



PROVINCIA
DI REGGIO EMILIA



COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO-ECONOMICA PER L'INTERVENTO DENOMINATO
"INFRASTRUTTURA STRADALE DI SUD-OVEST REALIZZAZIONE DI COLLEGAMENTO TRA
LA SP28 E LA SP12 IN COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA (RE)

CUP. C21B24000090005 - CIG. B0FC65D1BA

PROVINCIA DI REGGIO EMILIA: Servizio Infrastrutture, Mobilità Sostenibile e Patrimonio

Il Dirigente: Dott. Ing. Valerio Bussei

Il Responsabile Unico di Progetto: Arch. Francesca Guatteri



PROGETTISTA

Gasparini Associati

studio di ingegneria e architettura

di Piero A. Gasparini e Ilaria Gasparini

Via E. Petrolini n.14/A 42122 REGGIO EMILIA

TEL: 0522/557508 FAX: 0522/557556

E-MAIL: edilizia@gaspariniassociati.it

P.IVA: 02532680358

Equipe:

Ing. Piero A. Gasparini

Arch. Ilaria Gasparini

Arch. Rossana Romano

Arch. Annachiara Gualtieri

Dott. Geol. Paolo Melli

TIMBRI



TITOLO

Relazione geologica e geotecnica

EMISSIONE

studio di fattibilità tecnico-economica

DATA

giugno 2024

SCALA

TAVOLA

R.02

REGIONE EMILIA ROMAGNA
COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA
Provincia di Reggio Emilia

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

**INFRASTRUTTURA STRADALE DI SUD-OVEST
DEL COMUNE DI MONTECCHIO EMILIA
Realizzazione di bretella di collegamento tra la SP 28 e
la SP 12 - Studio di fattibilità tecnico economica.**

Reggio Emilia, dicembre 2021

Dott. Geol. Paolo Melli



INDICE

Premessa	pag. n. 3
Cap. 1 - Ubicazione e Morfologia	pag. n. 4
Cap. 2 - Inquadramento Geomorfologico	pag. n. 4
Cap. 3 - Caratteristiche Idrogeologiche	pag. n. 7
Cap. 4 - Indagini Geognostiche	pag. n. 9
Cap. 5 - Prove Penetrometriche	pag. n. 9
Cap. 6 - Modellazione sismostratigrafica e valutazione degli effetti sismici di sito	pag. n. 53
Cap. 7 - Considerazioni finali	pag. n. 76

PREMESSA

Lo studio e le relative indagini sono stati eseguiti secondo quanto disposto dal D.M. 17/01/2018 e dal D.G.R. 630 del 29/04/2019.

Si sono confrontati i dati emersi con altri lavori da me svolti in zona e con studi ufficiali esistenti; in particolare con la Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli e con gli elaborati del P.S.C. del comune di Montecchio Emilia.

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite otto prove penetrometriche statiche e dinamiche con penetrometro statico/dinamico a punta meccanica.

Per la caratterizzazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica:

- Prospezione geofisica (**MASW**) e indagine in sismica passiva (**HVSR**).

Le prove sono ubicate nella planimetria allegata.

Per la presente relazione sono stati consultati elementi del PTCP 2010 e Variante 2019 di Reggio Emilia:

- Rischio sismico. Carta degli effetti locali;
- Rischio sismico. Carta degli effetti attesi;
- Rischio sismico. Carta dei Livelli di approfondimento.

Cap. 1 – UBICAZIONE E MORFOLOGIA

Il tracciato in progetto raccorda la strada provinciale 28, localmente via E. Curiel, tra il ponte Enza a ovest e l'abitato di Montecchio Emilia a est, con la strada provinciale 12.

Scende dalla rampa di accesso al ponte sull'Enza, a nord, costeggia il vecchio argine fino a C. Cavagliere, prosegue poi sino ad oltre C. Bertolini.

Continua verso sud su una strada privata esistente e si raccorda alla S.P. 12 immediatamente a sud di C. Lunga.

I terreni sono sub pianeggianti, adibiti ad uso agricolo e presentano pendenza verso nord – nord est; la risalita sull'argine alla S.P.28 sarà realizzata o tramite rilevato o travature sorrette da pilastri.

Le quote sono comprese tra 108,5 metri s.l.m. a sud e 95,5 metri s.l.m. a nord.

Cap. 2 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Secondo la Carta Geologica della Provincia di Parma e zone limitrofe l'area in oggetto insiste su alluvioni medio recenti confinanti ad est di un orlo di terrazzo, con depositi continentali wurmiani.

La Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli definisce i terreni oggetto di studio come appartenenti alla Successione neogenico – quaternaria del margine appenninico padano.

Affiorano in particolare terreni appartenenti alla Unità di Modena (**AES8a**): ghiaie e sabbie ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua.

Nella pianura ricopre resti romani del VI secolo dopo Cristo con potenza massima di 10 metri.

A est e in prossimità dell'intersezione con la S.P.12 in località C. Lunga sono presenti terreni appartenenti all'Unità di Niviano (**AES7a**).

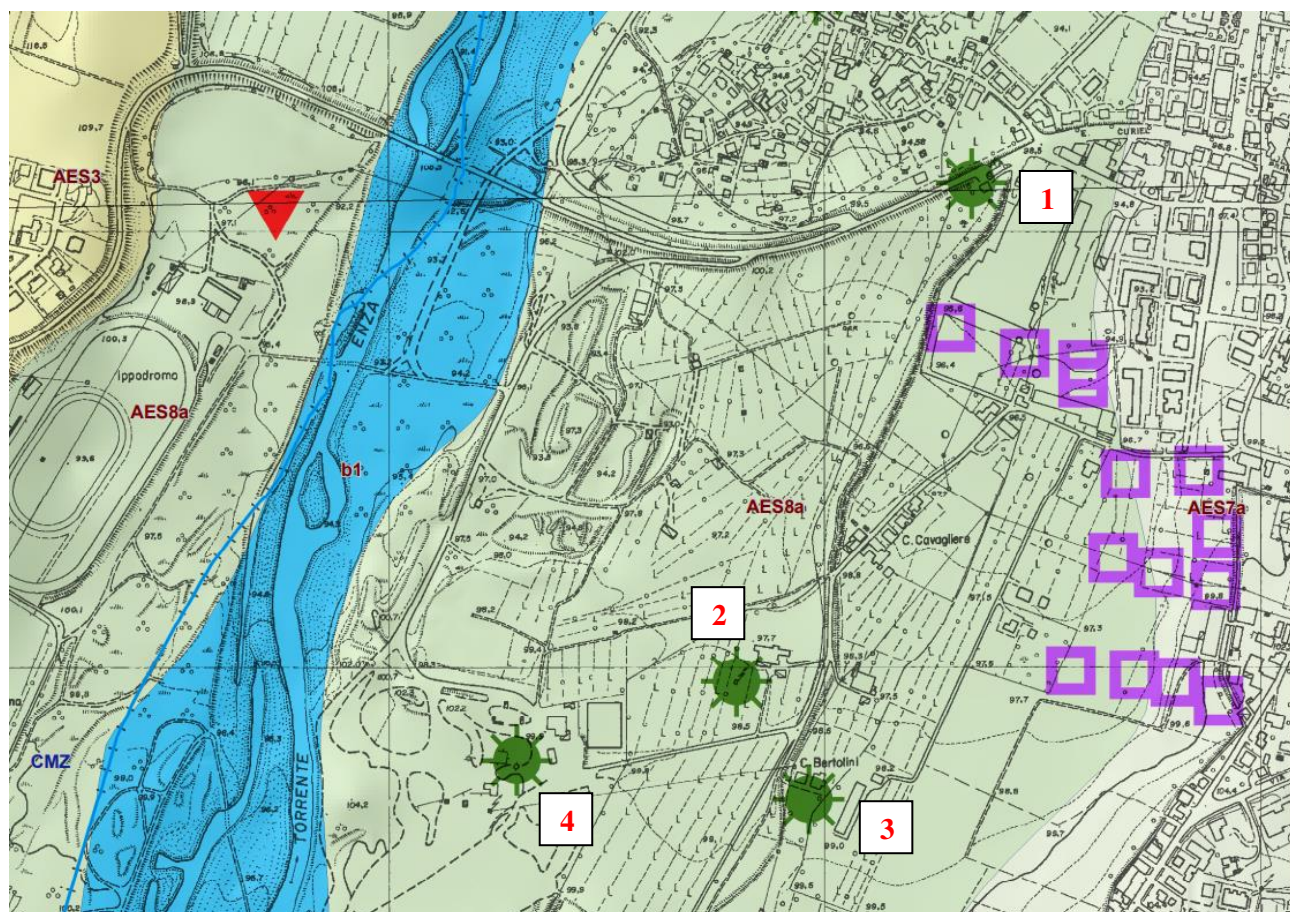
Si tratta di depositi continentali ghiaioso sabbiosi dei terrazzi intravallivi e di conoide dei fiumi principali, e limo-sabbiosi dei torrenti.

A ovest l'Enza e la fascia sponale sono costituiti da depositi alluvionali in evoluzione (**b1**).

Per la conoscenza dei livelli sottostanti è stata esaminata la stratigrafia dei pozzi presenti in zona, da cui risulta che i sedimenti quaternari sono costituiti da alternanze di ghiaie e terreni fini e che il substrato marino pliocenico è a circa 40 metri di profondità. Le prove penetrometriche hanno evidenziato che il tetto delle ghiaie è generalmente compreso, lungo il tracciato, tra 0,6 e 1,8 metri.

Le coperture sulle ghiaie sono generalmente date da argille prevalenti, argille limose e livelli sabbiosi più in profondità.

Estratto Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Settore nord



Griglia 10.000



Prove puntuali

● pozzo per acqua

■ sondaggio a distruzione

Coperture quaternarie (10K)

■ AES3 - Subsistema di Agazzano

■ AES7a - Unità di Niviano

■ AES8a - Unità di Modena

■ b1 - Deposito alluvionale in evoluzione

Limiti di unità geologiche (10K)

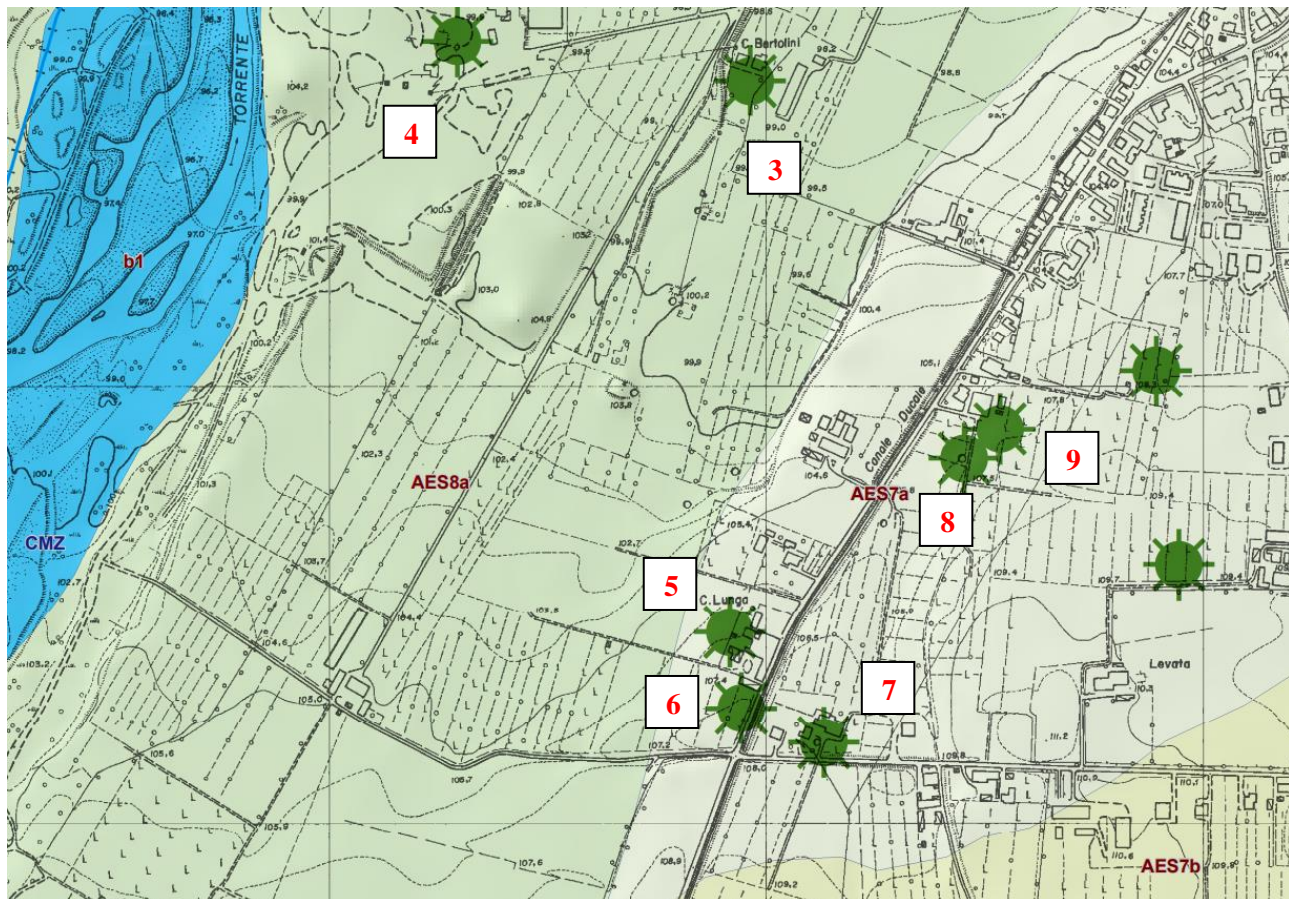
— limite di natura incerta

Unità geologiche (10K)

■ CMZ - Sistema di Costamezzana

1 Pozzi

Settore sud



Cap. 3 - CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

La zona in esame si trova nella fascia di terreni dell'alta pianura reggiana adiacente al fiume Enza.

