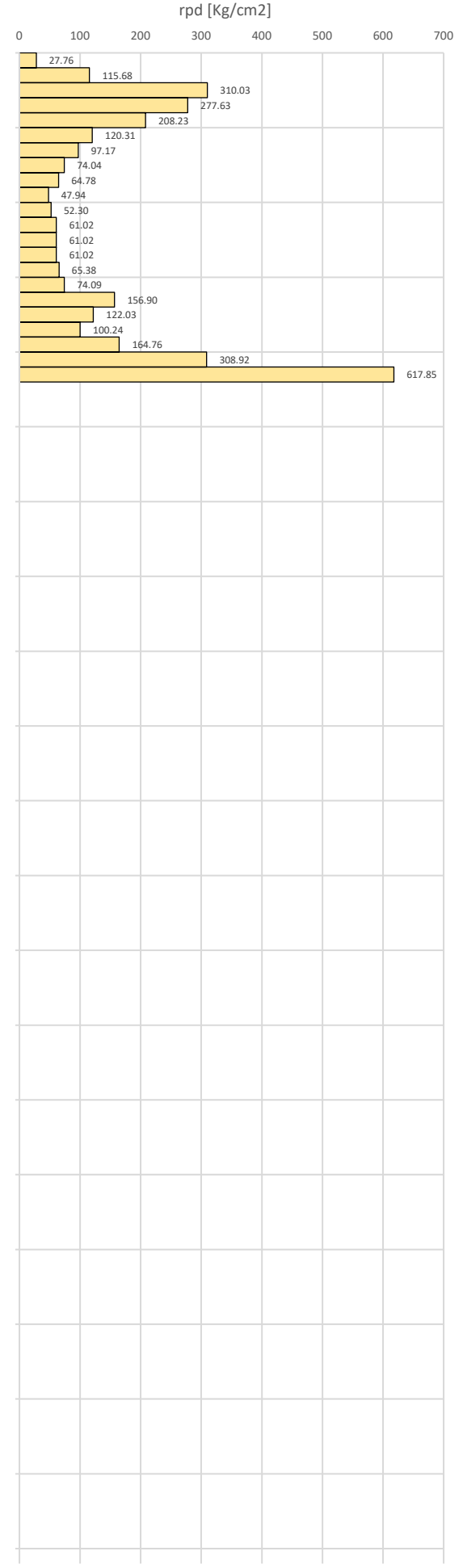
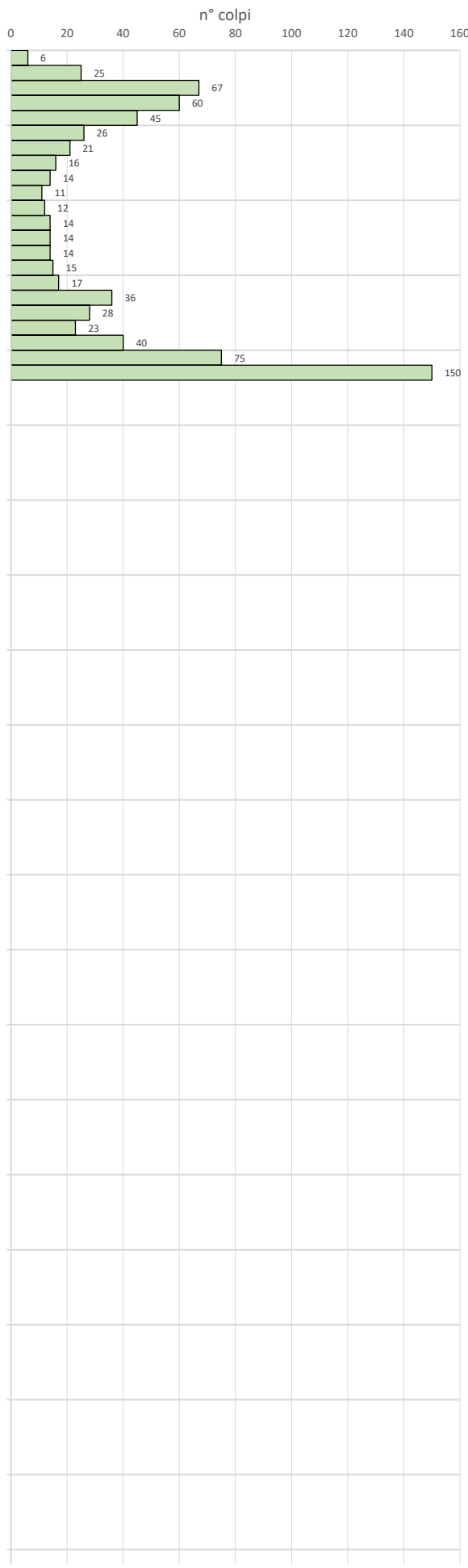
m	n° colpi	rpd [Kg/cm ²]
0.1	39	180.46
0.2	135	624.68
0.3	84	388.69
0.4	51	235.99
0.5	70	323.91
0.6	150	694.09
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	25/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM2	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
Dott. Alberto Caprara

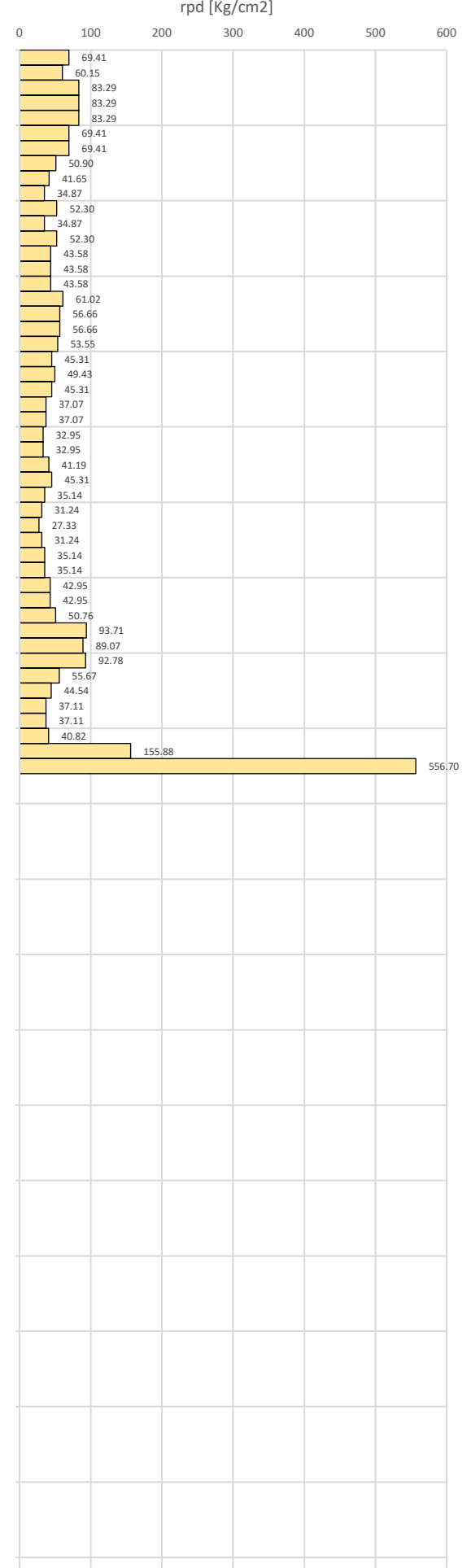
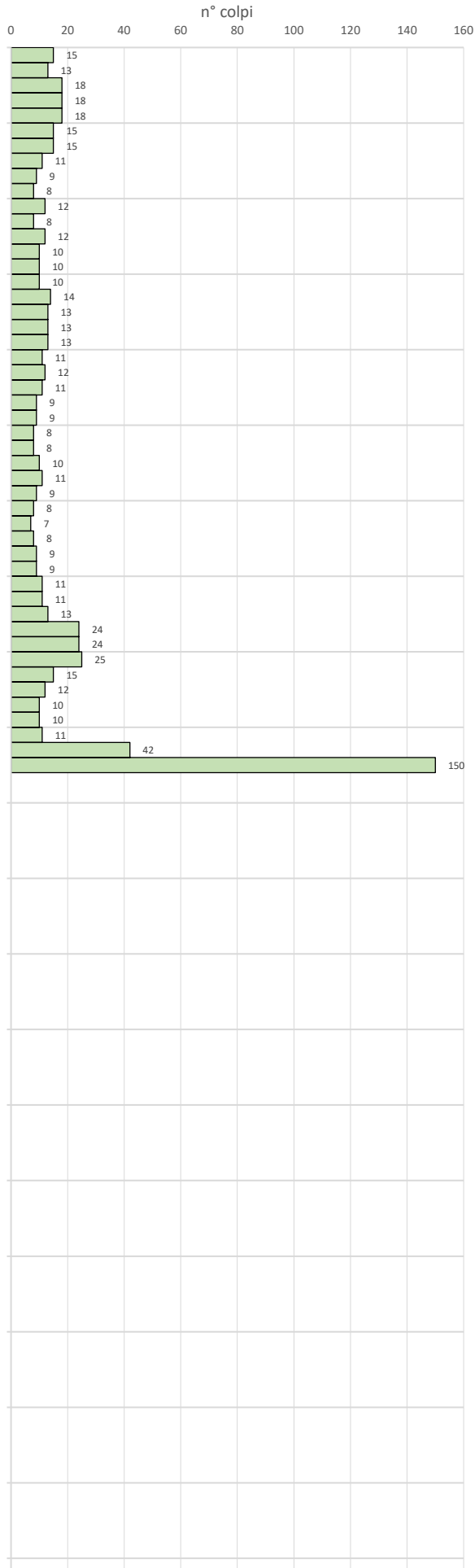
m	n° colpi	rpd [Kg/cm ²]
0.1	6	27.76
0.2	25	115.68
0.3	67	310.03
0.4	60	277.63
0.5	45	208.23
0.6	26	120.31
0.7	21	97.17
0.8	16	74.04
0.9	14	64.78
1.0	11	47.94
1.1	12	52.30
1.2	14	61.02
1.3	14	61.02
1.4	14	61.02
1.5	15	65.38
1.6	17	74.09
1.7	36	156.90
1.8	28	122.03
1.9	23	100.24
2.0	40	164.76
2.1	75	308.92
2.2	150	617.85
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	20/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM3	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
Dott. Alberto Caprara