A est del tracciato scorre il Canale Ducale.

La "Carta della Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento" relativa all'alta pianura reggiana - Unità idrogeologica conoide fiume Enza – indica che il tracciato in progetto è compreso circa tra le isopieze 104 m. a sud e 93 m.a nord.

Poiché le quote sono circa comprese tra 108 metri s.l.m. a sud e 96 metri s.l.m.a nord, la soggiacenza di falda risulterebbe essere compresa tra 4 e 3 metri dal p.c.

Dall'andamento delle isopieze in zona si deduce che la direzione di deflusso della falda è localmente verso N-NE.

Le prove penetrometriche (P) eseguite indicano che il tetto delle ghiaie, da nord a sud, è presente alle seguenti profondità:

- P1 -1,8 metri;
- P2 -1,6 metri;
- P3 -1,4 metri;
- P4 -1,2 metri;
- P5 -0,9 metri;
- P6 -0,6 metri;
- P7 -3,0 metri;
- P8 -0,6 metri.

Sono state esaminate le stratigrafie di 9 pozzi ubicati nell'Estratto della Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli e di seguito riportate:

- pozzo 1

da 0 a 0,6 m sedimenti fini;

da 0,6 a 5 m ghiaia.

- pozzo 2

da 0 a 0,7 m sedimenti fini;

da 0,7 a 4,6 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di argille ghiaie e sabbie fino a 33 metri.

- pozzo 3

da 0 a 1,5 m sedimenti fini;

da 1,5 a 4,5 m ghiaia.

- pozzo 4

da 0 a 0,6 m sedimenti fini;

da 0,6 a 5 m ghiaia.

- pozzo 5

da 0 a 0,5 m sedimenti fini;

da 0,5 a 13 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di ghiaie e argille fino a 37 metri.

- pozzo 6

da 0 a 1 m sedimenti fini;

da 1 a 11 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di ghiaie e sedimenti fini fino a 40 metri.

- pozzo 7

da 0 a 0,5 m sedimenti fini;

da 0,5 a 13 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di ghiaie e sedimenti fini fino a 46 metri.

- pozzo 8

da 0 a 0,5 m sedimenti fini;

da 0,5 a 3 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di argille sabbie e ghiaie fino a 29 metri.

- pozzo 9

da 0 a 2 m sedimenti fini;

2 a 6,5 m ghiaia.

Seguono alternanze di livelli di argille sabbie e ghiaie fino a 36 metri.

Lo spessore del primo strato di ghiaie, desunto dalle stratigrafie dei pozzi, è compreso tra 3 e 4,5 nel settore nord del tracciato e tra 10 e 12,5 presso Cà Lunga.

La falda freatica superficiale è impostata in questo spessore di ghiaia, risente fortemente delle precipitazioni e del livello di acqua nell'Enza; l'escursione stagionale è notevole.

Nel corso delle prove, nel maggio 2021, il livello di falda è stato misurato a 3 metri sotto il piano di campagna (prova 7).

Cap. 4 - INDAGINI GEOGNOSTICHE

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite otto prove penetrometriche statiche e dinamiche con penetrometro statico/dinamico a punta meccanica.

Per la caratterizzazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica:

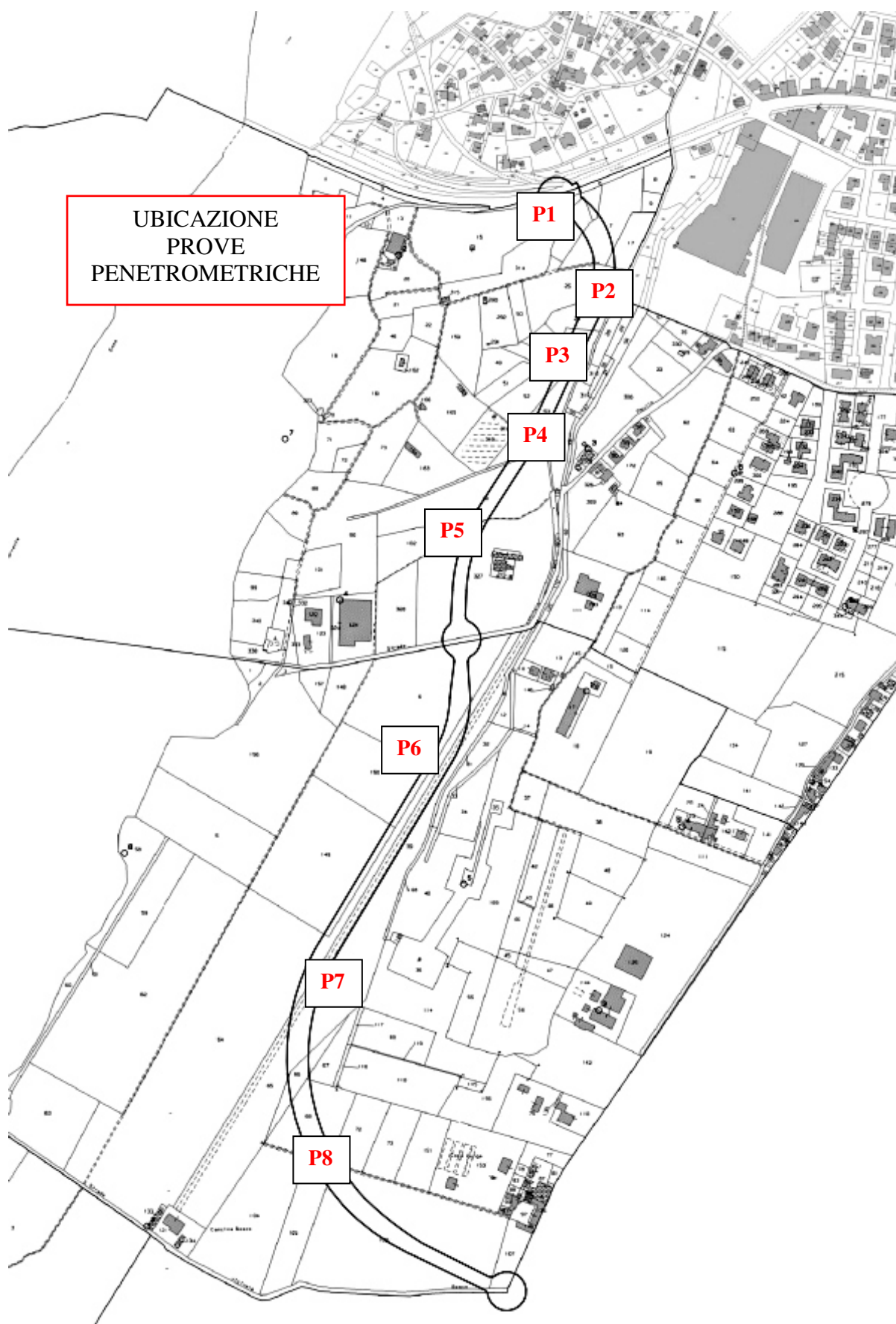
- Prospezione geofisica (**MASW**) e indagine in sismica passiva (**HVSR**).

Cap. 5 – PROVE PENETROMETRICHE

Le prove penetrometriche statiche sono state eseguite dove è stato possibile l'ancoraggio del penetrometro, diversamente si sono effettuate prove dinamiche.

Le prove 2 e 3, iniziate in modalità statica sono proseguite in modalità dinamica.

Ubicazione prove penetrometriche sul tracciato stradale in progetto



La **CPT1** è stata spinta sino ad una profondità di 2,2 m dal p.c..

Si osservano quattro strati:

- fino a 1,2 m, argille e argille organiche con valori di Q_c medi di 1,1 MPa;
- da 1,2 m. a 1,8 m. sabbie prevalenti con valori di Q_c medi di 2 MPa;
- da 1,8 m. a 2 m, sabbie con Q_c di 15 Mpa;
- da 2 m. a fine prova (rifiuto) ghiaie.

Acqua assente.

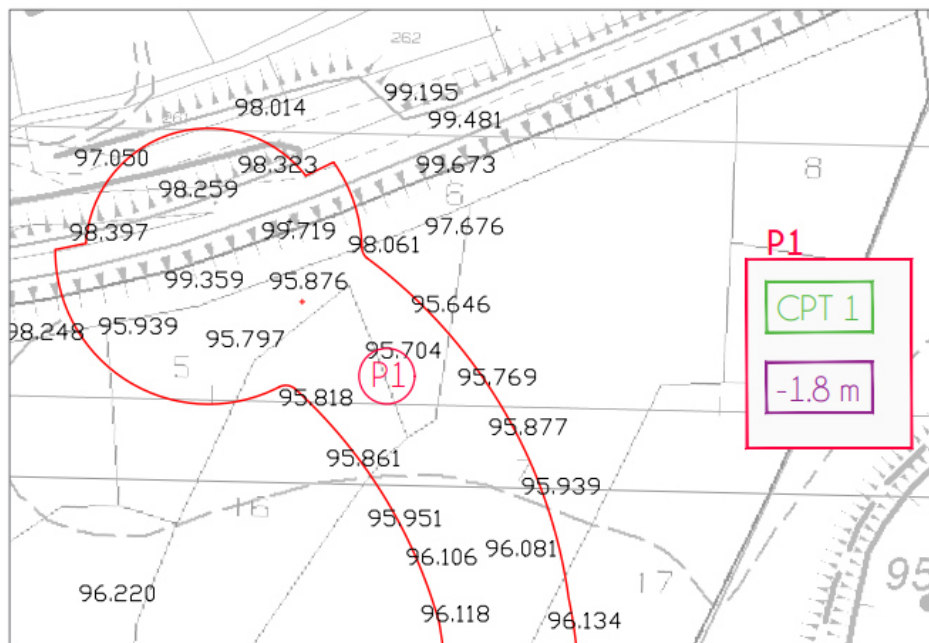




Foto n1 – cpt 1

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. P 1

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	11	30
0,6	14	36
0,8	8	26
1,0	12	26
1,2	11	18
1,4	22	26
1,6	21	25
1,8	14	28
2,0	150	180
2,2	250	299

z = profondità

Rp = resistenza di punta (bar)

Rl = resistenza d'attrito (bar)

VALORI CALCOLATI

z	Qc	Fs	Rf	L	g	sv	sv'	Uo
0,4	1,1	126,7	11,52	Torba	17,5	7,3	7,3	0,0
0,6	1,4	146,7	10,48	Torba	17,5	10,8	10,8	0,0
0,8	0,8	120,0	15,00	Argilla	18,0	14,4	14,4	0,0
1,0	1,2	93,3	7,78	Torba	17,5	17,9	17,9	0,0
1,2	1,1	46,7	4,24	Argilla	18,0	21,5	21,5	0,0
1,4	2,2	26,7	1,21	Sabbia	20,0	25,5	25,5	0,0
1,6	2,1	26,7	1,27	Sabbia	20,0	29,5	29,5	0,0
1,8	1,4	93,3	6,67	Torba	17,5	33,0	33,0	0,0
2,0	15,0	200,0	1,33	Sabbia	20,0	37,0	37,0	0,0
2,2	25,0	326,7	1,31	Ghiaie	20,0	41,0	41,0	0,0

z = profondità (m)

Qc = resistenza alla punta (MPa)

Fs = resistenza d'attrito (kPa)

Rf = rapporto delle resistenza (%)

L = litologia (criterio di Schmertmann, 1976)

g = peso di volume (kN/mc)

sv = tensione litostatica totale (kPa)

sv' = tensione litostatica effettiva (kPa)

Uo = pressione nei pori (kPa)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

z	L	CF	Id	f	Su	OCR	M	Cc	Go	Vs
0,4	Torba	27			43,7	30	9	0,220	135,0	216
0,6	Torba	27			55,6	30	11,4	0,206	171,0	228
0,8	Argilla	41			31,4	16,6	6,4	0,266	96,0	200
1,0	Torba	30			47,3	20,1	9,7	0,170	146,0	220
1,2	Argilla	25			43,1	15,2	8,8	0,123	132,0	216
1,4	Sabbia	10	32	37,6		3,2	10,2		101,0	253
1,6	Sabbia	12	30	36,8		2,5	10,1		110,0	250
1,8	Torba	33			54,7	12,6	11,2	0,155	168,0	228
2,0	Sabbia	3	68	41,9		8,7	37,6		211,0	393
2,2	Ghiaie	2	83	41,6		10,6	48,4		257,0	442

z = profondità (m)

CF = contenuto di fine [passante al 200] (%)

Id = indice di densità (%)

f = angolo d'attrito (°)

Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)

OCR = grado di sovraconsolidamento

M = modulo confinato (MPa)