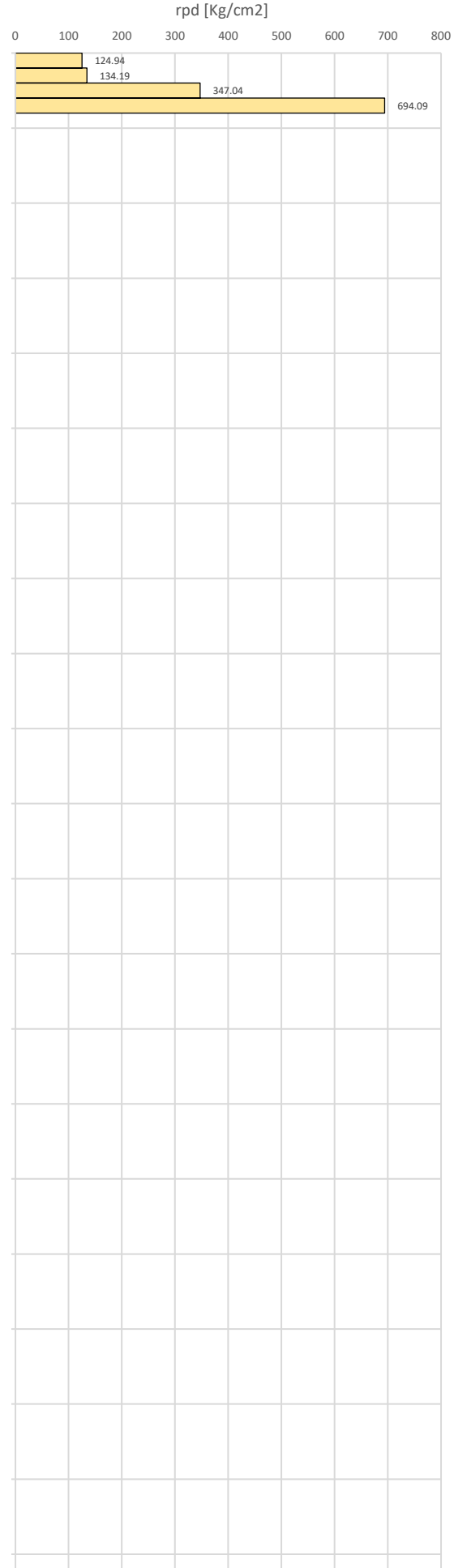
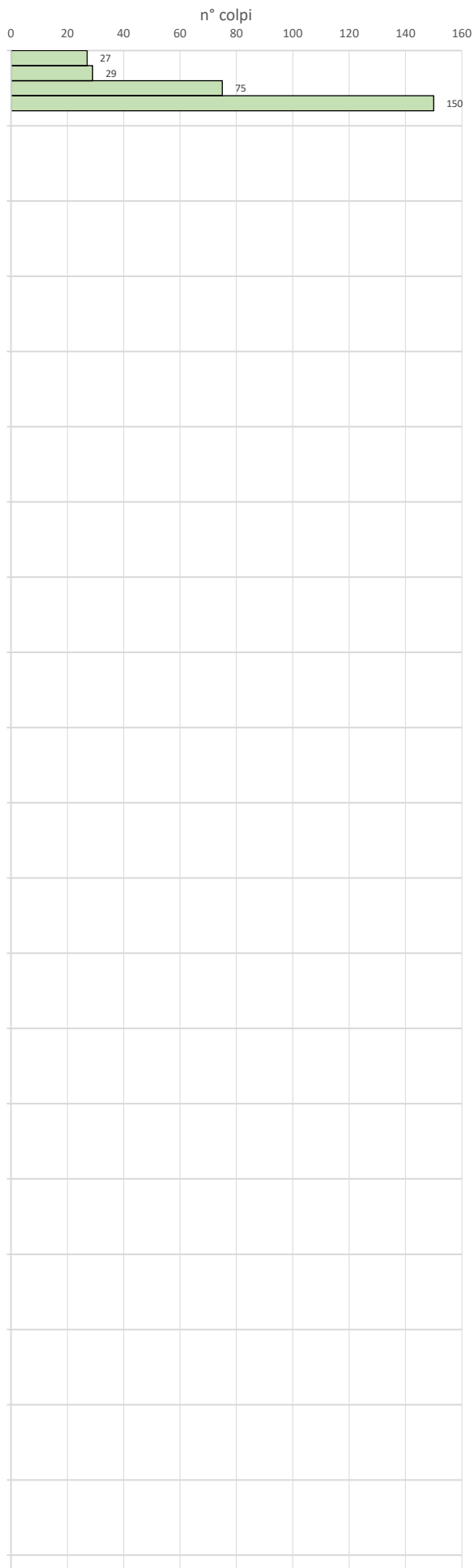
m	n° colpi	rpdc [Kg/cm ²]
0.1	15	69.41
0.2	13	60.15
0.3	18	83.29
0.4	18	83.29
0.5	18	83.29
0.6	15	69.41
0.7	15	69.41
0.8	11	50.90
0.9	9	41.65
1.0	8	34.87
1.1	12	52.30
1.2	8	34.87
1.3	12	52.30
1.4	10	43.58
1.5	10	43.58
1.6	10	43.58
1.7	14	61.02
1.8	13	56.66
1.9	13	56.66
2.0	13	53.55
2.1	11	45.31
2.2	12	49.43
2.3	11	45.31
2.4	9	37.07
2.5	9	37.07
2.6	8	32.95
2.7	8	32.95
2.8	10	41.19
2.9	11	45.31
3.0	9	35.14
3.1	8	31.24
3.2	7	27.33
3.3	8	31.24
3.4	9	35.14
3.5	9	35.14
3.6	11	42.95
3.7	11	42.95
3.8	13	50.76
3.9	24	93.71
4.0	24	89.07
4.1	25	92.78
4.2	15	55.67
4.3	12	44.54
4.4	10	37.11
4.5	10	37.11
4.6	11	40.82
4.7	42	155.88
4.8	150	556.70
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	20/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM4	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm ²]
0.1	27	124.94
0.2	29	134.19
0.3	75	347.04
0.4	150	694.09
0.5		
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		