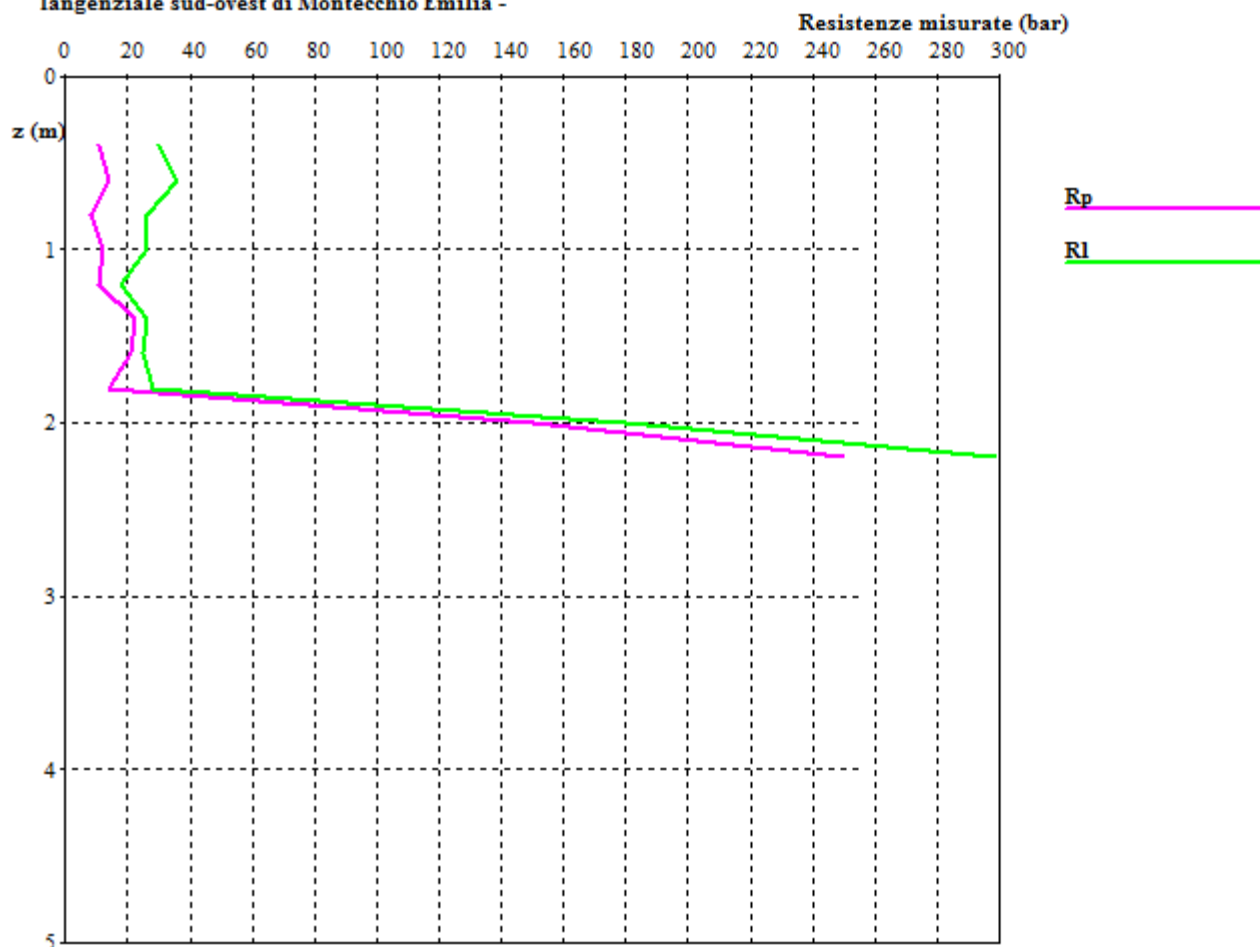
Cc = indice di compressibilità (-)

Go = modulo di taglio (MPa)

Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica 1

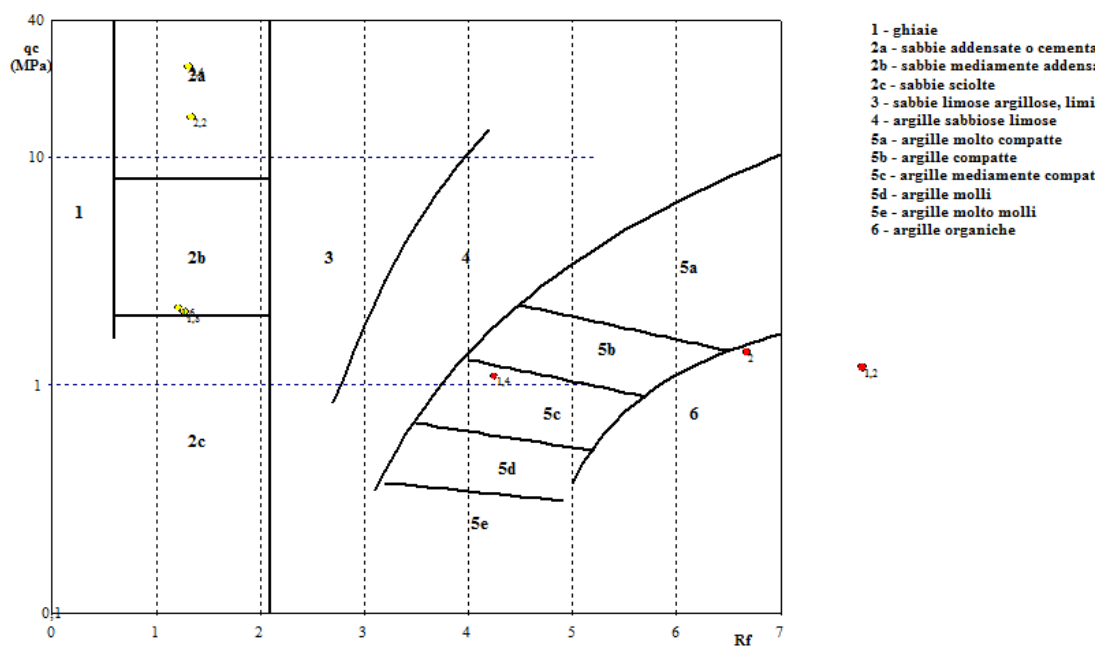
Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -



Prova Penetrometrica Statica 1

Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



La **CPT2** è stata spinta sino ad una profondità di 2 m dal p.c..

Si osservano tre strati:

- fino a 1,6 m, argille prevalenti con valori di Q_c medi di 1 MPa;
- da 1,6 m. a 1,8 m. sabbie con valori di Q_c di 11 MPa;
- da 1,8 m. a 2 m. (rifiuto) ghiaie.

Acqua assente.

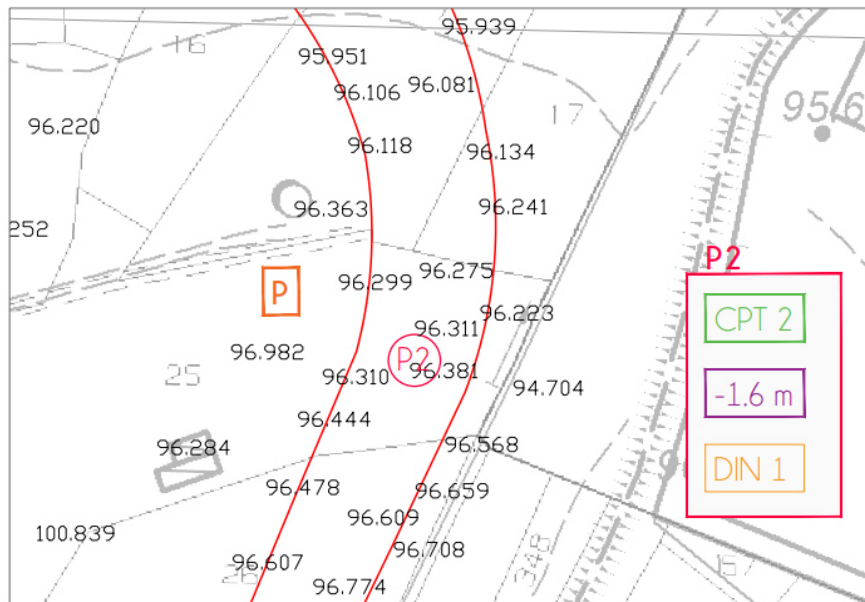




Foto n2 – cpt 2

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. **P 2**

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	11	28
0,6	8	22
0,8	9	18
1,0	11	17
1,2	13	24
1,4	9	15
1,6	12	21
1,8	110	140
2,0	250	299

z = profondità

Rp = resistenza di punta (bar)

Rl = resistenza d'attrito (bar)

VALORI CALCOLATI

z	Qc	Fs	Rf	L	g	sv	sv'	Uo
0,4	1,1	113,3	10,30	Torba	17,5	7,3	7,3	0,0
0,6	0,8	93,3	11,67	Torba	17,5	10,8	10,8	0,0
0,8	0,9	60,0	6,67	Torba	17,5	14,3	14,3	0,0
1,0	1,1	40,0	3,64	Argilla limosa	18,5	18,0	18,0	0,0
1,2	1,3	73,3	5,64	Argilla	18,0	21,6	21,6	0,0
1,4	0,9	40,0	4,44	Argilla	18,0	25,2	25,2	0,0
1,6	1,2	60,0	5,00	Argilla	18,0	28,8	28,8	0,0
1,8	11,0	200,0	1,82	Sabbia	20,0	32,8	32,8	0,0
2,0	25,0	326,7	1,31	Ghiaie	20,0	36,8	36,8	0,0

z = profondità (m)

Qc = resistenza alla punta (MPa)

Fs = resistenza d'attrito (kPa)

Rf = rapporto delle resistenze (%)

L = litologia (criterio di Schmertmann, 1976)

g = peso di volume (kN/mc)

sv = tensione litostatica totale (kPa)

sv' = tensione litostatica effettiva (kPa)

Uo = pressione nei pori (kPa)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

z	L	CF	Id	f	Su	OCR	M	Cc	Go	Vs
0,4	Torba	26			43,7	30	9	0,204	135,0	216
0,6	Torba	34			31,6	22,2	6,5	0,222	98,0	200
0,8	Torba	28			35,4	18,8	7,3	0,155	110,0	206
1,0	Argilla limosa	22			43,3	18,3	8,9	0,115	134,0	216
1,2	Argilla	27			51,1	18	10,5	0,142	158,0	224
1,4	Argilla	30			35	10,5	7,2	0,126	108,0	206
1,6	Argilla	30			46,8	12,4	9,6	0,133	144,0	220
1,8	Sabbia	5	60	41,9		8,1	31,7		180,0	366
2,0	Ghiaie	1	85	41,7		11,6	46,8		239,0	442

z = profondità (m)

CF = contenuto di fine [passante al 200] (%)

Id = indice di densità (%)

f = angolo d'attrito (°)

Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)

OCR = grado di sovraconsolidamento

M = modulo confinato (MPa)

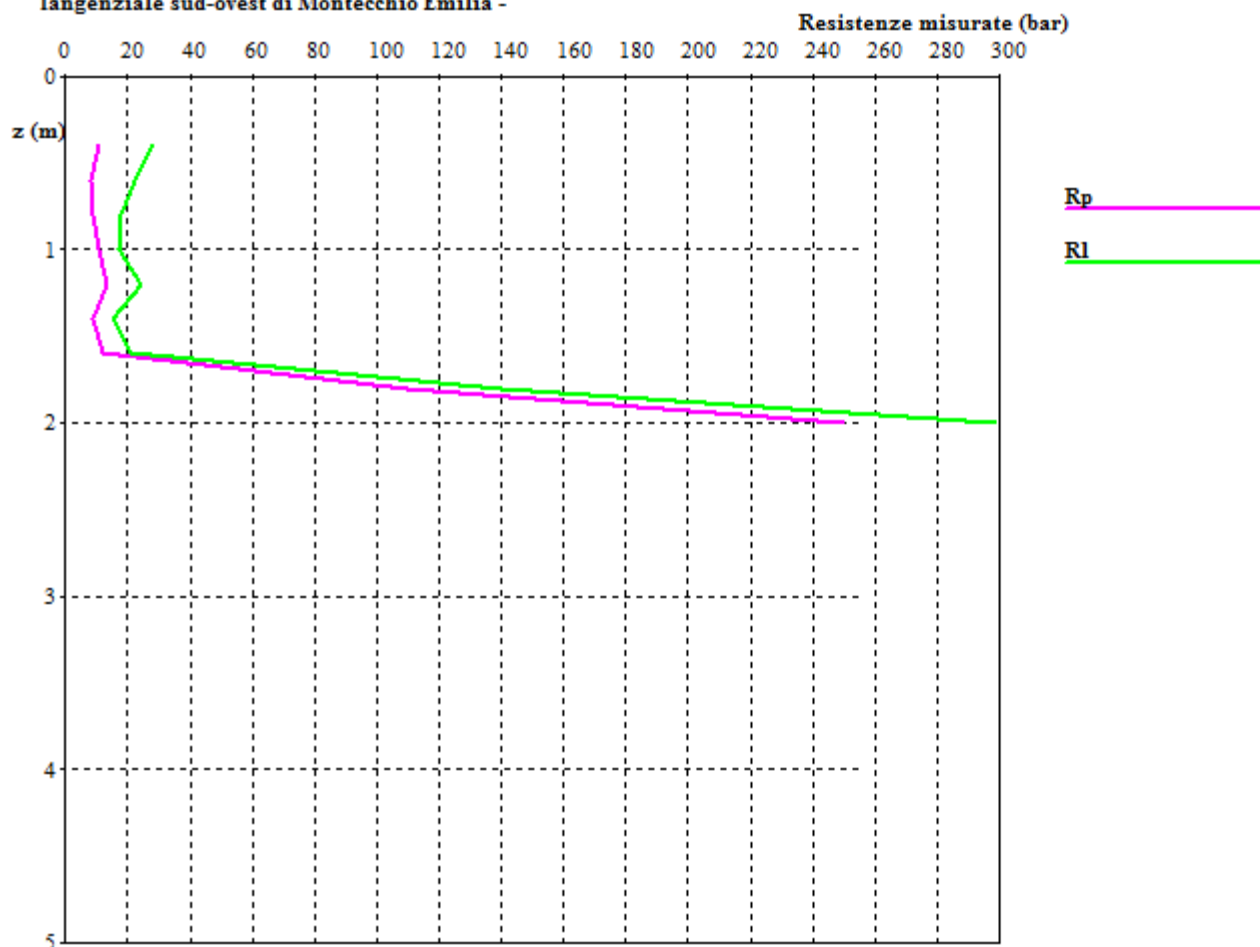
Cc = indice di compressibilità (-)