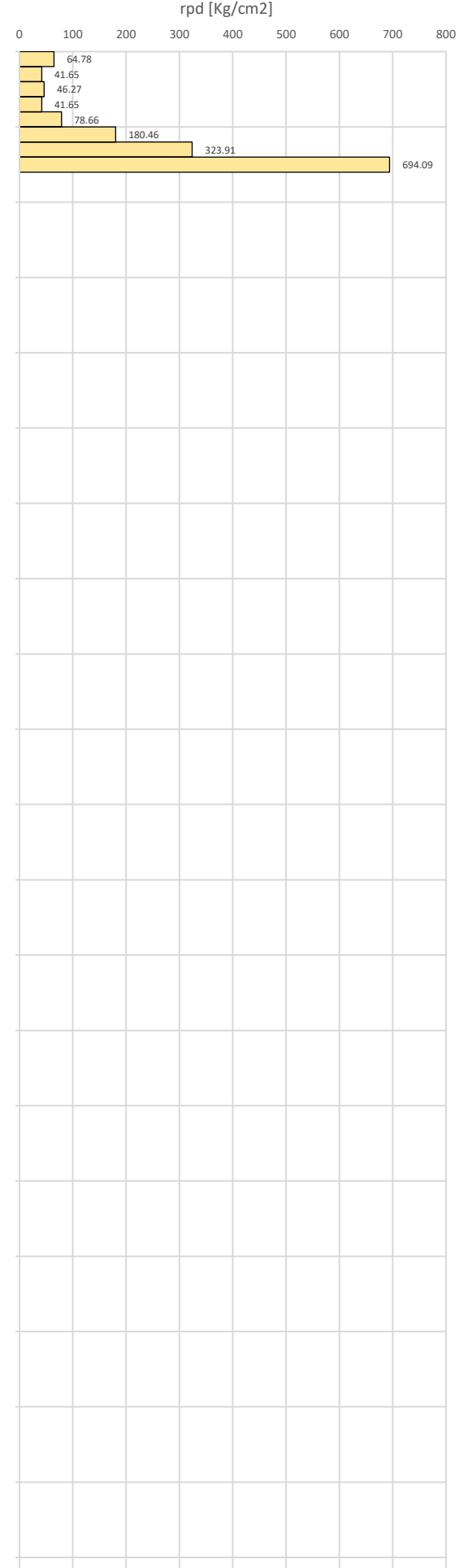
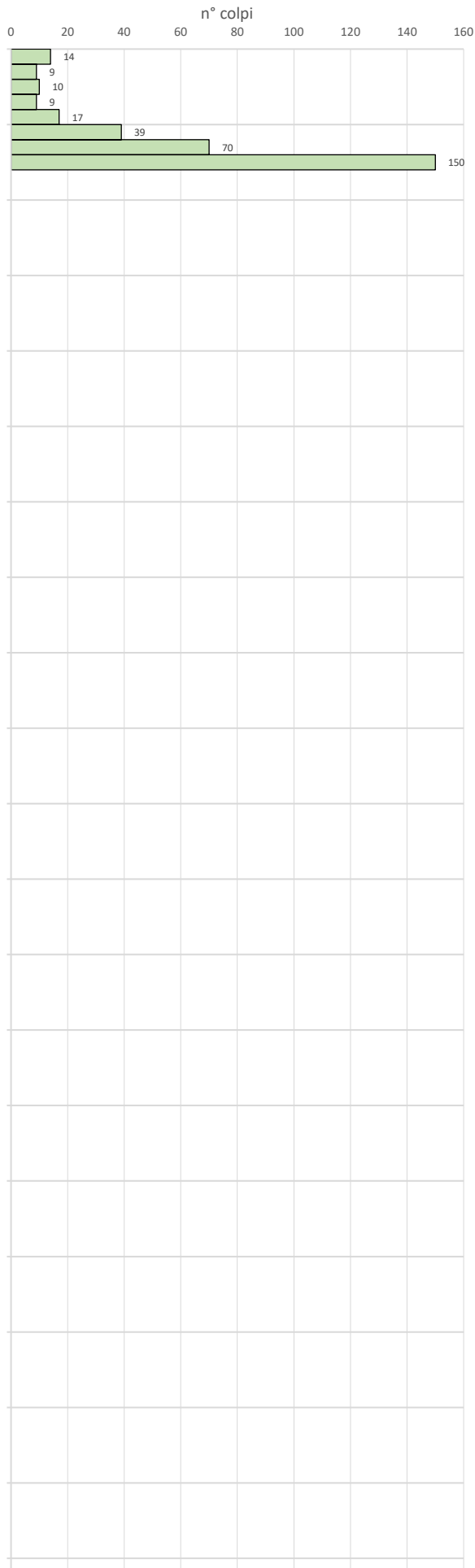


Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	20/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM5	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO

Dott. Alberto Caprara

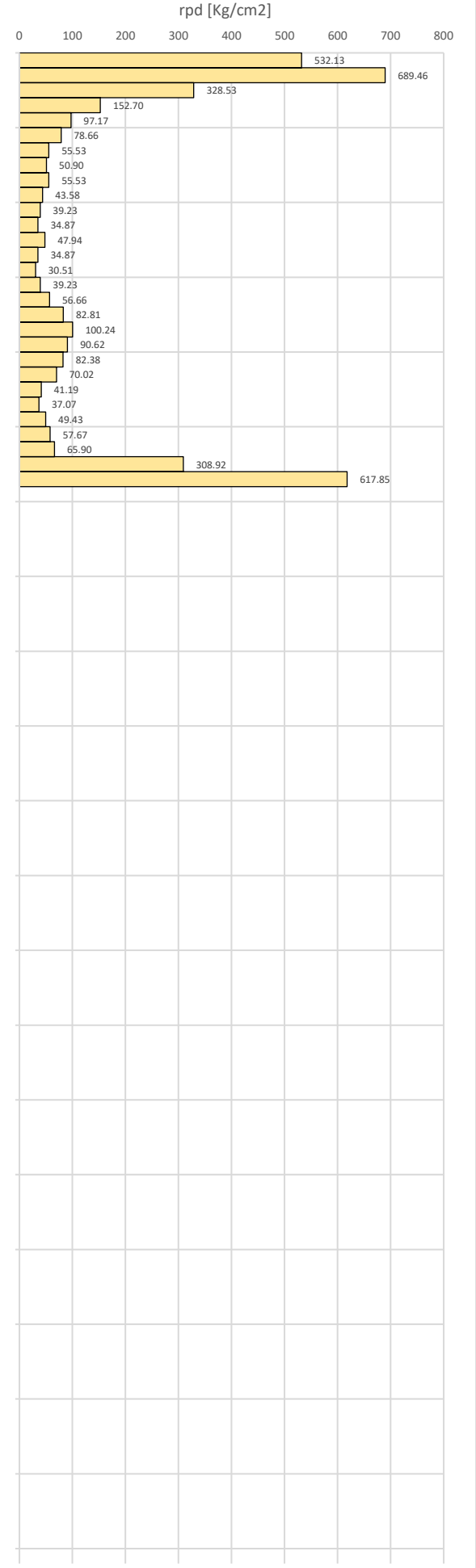
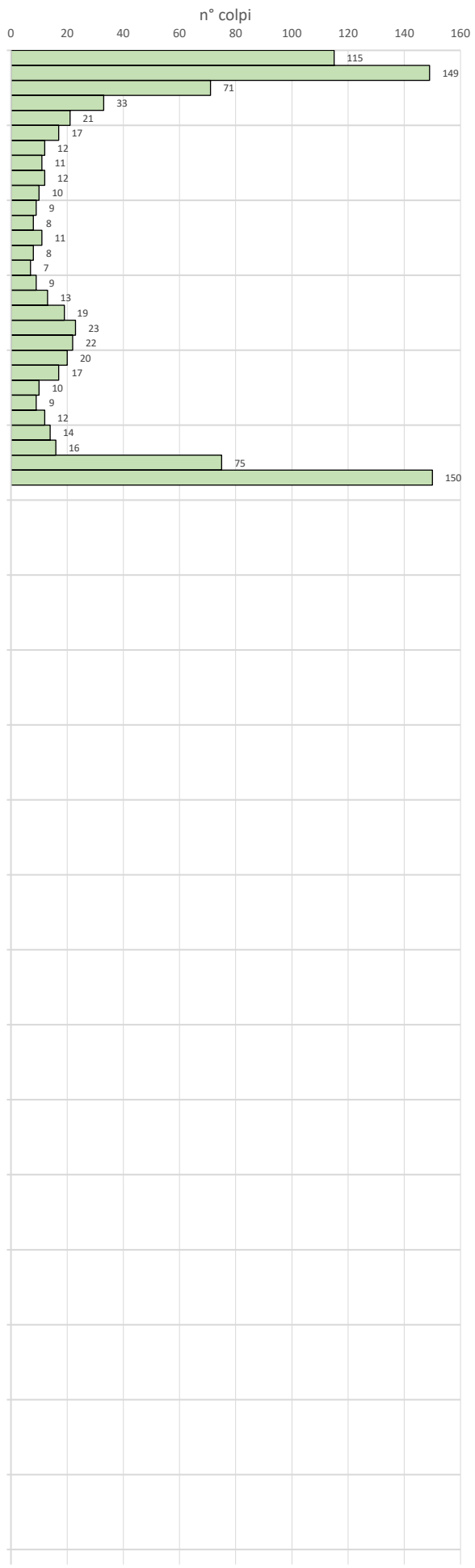
m	n° colpi	rpdc [Kg/cm ²]
0.1	14	64.78
0.2	9	41.65
0.3	10	46.27
0.4	9	41.65
0.5	17	78.66
0.6	39	180.46
0.7	70	323.91
0.8	150	694.09
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	20/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM6	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
 Dott. Alberto Caprara