Go = modulo di taglio (MPa)

Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica P2

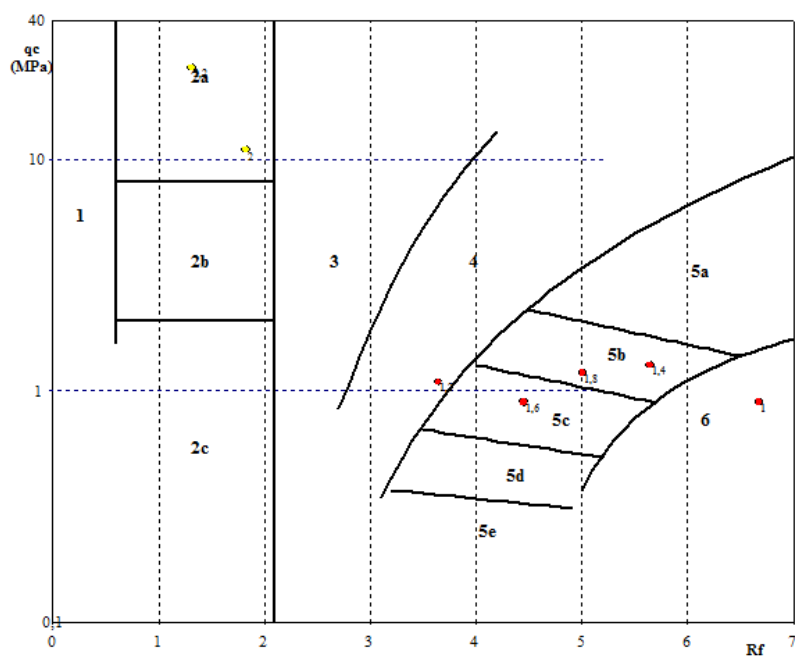
Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -



Prova Penetrometrica Statica P2

Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



- 1 - ghiaie
- 2a - sabbie addensate o cemento
- 2b - sabbie mediamente addensate
- 2c - sabbie sciolte
- 3 - sabbie limose argillose, limi
- 4 - argille sabbiose limose
- 5a - argille molto compatte
- 5b - argille compatte
- 5c - argille mediamente compatte
- 5d - argille molli
- 5e - argille molto molli
- 6 - argille organiche

La **SCPT2** continua la CPT2 ed è stata spinta sino a 2,4 m dal p.c..

La prova conferma la presenza di ghiaie al fondo con alti valori di N60 (numero colpi standardizzato).

Acqua assente

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

PROVA PENETROMETRICA n. **P 2 scpt**

Prova allestita con tubo piezometrico

VALORI DI N

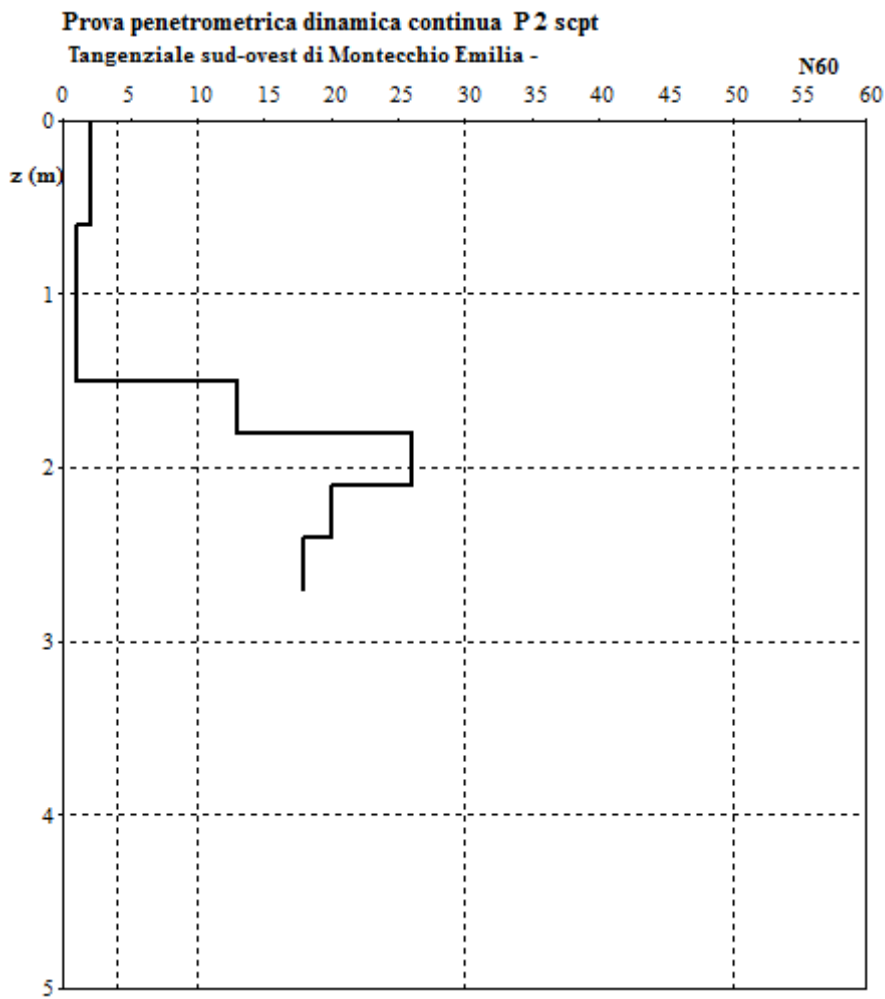
z (m)	N	N60	Nc
0,3	2	2	4
0,6	2	2	4
0,9	1	1	2
1,2	1	1	2
1,5	1	1	2
1,8	17	13	24
2,1	35	26	43
2,4	26	20	31
2,7	24	18	26

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



La **CPT3** è stata spinta sino ad una profondità di 1,8 m dal p.c..

Si osservano tre strati:

- fino a 1,4 m, argille prevalenti con valori di Q_c medi di 1,2 MPa;
- da 1,4 a 1,6 m. sabbie con valori di Q_c di 11 MPa;
- da 1,6 m. a 1,8 m. (rifiuto) ghiaie.

Acqua assente.

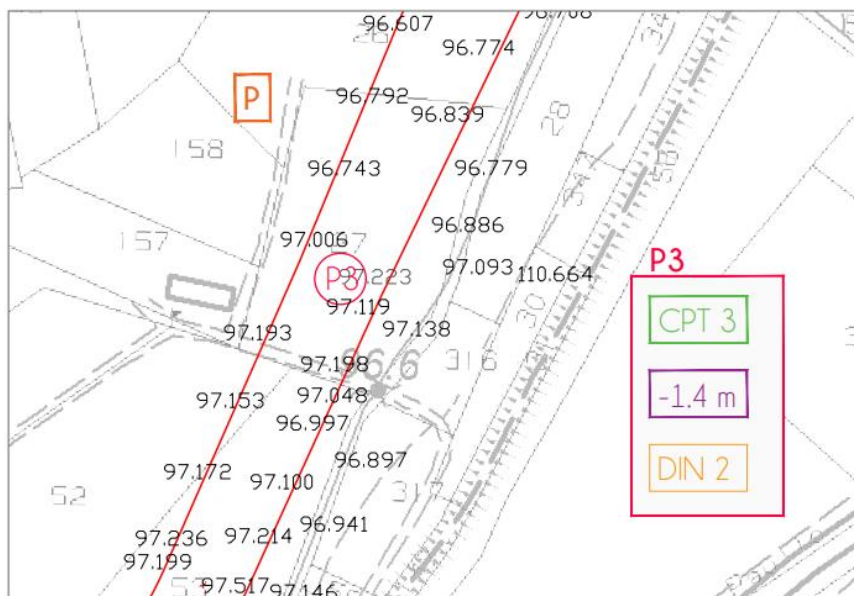




Foto n3 – cpt 3

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. P 3

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	18	35
0,6	25	31
0,8	13	20
1,0	9	20
1,2	11	18
1,4	11	18
1,6	110	140
1,8	250	299

z = profondità

Rp = resistenza di punta (bar)

Rl = resistenza d'attrito (bar)

VALORI CALCOLATI

z	Qc	Fs	Rf	L	g	sv	sv'	Uo
0,4	1,8	113,3	6,30	Argilla	18,0	7,4	7,4	0,0
0,6	2,5	40,0	1,60	Sabbia	20,0	11,4	11,4	0,0
0,8	1,3	46,7	3,59	Argilla limosa	18,5	15,1	15,1	0,0
1,0	0,9	73,3	8,15	Torba	17,5	18,6	18,6	0,0
1,2	1,1	46,7	4,24	Argilla	18,0	22,2	22,2	0,0
1,4	1,1	46,7	4,24	Argilla	18,0	25,8	25,8	0,0
1,6	11,0	200,0	1,82	Sabbia	20,0	29,8	29,8	0,0
1,8	25,0	326,7	1,31	Ghiaie	20,0	33,8	33,8	0,0

z = profondità (m)

Qc = resistenza alla punta (MPa)

Fs = resistenza d'attrito (kPa)

Rf = rapporto delle resistenze (%)

L = litologia (criterio di Schmertmann, 1976)

g = peso di volume (kN/mc)

sv = tensione litostatica totale (kPa)

sv' = tensione litostatica effettiva (kPa)

Uo = pressione nei pori (kPa)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

z	L	CF	Id	f	Su	OCR	M	Cc	Go	Vs
0,4	Argilla	17			71,7	30	14,7	0,150	221,0	242
0,6	Sabbia	6	38	41,4		8	10,5		60,0	261
0,8	Argilla limosa	19			51,4	25,9	10,6	0,114	159,0	224
1,0	Torba	34			35,29	14,4	7,2	0,175	108,0	206
1,2	Argilla	26			43,1	14,8	8,8	0,123	132,0	216
1,4	Argilla	27			43	12,6	8,8	0,123	132,0	216
1,6	Sabbia	5	61	42,2		8,8	31,1		168,0	366
1,8	Ghiaie	1	86	41,8		12,4	46		225,0	442

z = profondità (m)

CF = contenuto di fine [passante al 200] (%)

Id = indice di densità (%)

f = angolo d'attrito (°)

Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)

OCR = grado di sovraconsolidamento

M = modulo confinato (MPa)

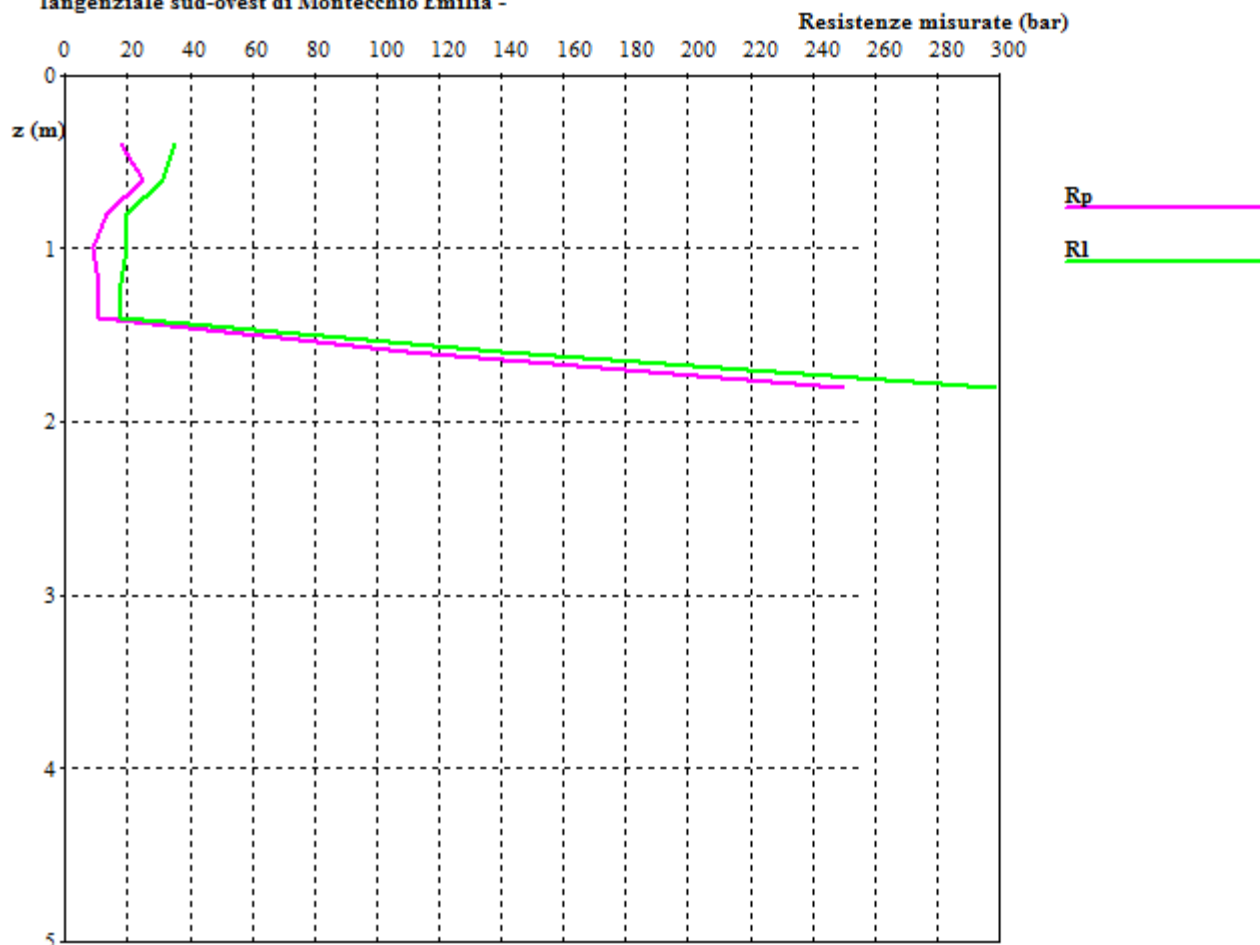
Cc = indice di compressibilità (-)

Go = modulo di taglio (MPa)

Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica P 3

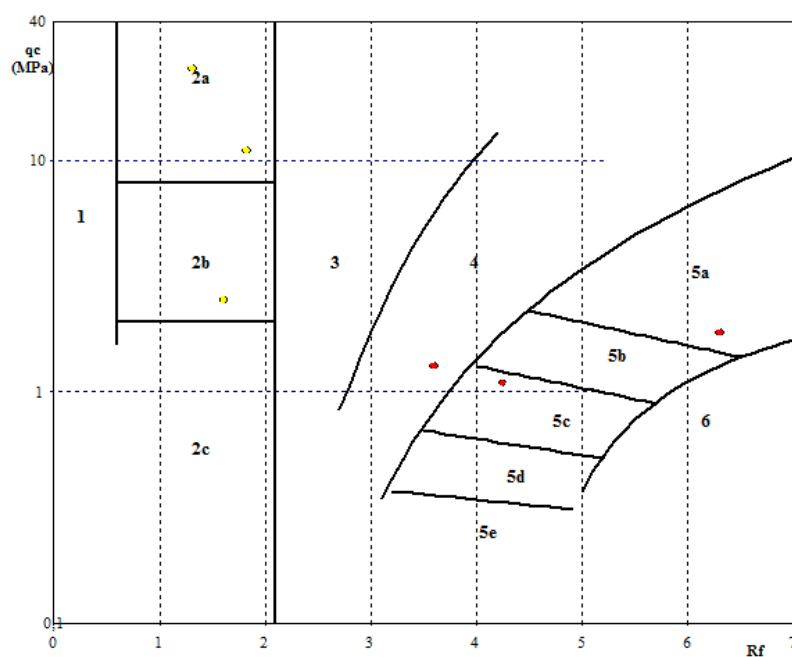
Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -



Prova Penetrometrica Statica P 3

Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



- 1 - ghiaie
- 2a - sabbie addensate o cemento
- 2b - sabbie mediamente addensate
- 2c - sabbie sciolte
- 3 - sabbie limose argillose, limi
- 4 - argille sabbiose limose
- 5a - argille molto compatte
- 5b - argille compatte
- 5c - argille mediamente compatte
- 5d - argille molli
- 5e - argille molto molli
- 6 - argille organiche

La **SCPT3** continua la CPT3 ed è stata spinta sino a 2,7 m dal p.c..

La prova conferma la presenza di ghiaie al fondo con alti valori di N60 (numero colpi standardizzato).

Acqua assente

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

PROVA PENETROMETRICA n. **P 3 scpt**

Prova allestita con tubo piezometrico

VALORI DI N

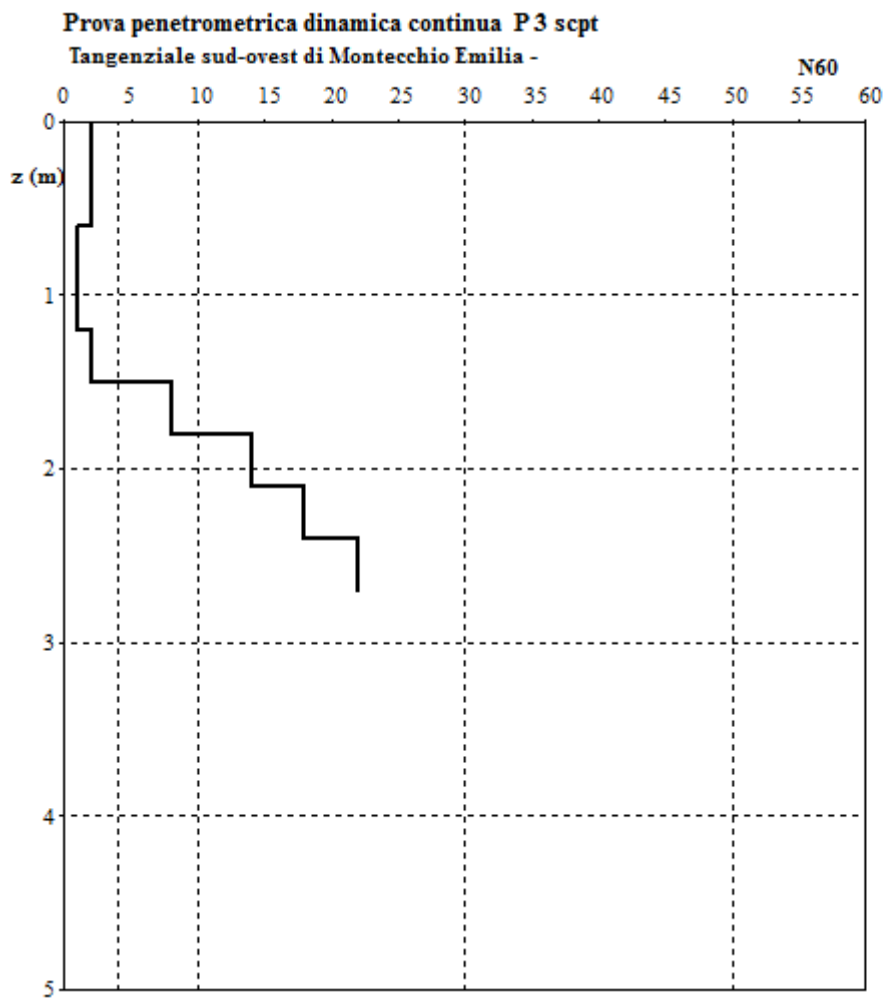
z (m)	N	N60	Nc
0,3	2	2	4
0,6	2	2	4
0,9	1	1	2
1,2	1	1	2
1,5	2	2	4
1,8	10	8	15
2,1	19	14	23
2,4	24	18	28
2,7	29	22	32

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



La **CPT4** è stata spinta sino ad una profondità di 1,4 m dal p.c..

Si osservano due strati:

- fino a 1,2 m, argille prevalenti con valori di Q_c medi di 1 MPa;
- da 1,2 m. a 1,4 m. (rifiuto) ghiaie.

Acqua assente.

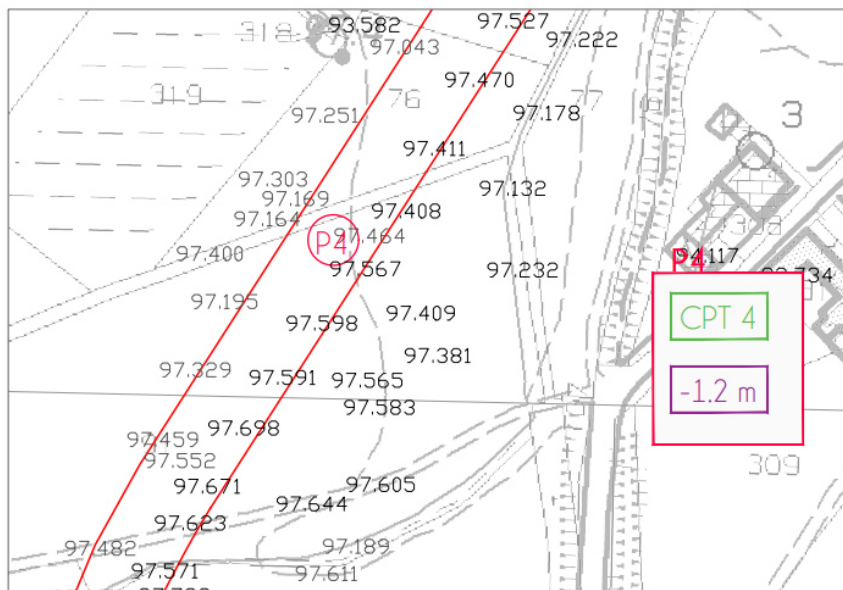




Foto n 4 – cpt 4

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. P 4

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	14	26
0,6	9	14
0,8	9	16
1,0	11	17
1,2	9	16
1,4	250	299

z = profondità

Rp = resistenza di punta (bar)

Rl = resistenza d'attrito (bar)

VALORI CALCOLATI

z	Qc	Fs	Rf	L	g	sv	sv'	Uo
0,4	1,4	80,0	5,71	Argilla	18,0	7,4	7,4	0,0
0,6	0,9	33,3	3,70	Argilla	18,0	11,0	11,0	0,0
0,8	0,9	46,7	5,19	Argilla	18,0	14,6	14,6	0,0
1,0	1,1	40,0	3,64	Argilla limosa	18,5	18,3	18,3	0,0
1,2	0,9	46,7	5,19	Argilla	18,0	21,9	21,9	0,0
1,4	25,0	326,7	1,31	Ghiaie	20,0	25,9	25,9	0,0

z = profondità (m)

Qc = resistenza alla punta (MPa)

Fs = resistenza d'attrito (kPa)

Rf = rapporto delle resistenze (%)

L = litologia (criterio di Schmertmann, 1976)

g = peso di volume (kN/mc)

sv = tensione litostatica totale (kPa)

sv' = tensione litostatica effettiva (kPa)

Uo = pressione nei pori (kPa)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

z	L	CF	Id	f	Su	OCR	M	Cc	Go	Vs
0,4	Argilla	17			55,7	30	11,4	0,143	171,0	228
0,6	Argilla	19			35,6	24,6	7,3	0,116	110,0	206
0,8	Argilla	26			35,4	18,4	7,3	0,135	110,0	206
1,0	Argilla limosa	22			43,3	18	8,9	0,115	134,0	216
1,2	Argilla	30			35,1	12,2	7,2	0,135	108,0	206
1,4	Ghiaie	1	91	41,9		15,3	42,2		188,0	442

z = profondità (m)

CF = contenuto di fine [passante al 200] (%)

Id = indice di densità (%)

f = angolo d'attrito (°)

Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)

OCR = grado di sovraconsolidamento

M = modulo confinato (MPa)

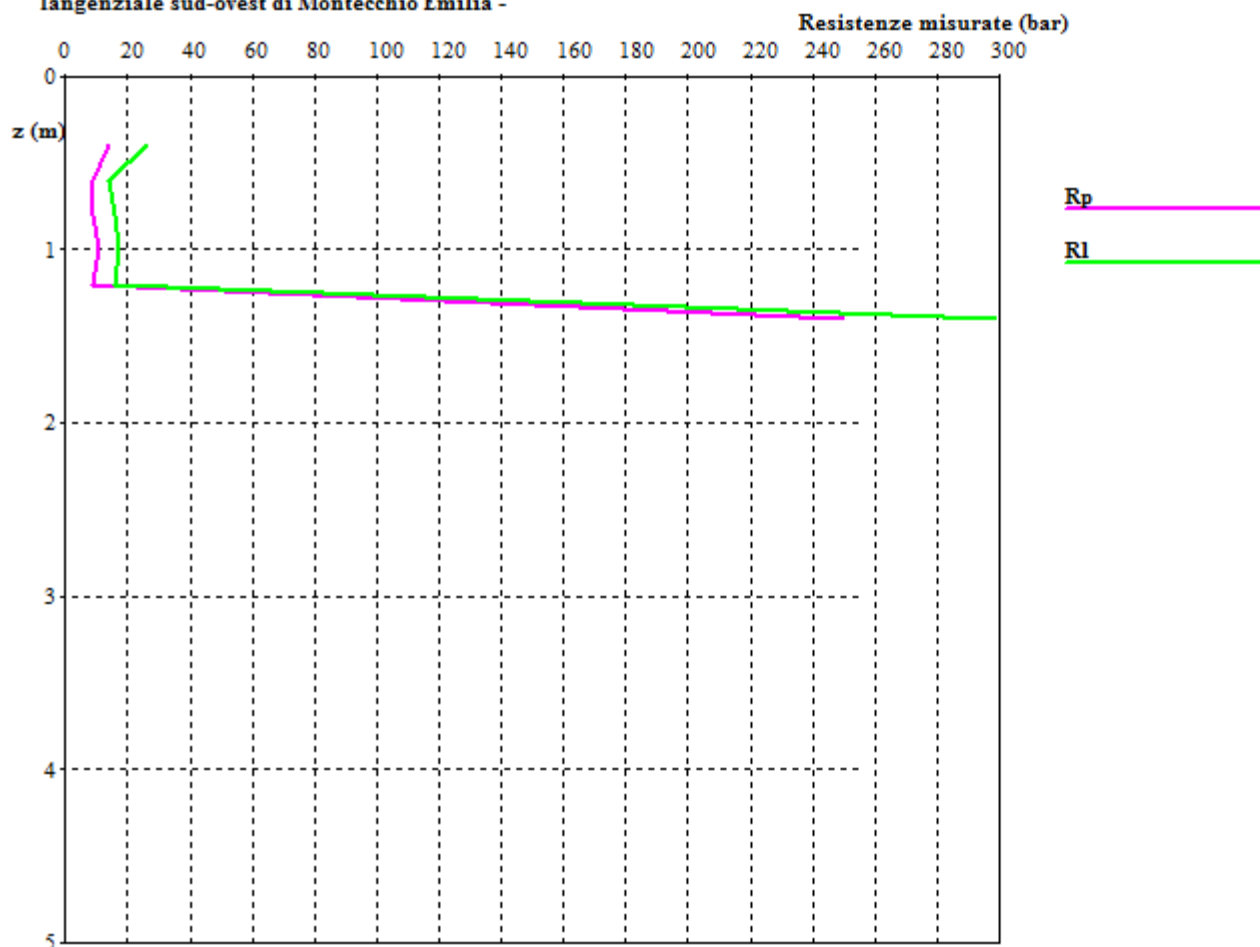
Cc = indice di compressibilità (-)