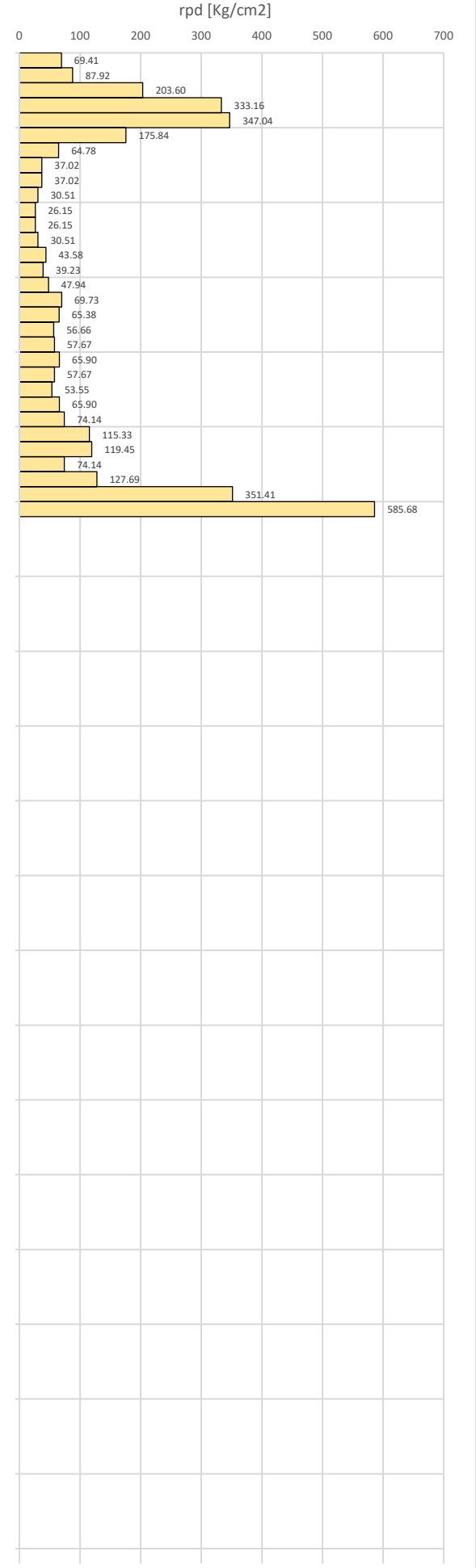
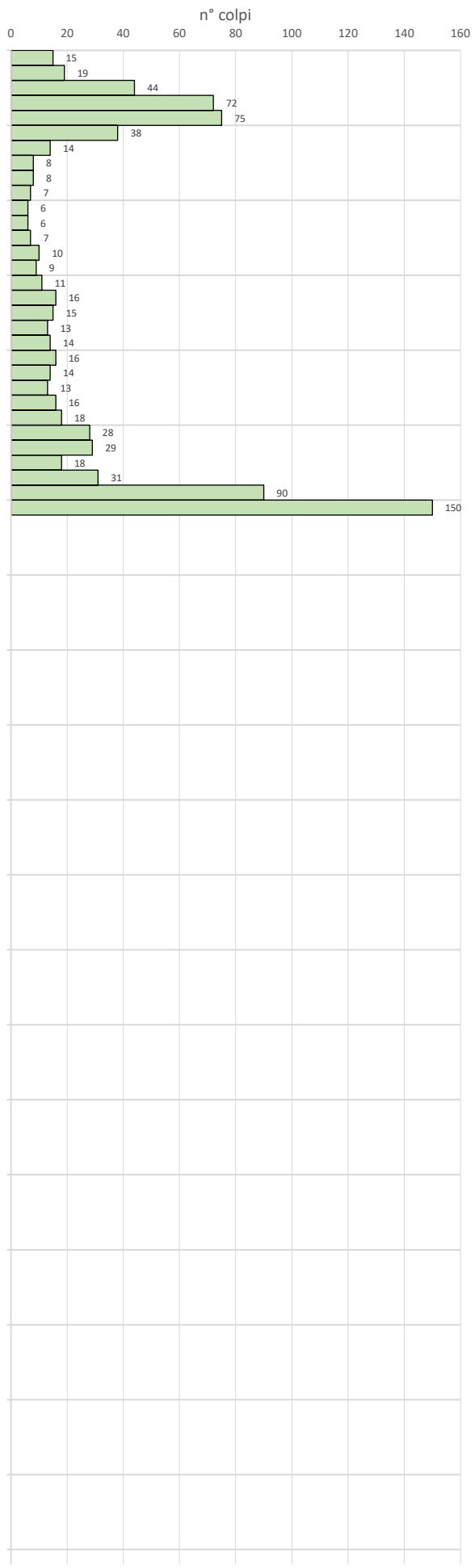
m	n° colpi	rpdc [Kg/cm ²]
0.1	115	532.13
0.2	149	689.46
0.3	71	328.53
0.4	33	152.70
0.5	21	97.17
0.6	17	78.66
0.7	12	55.53
0.8	11	50.90
0.9	12	55.53
1.0	10	43.58
1.1	9	39.23
1.2	8	34.87
1.3	11	47.94
1.4	8	34.87
1.5	7	30.51
1.6	9	39.23
1.7	13	56.66
1.8	19	82.81
1.9	23	100.24
2.0	22	90.62
2.1	20	82.38
2.2	17	70.02
2.3	10	41.19
2.4	9	37.07
2.5	12	49.43
2.6	14	57.67
2.7	16	65.90
2.8	75	308.92
2.9	150	617.85
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	25/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM7	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
Dott. Alberto Caprara