Go = modulo di taglio (MPa)

Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica P 4

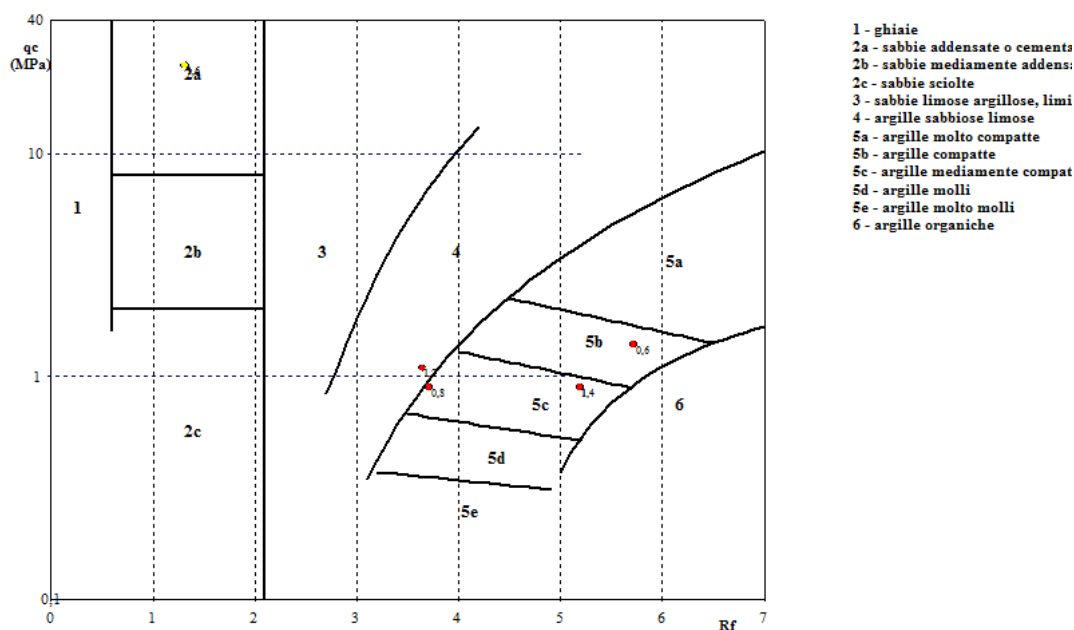
Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -



Prova Penetrometrica Statica P 4

Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



La **SCPT5** è stata spinta sino a 2,7 m dal p.c..

La prova indica fino a 0,6m terre fini di copertura con $N_{60} = 2$; fino a 0,9m sabbie e limi con $N_{60} = 12$.

Ghiaie prevalenti fino a fine prova, con N_{60} compreso tra 17 e 32.

Acqua assente

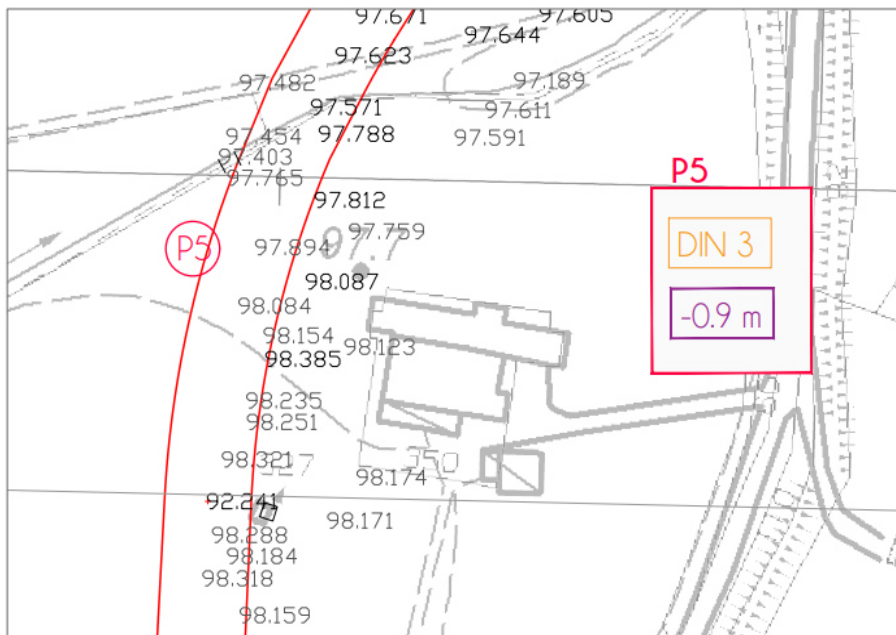




Foto n 5 – scpt 5

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [SCPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

PROVA PENETROMETRICA n. **P 5 scpt**

Prova allestita con tubo piezometrico

VALORI DI N

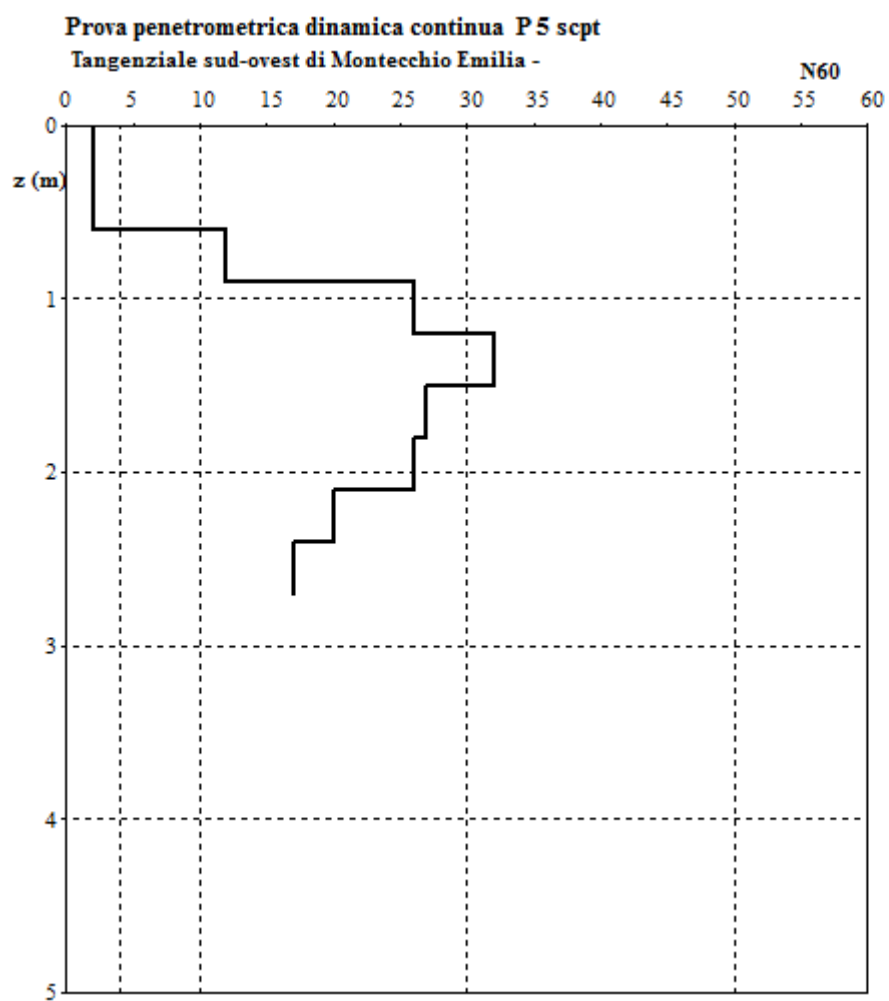
z (m)	N	N60	Nc
0,3	2	2	4
0,6	2	2	4
0,9	16	12	24
1,2	35	26	52
1,5	43	32	60
1,8	36	27	46
2,1	35	26	41
2,4	27	20	29
2,7	23	17	23

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



La **SCPT6** è stata spinta sino a 2,7 m dal p.c..

La prova indica fino a 0,6m terre fini di copertura con N60 compreso tra 1 e 8; fino a 1,80 m ghiaie con N60 compreso tra 22 e 31.

Le ghiaie proseguono al fondo dopo un intervallo di sedimenti più fini, tra 1,80 e 2,40 metri.

Acqua assente

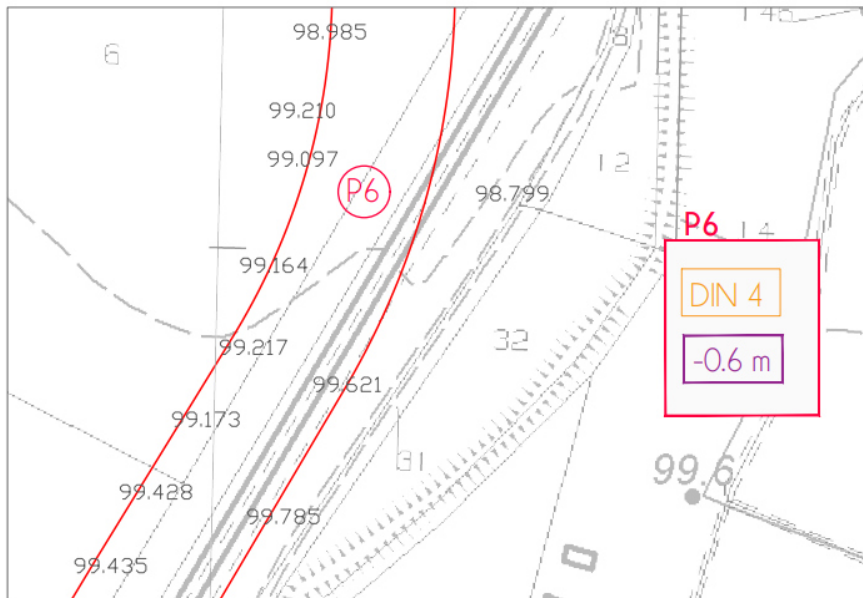




Foto n 6 – scpt 6

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [SCPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

PROVA PENETROMETRICA n. **P 6 scpt**

VALORI DI N

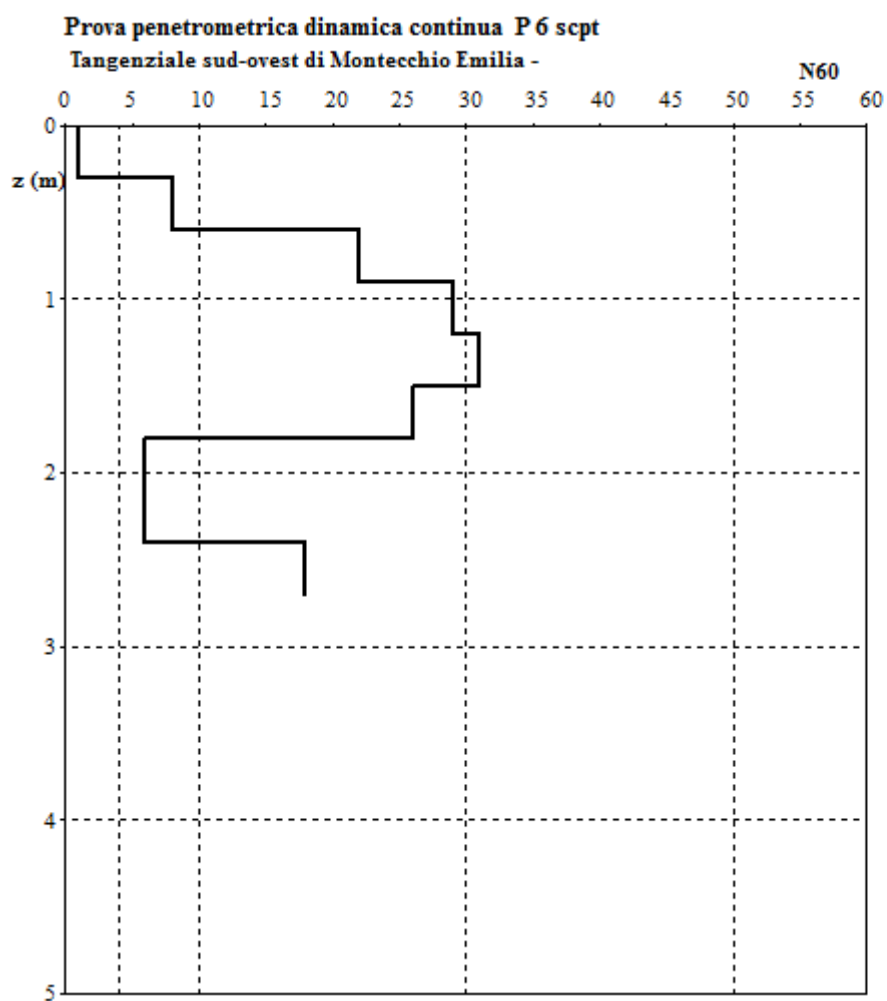
z (m)	N	N60	Nc
0,3	1	1	2
0,6	10	8	16
0,9	29	22	44
1,2	39	29	58
1,5	41	31	57
1,8	34	26	43
2,1	8	6	9
2,4	8	6	9
2,7	24	18	25

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



La **SCPT7** è stata spinta sino a 3,6 m dal p.c..

La prova indica fino a 3 m, terre fini di copertura con N60 compreso tra 2 e 5.

I livelli con N60 di 5/7 indicano livelli sabbiosi.

Da 3 a 3,6 metri sono presenti ghiaie con N60 = 30.

Acqua rilevata a 3,00 metri sotto il p.c. (all'interno dello strato di ghiaie).

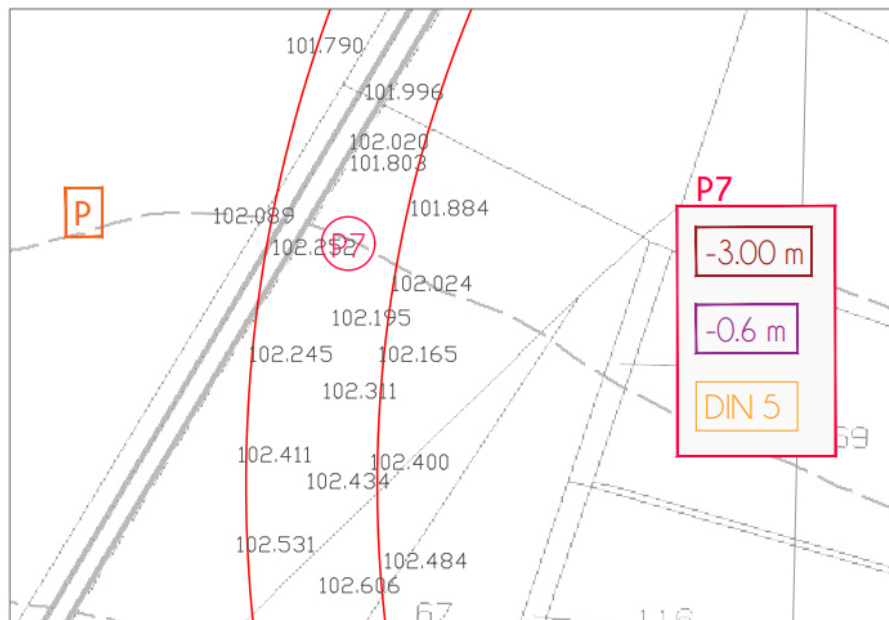




Foto n 7 – scpt 7



Foto n 8– scpt 7 con piezometro

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [SCPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

Profondità della falda = 3,0 m.

PROVA PENETROMETRICA n. P 7 scpt

Prova allestita con tubo piezometrico

VALORI DI N

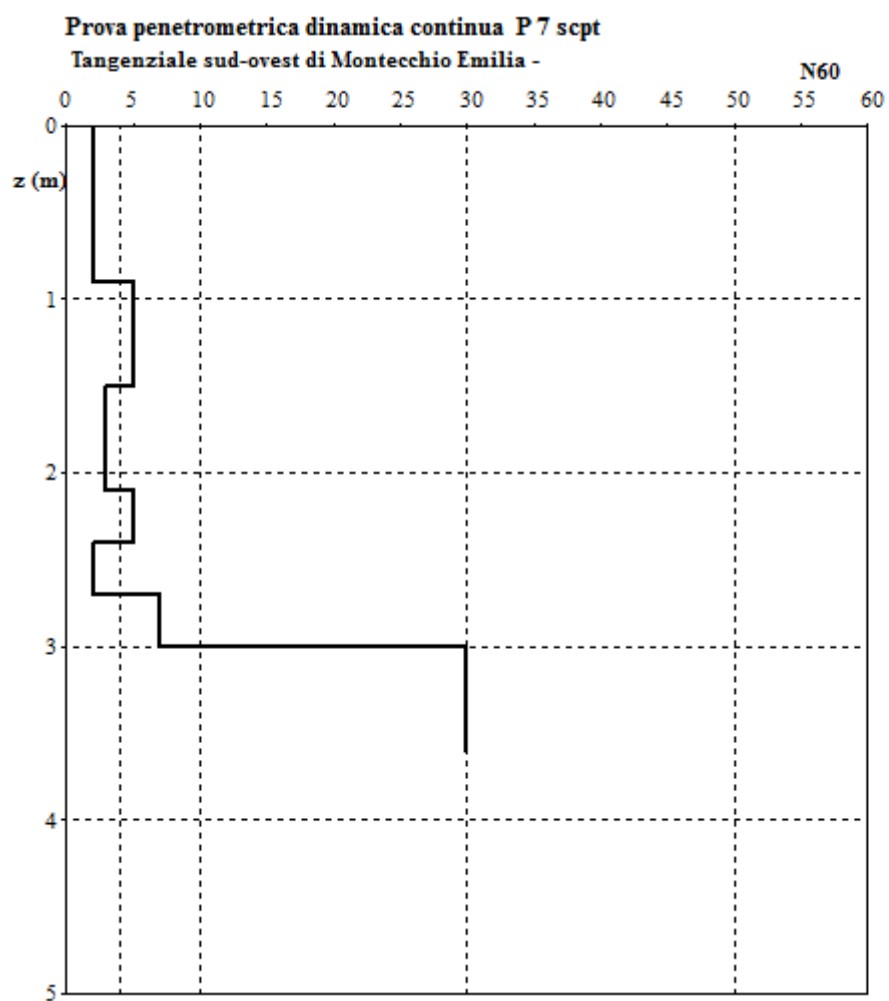
z (m)	N	N60	Nc
0,3	3	2	4
0,6	3	2	4
0,9	3	2	4
1,2	7	5	10
1,5	7	5	10
1,8	4	3	6
2,1	4	3	5
2,4	7	5	8
2,7	2	2	3
3,0	9	7	10
3,3	40	30	40
3,6	40	30	38

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



La **SCPT8** è stata spinta sino a 2,4 m dal p.c..

La prova indica fino a 0,3m terre fini di copertura con $N_{60} = 3$.

Le ghiaie proseguono fino a fine prova con N_{60} compreso tra 17 e 49, via via più resistenti in profondità..

Acqua assente

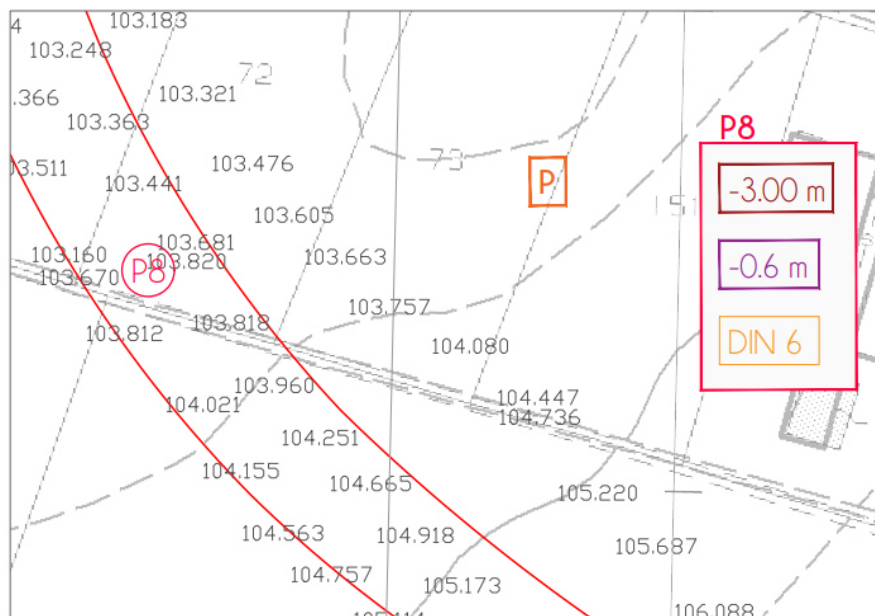




Foto n 9 – scpt 8



Foto n 10 – scpt 8 - con installazione piezometro (tubo azzurro a margine destro)

ANALISI PROVE DINAMICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [SCPT]

Committente: dott Melli

Localita': Tangenziale sud-ovest di Montecchio Emilia

Data: 05/05/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

Dati del Penetrometro:

DPSH Pesante (AGI Meardi)

W	H	A	D	Wa	Wc
73,0	75,0	60,0	51,0	7,0	55,0

W = peso del maglio (Kg)

H = altezza di caduta (cm)

A = Angolo d'apertura del cono (°)

D = Diametro di base del cono (mm)

Wa = peso delle aste (Kg/m)

Wc = peso della cuffia (Kg)

Passo delle misure = 30,00 cm.

Profondità iniziale della prova = 0,3 m.

PROVA PENETROMETRICA n. **P 8 scpt**

Prova allestita con tubo piezometrico

VALORI DI N

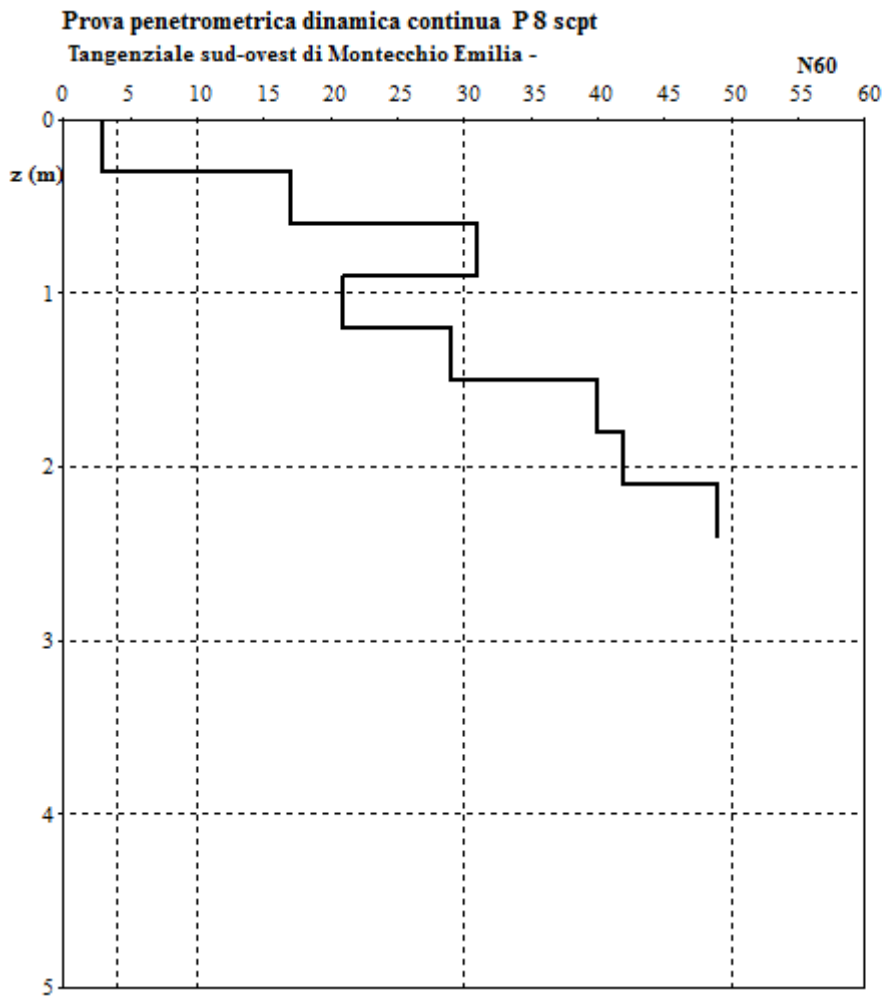
z (m)	N	N60	Nc
0,3	4	3	6
0,6	22	17	34
0,9	41	31	62
1,2	28	21	42
1,5	39	29	53
1,8	53	40	66
2,1	56	42	64
2,4	65	49	70

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



Dalle prove penetrometriche eseguite e dall'analisi della stratigrafia dei pozzi di zona, risulta che il tetto delle ghiaie è generalmente compreso, lungo il tracciato, tra 0,6 e 1,8 metri fatta eccezione per la prova n.7.

Lo spessore del primo strato di ghiaie, desunto dalle stratigrafie dei pozzi, è in genere prossimo a $3\frac{1}{4}$ metri; a C. Lunga, sud, è di circa 10 metri.

Nel corso delle prove, il livello di falda è stato misurato a 3 metri sotto il piano di campagna.

Cap. 6- MODELLAZIONE SISMOSTRATIGRAFICA E VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SISMICI DI SITO

Secondo il § 3.2 del D.M. 2018 “le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A quale definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4.

In alternativa è ammesso l’uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica del sito.

Per la modellazione sismica del terreno di fondazione sono state eseguite indagini geofisiche:

- Prova sismica tipo **MASW** per la valutazione della **VS_{30}**
- Prospezione sismica **HVSR** per la determinazione della **frequenza fondamentale** di vibrazione del sottosuolo (Hz).

6.1 - MASW e HVSr

Nel mese di maggio 2021, su commissione di BEDUSCHI GEOTECNICA srl

Via Centro Isola 1/d San Daniele Po (CR), sotto la direzione del dott. Geol. Paolo Melli

la ditta Tecnogeofisica s.n.c. di Carpi (MO) ha effettuato una prova sismica tipo MASW (Multichannel Spectral Analysis of Waves) e una prova HVSr in merito allo studio per la nuova tangenziale di Montecchio Emilia (RE).

Le prove sono state ubicate come indicato dalla committenza e visualizzato nelle schede allegate a fine testo.