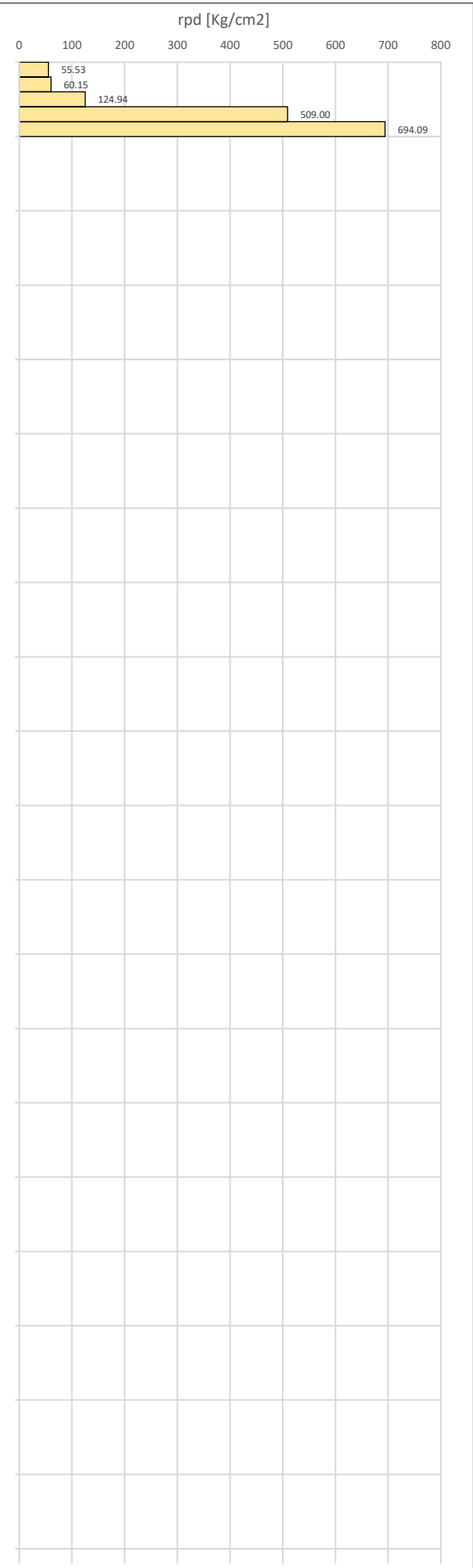
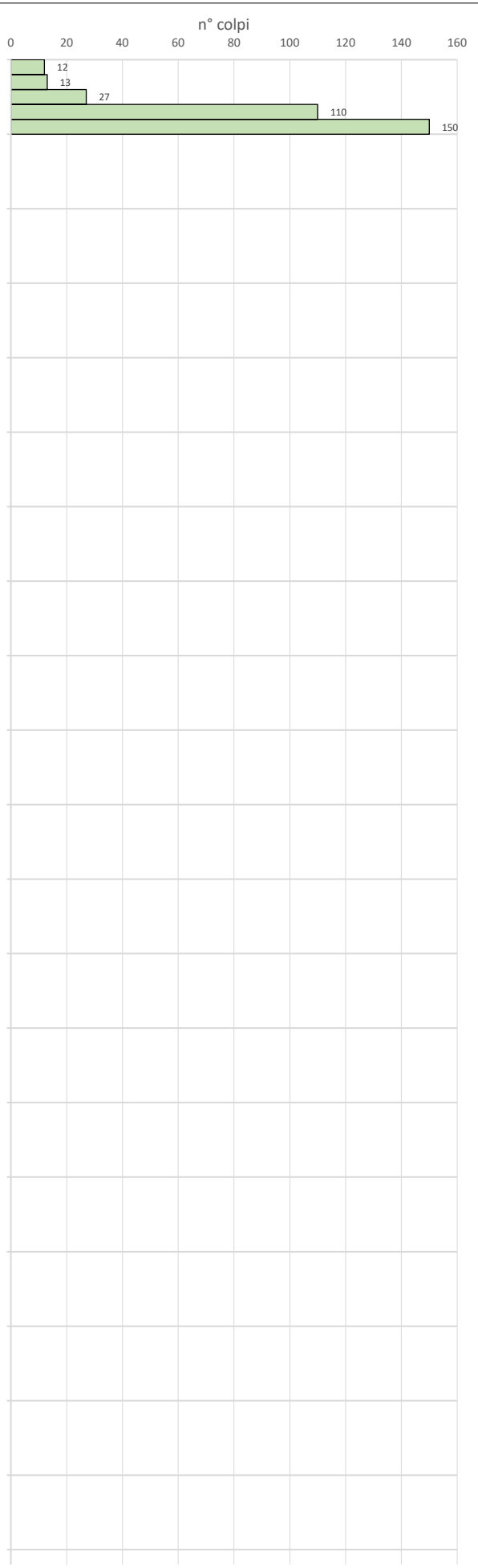
m	n° colpi	rpdc [Kg/cm ²]
0.1	15	69.41
0.2	19	87.92
0.3	44	203.60
0.4	72	333.16
0.5	75	347.04
0.6	38	175.84
0.7	14	64.78
0.8	8	37.02
0.9	8	37.02
1.0	7	30.51
1.1	6	26.15
1.2	6	26.15
1.3	7	30.51
1.4	10	43.58
1.5	9	39.23
1.6	11	47.94
1.7	16	69.73
1.8	15	65.38
1.9	13	56.66
2.0	14	57.67
2.1	16	65.90
2.2	14	57.67
2.3	13	53.55
2.4	16	65.90
2.5	18	74.14
2.6	28	115.33
2.7	29	119.45
2.8	18	74.14
2.9	31	127.69
3.0	90	351.41
3.1	150	585.68
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



Committente:	MATE Engineering Soc. Coop.va	peso massa battente M	30 kg
Località:	Quartiere Borgo Panigale e Barca	altezza di caduta H	0.2 m
Comune:	Bologna e Casalecchio (BO)	area base punta conica A	10 cm ²
Data:	20/06/2024	peso asta pa	2.4 kg
Prova:	DPM8	peso sistema caduta ps	6.5 kg

GEOLOGO
Dott. Alberto Caprara

m	n° colpi	rpd [Kg/cm ²]
0.1	12	55.53
0.2	13	60.15
0.3	27	124.94
0.4	110	509.00
0.5	150	694.09
0.6		
0.7		
0.8		
0.9		
1.0		
1.1		
1.2		
1.3		
1.4		
1.5		
1.6		
1.7		
1.8		
1.9		
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.4		
2.5		
2.6		
2.7		
2.8		
2.9		
3.0		
3.1		
3.2		
3.3		
3.4		
3.5		
3.6		
3.7		
3.8		
3.9		
4.0		
4.1		
4.2		
4.3		
4.4		
4.5		
4.6		
4.7		
4.8		
4.9		
5.0		
5.1		
5.2		
5.3		
5.4		
5.5		
5.6		
5.7		
5.8		
5.9		
6.0		
6.1		
6.2		
6.3		
6.4		
6.5		
6.6		
6.7		
6.8		
6.9		
7.0		
7.1		
7.2		
7.3		
7.4		
7.5		
7.6		
7.7		
7.8		
7.9		
8.0		
8.1		
8.2		
8.3		
8.4		
8.5		
8.6		
8.7		
8.8		
8.9		
9.0		
9.1		
9.2		
9.3		
9.4		
9.5		
9.6		
9.7		
9.8		
9.9		
10.0		



ALLEGATO C

RELAZIONE SULLE INDAGINI SISMICHE (Re.Mi e HVSR)

Strumento utilizzato per Re.Mi: Moho “SoilSpy” – sismografo digitale

Strumento utilizzato per HVSR: Moho “Tromino” – tromografo digitale

1 LE ONDE SISMICHE DI SUPERFICIE

Le onde sismiche di superficie sono generate in caso di eventi sismici e si generano da fenomeni di rifrazione, riflessione, fenomeni di guida d'onda e dispersione. Sono definite 'onde di superficie' in quanto si propagano prevalentemente lungo l'interfaccia tra due materiali a differenti velocità di propagazione delle onde sismiche (interfaccia terra-aria). In particolare la loro **ampiezza decade in modo esponenziale con la profondità**, interessando quindi solo un limitato spessore superficiale, la cui profondità dipende dalla lunghezza d'onda considerata.

La distinzione riconosciuta in quest'ambito è tra due differenti tipologie: onde di Rayleigh, onde di Love, che prendono il nome dagli scienziati che le hanno teorizzate. Queste si distinguono sulla base del tipo di movimento che imprimono alla particella del mezzo in cui si propagano.

Osservando un accelerogramma è possibile notare come le onde di superficie mostrino un'ampiezza nettamente maggiore rispetto alle onde di volume (Onde P ed S). Le tecniche classiche di elaborazione dei segnali sismici considerano come "disturbo" la porzione di sismogramma in cui sono presenti le onde di superficie, mentre le nuove metodologie di analisi del segnale permettono di analizzare ed interpretare questa parte di 'disturbo' tramite un modello matematico.

1.1 INDAGINE SISMICA NEL SITO IN ESAME

Nel sito in esame sono state utilizzate in abbinata due indagini sismiche per lo studio delle onde di superficie che si sono ampiamente affermate in ambito scientifico e professionale negli ultimi anni. In particolare è stata impiegata la **tecnica passiva Re.Mi** e la **tecnica passiva HVSR**. Di seguito saranno brevemente descritte le due tipologie di indagine, facendo riferimento a cenni delle rispettive teorie sismiche ed alle metodologie inerenti alle acquisizioni.

1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

1.2.1 Misura HVSR

Lo strumento utilizzato è un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione *Engineering*. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 µm), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione, il segnale digitalizzato viene gestito tramite un software dedicato (**Grilla**), il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i relativi grafici.

1.2.2 Indagine multicanale

Per la realizzazione della misura di **sismica passiva di tipo Re.Mi**, è stato utilizzato lo stendimento "*SoilSpy*" dotato di 25 canali in cui il segnale è digitalizzato in corrispondenza dei singoli geofoni anziché alla fine dell'*array*, consentendo un utilizzo ed una messa in campo dello stendimento più semplici, incrementando la qualità del dato raccolto (sono ridotti al massimo i problemi di interferenze nel segnale elettrico). A ciascun canale può essere collegato un geofono (verticale o orizzontale) con frequenza propria di 4,5 Hz, ancorato al suolo tramite un puntale o una placca per i terreni sconnessi o rigidi. I segnali vengono registrati direttamente su pc tramite il *software* dedicato **Rosina**, che permette di intervenire per la correzione e verifica delle singole tracce. Gli accelerogrammi registrati vengono poi elaborati con

Grilla, che permette l'inversione della curva di dispersione abbinando la misura HVSR al modello. In particolare le misure sono state abbinare nel seguente modo:

- Re.Mi.1 + Tr1

2 REFRACTION MICROTREMOR (RE.MI.)

Il metodo Re.Mi. è un metodo sismico che studia le onde di superficie utilizzando il rumore ambientale come sorgente. Tale tecnica permette di ottenere una inversione del modello fisico del terreno fino a ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio (S) del sito. Tale metodo consiste nell'analisi delle onde di superficie *Rayleigh*, registrate da una serie di geofoni posizionati a formare uno stendimento. A differenza di tutte le altre tecniche di indagine sismica, i metodi basati sull'analisi delle onde di superficie di *Rayleigh* non risultano limitati dalle inversioni di velocità; infatti la loro propagazione è funzione innanzitutto delle onde S e solo in parte legata alla Vp ed alla densità del mezzo, risultando così un ottimo strumento per la caratterizzazione sismica del sito tramite la ricostruzione del profilo di Vs, come previsto dalla vigente normativa (NTC'18).

L'utilizzo della tecnica Re.Mi. risulta un ottimo compromesso negli ambienti urbani caratterizzati da intenso rumore sismico, che per le altre tecniche sismiche classiche risulta un disturbo tale da poter compromettere la buona riuscita della prova.

2.1 METODOLOGIA DI MISURA

Lo strumento *SoilSpy*, costituito da un cavo dotato di 25 moduli a cui collegare altrettanti geofoni, permette di realizzare stendimenti sismici tradizionali di una lunghezza massima di 125 m (25 x 5 m di interdistanza), con ogni configurazione spaziale possibile.

In particolare nel sito si è predisposto uno stendimento dotato di 8 geofoni con interdistanza di 3 m (totale lunghezza stendimento = 24 m). Il software di acquisizione dei dati (**Rosina**) permette di realizzare una registrazione della lunghezza desiderata, inseguito interpretata con il software proprietario Grilla.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva dei principali parametri relativi all'analisi della misura.

Re.Mi.1	
Inizio registrazione	12/07/2024 11:56:56
Fine registrazione	12/07/2024 12:01:56
Lunghezza della traccia	5'00"
Frequenza di campionamento	1024 Hz
Lunghezza stendimento	36 m
N° geofoni	11

Tabella 1: descrizione tecnica della misura.

Di seguito sono riportati i segnali sismici registrati.

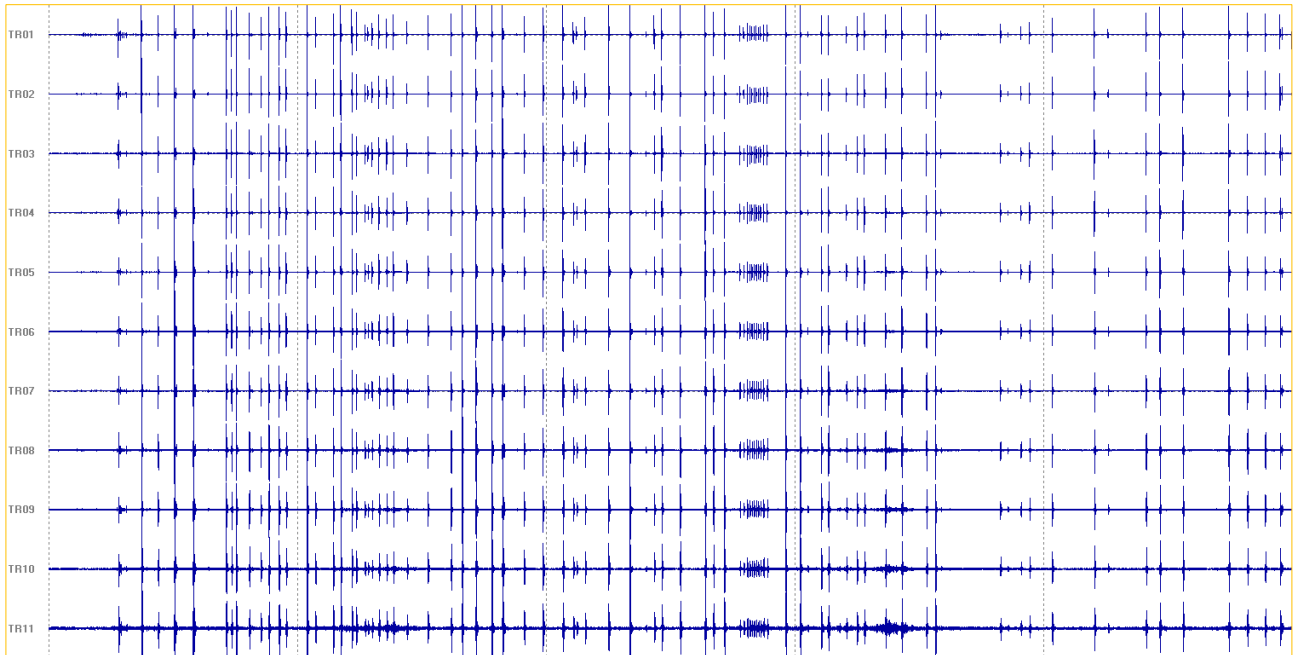


Figura 1: registrazione delle tracce dei geofoni.

La curva di dispersione fornisce, per mezzo di una scala cromatica, l'intensità dell'energia delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (f – asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate).

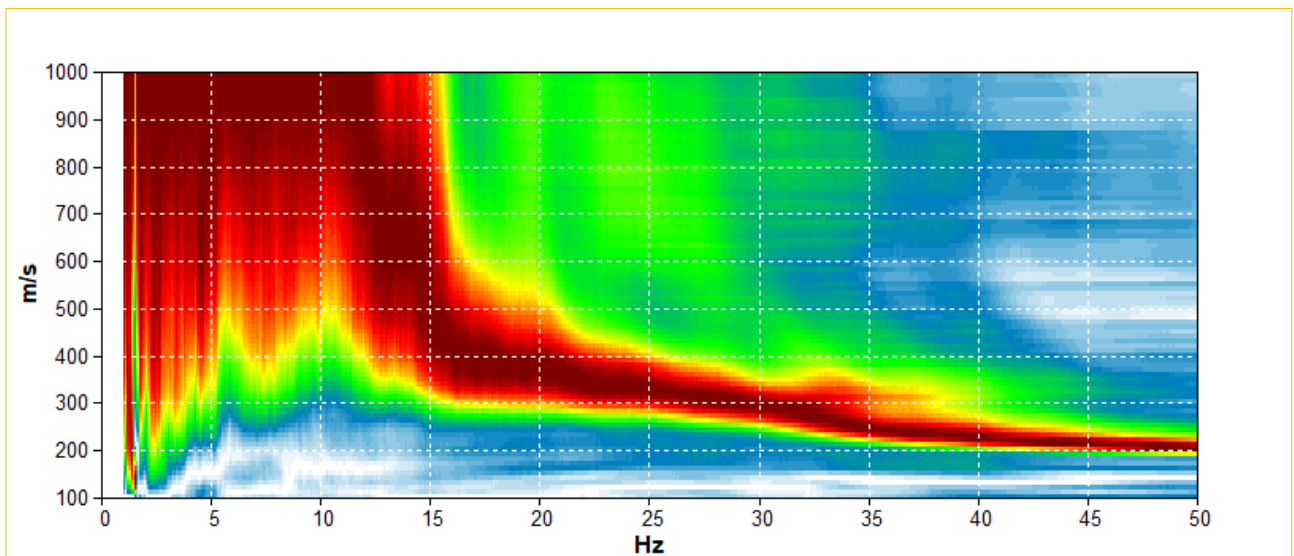


Figura 2: curva di dispersione del sito.

3 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR)

La sismica tomografica è una tecnica passiva che studia le onde a bassa frequenza e di bassa entità del terreno (microtremori) tramite misure puntuali sul suolo.

Le vibrazioni sismiche ambientali (microtremore) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di $10^{-4} \div 10^{-2}$ mm (Okada, 2003). L'origine del rumore sismico è riconducibile ad esempio alle perturbazioni atmosferiche sugli oceani che si propagano come onde superficiali sui continenti, mentre le sorgenti dei microtremori sono le attività antropiche e si propagano come onde superficiali di Rayleigh. I metodi che si basano sull'acquisizione e l'elaborazione

di tale “rumore” si dicono ‘passivi’ in quanto le vibrazioni non risultano quindi localizzate e fornite *ad hoc*, come per le tecniche di simica attiva (con le apposite energizzazioni).

3.1 METODOLOGIA DI MISURA – Tr1

È stata effettuata inoltre una misura di sismica passiva; lo strumento è stato posizionato al di sopra di una superficie resa idonea dall’operatore, al fine di permettere il perfetto accoppiamento tra lo strumento ed il terreno.

Tr1	
Inizio registrazione	12/07/2024 10:57:22
Fine registrazione	12/07/2024 11:17:22
Lunghezza della traccia	20'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	12 sec
Percentuale di traccia analizzata	92%
Lisciamento	10%

Tabella 2: descrizione tecnica della misura.

La misura è stata elaborata in studio mediante il *software* dedicato **Grilla** fornito dalla Micromed.

L’elaborazione del segnale ha previsto i seguenti passaggi:

- analisi delle tre componenti del segnale con suddivisione in finestre opportunamente dimensionate (*Windows Size*);
- depurazione del segnale da rumori anomali (*Detrend*);
- calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra;
- lisciamento dello spettro di ogni finestra (*Smoothing*);
- calcolo della trasformata di *Fourier* (FFT) per ciascuna finestra;
- calcolo del rapporto spettrale HVSR per ogni frequenza e per ogni finestra.

Per procedere con l’interpretazione della misura tomografica eseguita, è stata effettuata una selezione delle finestre da utilizzare per l’analisi (serie temporale H/V), in quanto alcune di esse presentavano disturbi che interferivano e rendevano poco chiari i risultati grafici.

Il grafico “DIREZIONALITÀ H/V” mostra con una scala cromatica l’intensità dei picchi alle diverse frequenze (ordinate), fornendo una distribuzione spaziale di 180° nell’intorno del punto di misura partendo dal nord (0°) dello strumento.

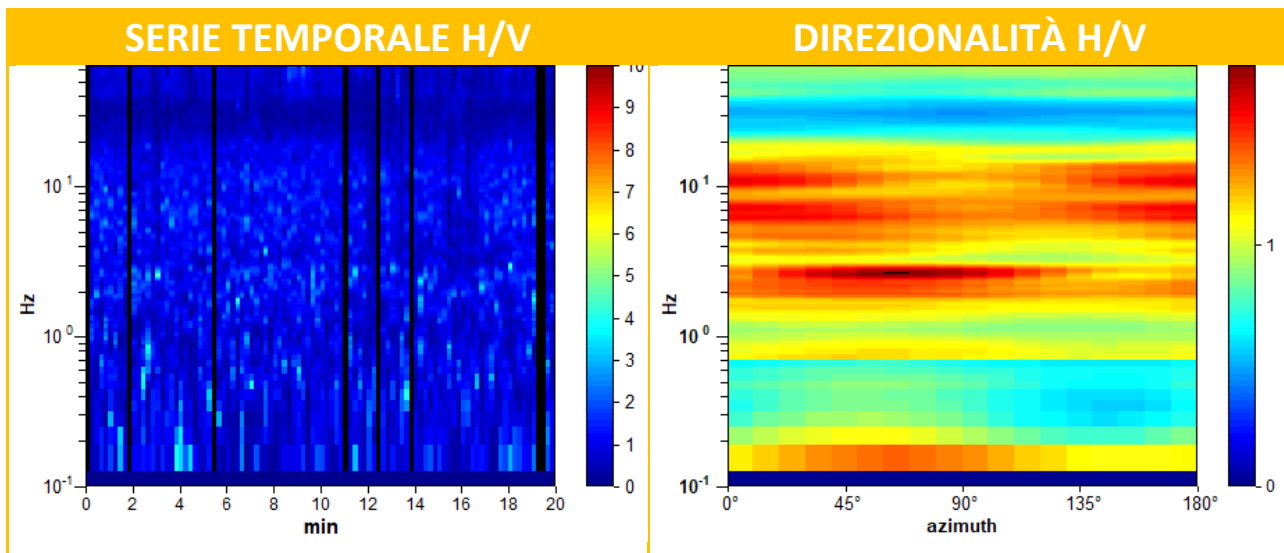


Figura 3: Grafico della serie temporale H/V (sinistra) e grafico della direzionalità H/V (destra) relativi alla misura Tr1.

Osservando gli spettri delle singole componenti è possibile notare, dall’andamento uniforme delle tre linee (fig. 3), come la misura sia stata eseguita correttamente, effettuando un buon accoppiamento tra strumento e terreno.

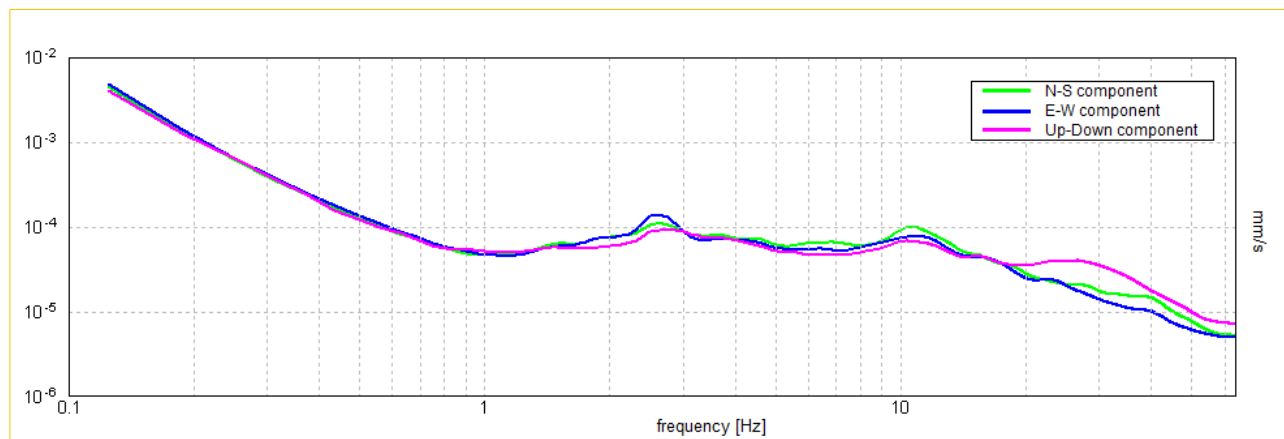


Figura 4: Grafico delle componenti ortogonali della misura Tr1.

Di seguito si riporta il grafico HVSR derivante dall’elaborazione della misura.

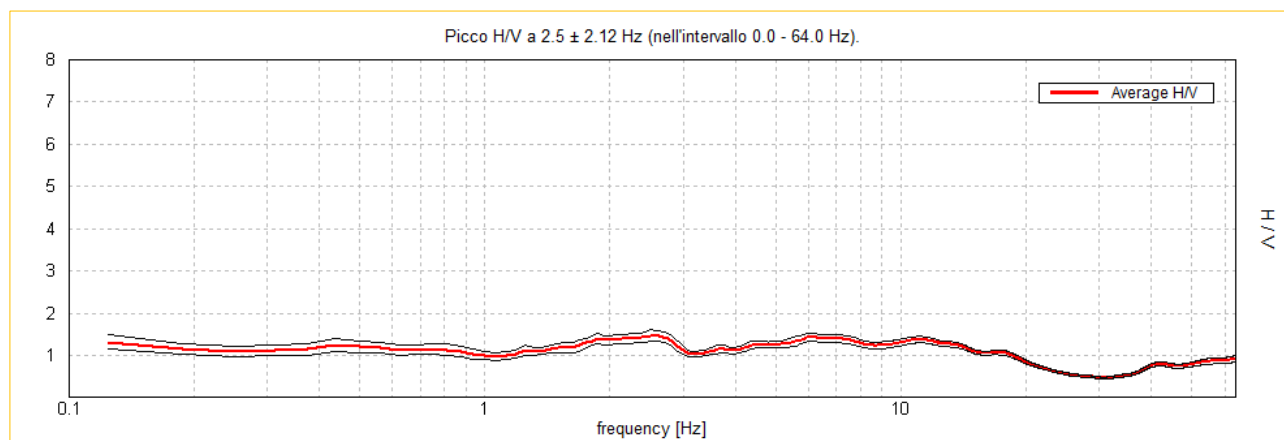


Figura 5: Diagramma HVSR relativo alla misura Tr1.

4 INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE

4.1 RE.MI 1 E TR1

Il *software* utilizzato per l'analisi delle tracce permette l'elaborazione sincrona dei due tipi di misura. È possibile quindi ricostruire il profilo sismico delle onde S utilizzando i dati di entrambe le indagini.

L'**interpretazione** della curva di dispersione consiste nell'ottenere una **curva sintetica** di dispersione che riesca a riprodurre al meglio quella registrata, facendo attenzione ad osservare i cambi di pendenza. Il grafico H/V si elabora generando una **curva sintetica** in grado di riprodurre al meglio la curva reale ed in particolare i punti di massimo locale significativi della misura registrata.

Di seguito si riportano i grafici della curva di dispersione ottenuta dalla tecnica Re.Mi. e la curva H/V ottenuta dall'analisi della registrazione dei microtremori, ai quali è applicata la curva sintetica corrispondente al profilo sismico ottenuto dall'interpretazione delle tracce. Inoltre si riporta il profilo sismico in forma tabellare e grafica ottenuto dall'interpretazione combinata delle due indagini.

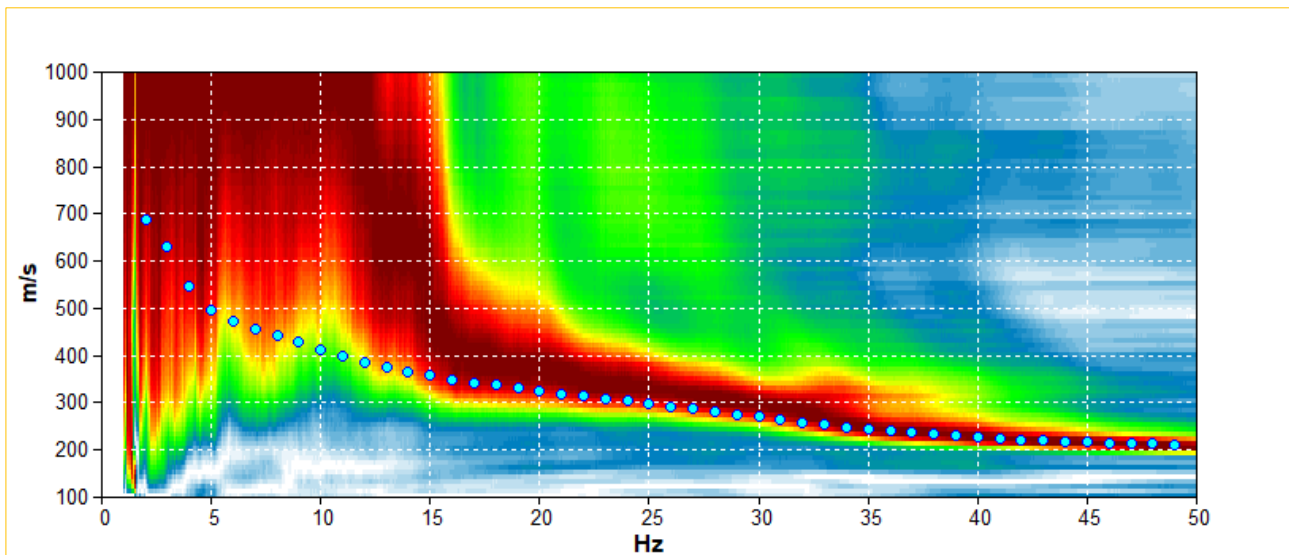


Figura 6: Grafico della curva di dispersione con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

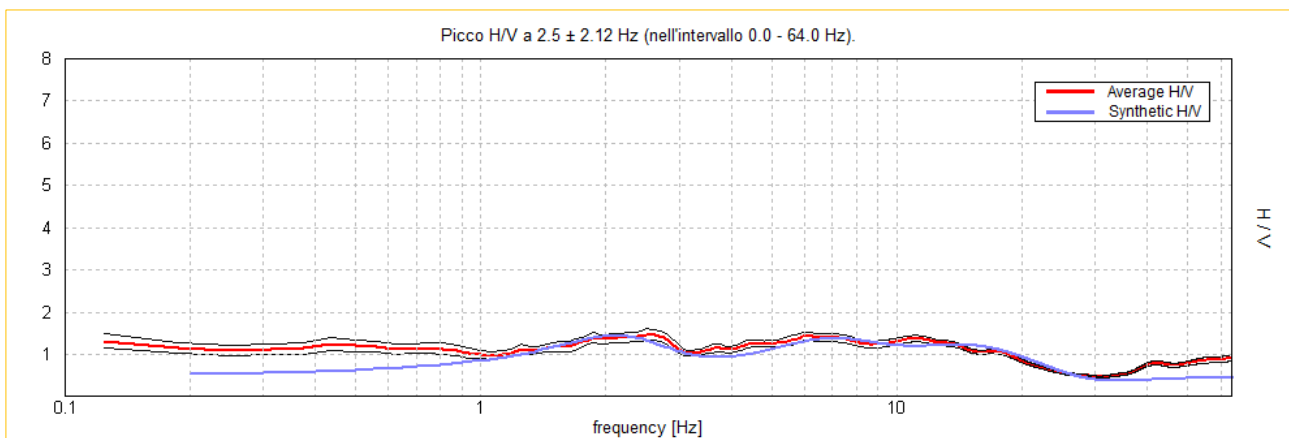


Figura 7: Grafico della curva H/V con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

Sismostrato	Profondità dello strato [m]	Spessore dello strato [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1	2.80	2.80	210	0.46
2	7.80	5.00	340	0.40
3	17.80	10.00	420	0.39
4	62.80	45.00	540	0.34
5	inf.	inf.	820	0.31

Tabella 3: profilo sismostratigrafico del modello sismico.

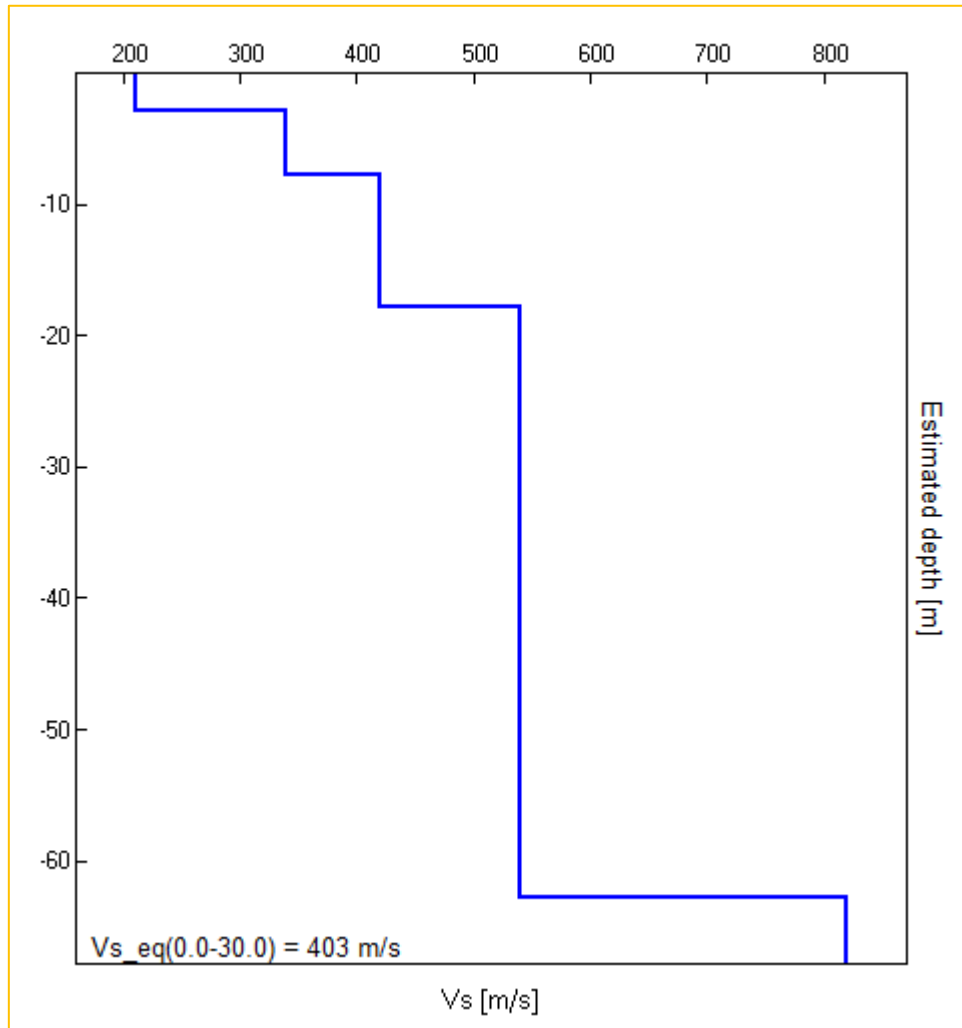


Figura 8: profilo sismostratigrafico del modello sismico.