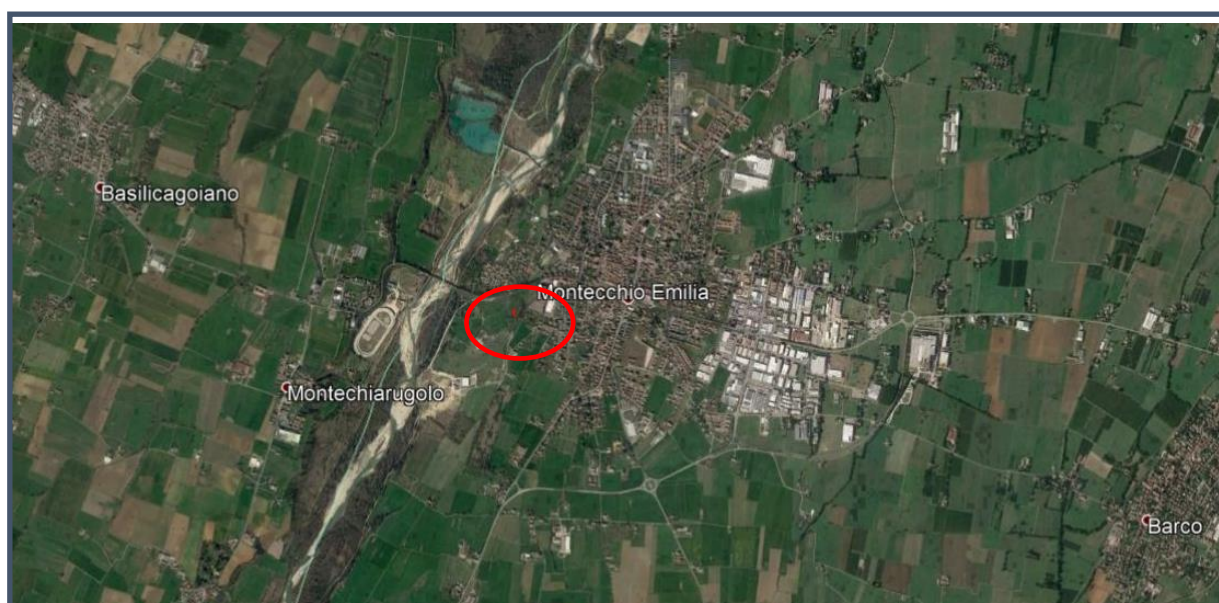


Fig.1 Ubicazione area di indagine

Caratteristiche delle indagini geofisiche eseguite

Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza linea m	Offset m	Lunghezza complessiva Linea m	Ubicazione centro indagine
MASW	24	2,0	46	10	56	Lat. N 44,697549 Long. E 10,439261
HVSr						Lat. N 44,697381 Long. E 10,439186

L'indagine MASW è indirizzata a misurare le velocità delle onde sismiche (V_s) del sottosuolo e la valutazione del parametro $V_{s,eq}$ come prescritto da:

- **Ordinanza del P.C.M. n° 3274 del 20 marzo 2003**
- **D.M. 17 gennaio 2018 "Norme tecniche per le Costruzioni".**
- **Successiva Circolare Ministeriale [n°7 del 21/01/2019](#) recante Istruzioni per l'applicazione.**

mentre lo scopo della misura HVSr è di misurare la frequenza caratteristica del terreno in studio oltre a valutare indicativamente gli spessori delle coltri superficiali.

Si ricorda che la normativa (par. 3.2.2 NTC18) richiede l'effetto della risposta sismica locale valutata mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2. dell'NTC18.

All'interno del territorio nazionale sono state individuate 4 zone sismiche, contraddistinte dal valore a_g dell'accelerazione di picco al suolo, normalizzata rispetto all'accelerazione di gravità (v. Allegato 1 ord. 3274 del 2003 e succ. modifiche). La classificazione del suolo (tabella 3.2.II) è invece convenzionalmente eseguita sulla base delle condizioni stratigrafiche e della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato
- N numero di strati;
- H per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Caratteristiche attrezzatura

L'indagine MASW è stata eseguita utilizzando un sismografo multicanale ad incrementi di segnale, della Abem-Seistronix **mod. Ras 24** con 24 canali attivi (sistema ampliabile sino a 240 canali),

sismografo (ch 1-24)

Le specifiche tecniche dello strumento sono:

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| -processore: | Pentium 200 MMx Intel, |
| -Trattamento dati: | Floating Point 48-Bit, |
| -Ambiente operativo: | Windows 7 32 bit, |
| -Display: | VGA colori LCD_TFT 15" |
| -Supporto memorizz.: | Hard Disk |
| -Risoluzione acquisizione: | 12/48 bit |
| -Sonde ambiente interne: | temperatura, umidità relativa |
| -Formato dati: | SEG-2 (.dat), |
| -Durata acquisizioni: | Rifrazione, 32÷4000 ms |
| -Tempi campionamento: | da 12 µs a 4 ms |



-Filtri digitali:	Passa alto (25÷400 Hz) Passa Basso (100÷250 Hz) Notch (50÷180 Hz)
-Attivazione filtri:	in acquisizione o manualmente
-Trigger:	inibizione impulsi dovuti a rimbalzi
- Canali:	24/48 (max 240)

Altra strumentazione

- un cavo con lunghezza 65 m per collegare in serie i geofoni
- 24 geofoni da 4,5 Hz
- Sorgente impulsiva: mazza battente da 10 Kg con piastra di battuta in alluminio 15x15 cm, da disporre sul terreno.
- Bindella metrica per posizionare i ricevitori.
- “TROMINO”®, per l’acquisizione HVSr

Indagine MASW

L’indagine sismica di tipo MASW consente la determinazione diretta della velocità delle onde trasversali (Onde di taglio - onde Sh/Sv) dei terreni del sottosuolo in esame in modo da ottenere una corretta caratterizzazione della categoria sismica del sottosuolo dell’area in oggetto (V_{s30}).

L’indagine sismica adottata, Masw (in sismica attiva) è stata scelta in funzione delle limitazioni che affliggono in genere misure di onde Sh in metodi a rifrazione tradizionali (come ad es. difficoltà di generazione di onde polarizzate Sh o inversioni di velocità identificabili con difficoltà e/o valutabili con costosi lunghi ed impegnativi metodi sismici in foro es. Cross-Hole e Down-Hole).

La tecnica sismica Masw, è stata ampiamente testata (perfezionata già dal 1999) ed è contemplata fra le indagini per la definizione rigorosa del profilo di V_s per caratterizzazione sismica del sito (*NTC-08 e ad es. Lai, Foti e Rota “Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione - IUSS Press Eucentre 2009*) e risulta migliore per la caratterizzazione del primo sottosuolo; le tecniche basate su utilizzo di registrazioni di microtremiti di origine naturale e/o antropica (tecniche passive) possono caratterizzare infatti il sottosuolo più in profondità, da diverse decine, sino alle volte, anche a centinaia di metri (*Lai et alii - IUSS Press Eucentre 2009*) ma con minor risoluzione per la zona prossima alla superficie che invece più ci interessa.

Diversi autori (*Lachet e Bard 94, Bard 99, De Ferrari et alii - Università studi di Genova 2008*), segnalano che sistemi d’acquisizione in sismica passiva sono poco idonei per terreni alluvionali, in quanto l’utilizzo di tecniche passive, è possibile o consigliabile nel caso di:

- intenso “rumore antropico” (che impedisce o maschera l’acquisizione dei dati in sismica attiva)
- discreto contrasto di impedenza sismica ($>2,5-3$) fra il substrato (sismico) ed il materasso alluvionale sovrastante
- è Importante l’interramento del sensore sismico passivo (per migliorare l’accoppiamento sensore-terreno), quindi altri autori (*Konno e Ohmachi 98, Bard 99, Bindi et alii 2000, Parolai et alii 2002*) consigliano di evitare terreni caratterizzati da: erba, fango, terreno saturo, neve, ghiaccio, materiali incoerenti in superficie (ghiaia, ciottoli, quindi piazzali rilevati ecc.), coperture artificiali con piastrelle, superfici sintetiche, ecc.

Valutando le sopracitate motivazioni per caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista del profilo V_s /profondità è stata realizzata una prospezione Masw, (rilevazione onde di Rayleigh - tecnica in sismica attiva).

Dal punto di vista operativo l’indagine è stata eseguita stendendo lungo una linea 24 ricevitori (geofoni), ad una distanza intergeofonica costante ed energizzando ad una estremità dello

stendimento con una mazza su una piastra di alluminio. La distanza tra il punto di energizzazione e il primo geofono è denominata “offset”.

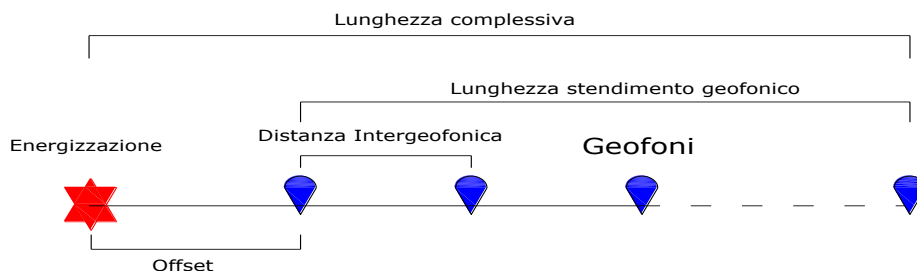


Fig.2 Schema illustrativo prova Masw

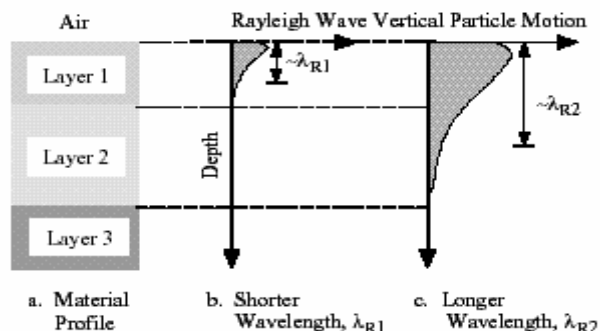
La Base Masw eseguita, per le possibilità operative presenti in corrispondenza del sito di intervento, presenta (Compreso il punto di shot) la geometria come indicato:

➤ Numero geofoni	24
➤ Distanza Intergeofonica	2,0 m
➤ Lunghezza stendimento geofonico	46 m
➤ Distanza punto di shot da primo geofono “offset”	10 m
➤ Lunghezza complessiva	56 m

Si ricorda che data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), la tecnica di acquisizione per onde di superficie necessita di geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz. Quindi le basi teoriche della tecnica di Acquisizione delle Masw, (analisi ed elaborazione delle onde di superficie di Rayleigh) sono completamente diverse dalle onde P od S degli stendimenti di simica a riflessione o rifrazione). Perciò nell’acquisizione con tecnica Masw, non è possibile caratterizzare la tecnica con un classico coefficiente geometrico che esprime la profondità di investigazione in funzione della lunghezza della stesa sismica, (come nella riflessione o nella rifrazione), ove infatti le metodiche di interpretazione si basano sui tempi di arrivo ai geofoni delle onde riflesse o rifratte (quindi si misurano dei tempi). Nella tecnica Masw non si misurano dei tempi, ma viene eseguita una trattazione spettrale dei sismogrammi e mediante trasformata di Fourier si restituisce lo spettro del segnale sismico nel dominio frequenza (f) n° d’onda (k) detto anche dominio f-k. La lunghezza dello stendimento dipende sia dal numero di ricevitori utilizzabili, sia dallo spazio disponibile.

Normalmente si dispongono i ricevitori ad interasse costante compreso tra 0,5 m e 3,0 m. (con array a parità di numero di ricevitori un interasse di 3,0 m consente di avere uno stendimento di ricevitori più lungo e quindi una maggiore risoluzione della curva di dispersione lungo la coordinata numero d’onda k; tuttavia si riduce il numero d’onda di Nyquist oltre cui non si ha certezza sull’affidabilità del segnale misurato.

Al contrario un interasse piccolo può essere necessario in piccoli spazi e consente un intervallo più ampio di numeri d’onda, ma comporta una minore risoluzione della curva di dispersione lungo i numeri d’onda.



La profondità investigata dalle onde di Rayleigh dipende più propriamente dalla lunghezza d'onda, dalla velocità delle onde di taglio V_s e dalla frequenza. (Stokoe II and Santamarina, 2000). La relazione quindi che meglio consente di valutare la profondità di investigazione di un'indagine masw, è legata più che alla dimensione dello stendimento, al valore della V_s assegnata ad una determinata profondità z dal piano campagna, calcolata in funzione della lunghezza d'onda, cioè:

$$z = \frac{\lambda}{1.5/2.0}$$

Dalle tecniche di analisi-interpretazione (analisi spettrale), mediante utilizzo del software (SWAN® vers. 2008) in seguito descritta più in dettaglio, dal grafico “*Experimental Dispersion Curve*” (nel dominio Frequenza-Velocità) è possibile ottenere la lunghezza d'onda delle onde di Rayleigh, caratteristiche dell'indagine eseguita, quindi per il sito in esame risultando una $\lambda \approx 75$ m, in base alla formulazione sopra indicata se ne può dedurre una profondità di investigazione pari a circa 50/37 m

Con la tecnica Masw (indagine sismica non invasiva di superficie) si ottiene una modellazione del sottosuolo, basandosi sulla propagazione delle onde di Rayleigh, oggi realizzata mediante approcci multi-stazioni, che risultano robusti ed efficienti (Foti, 2000; Lai e Wilmanski, 2005) rispetto ai primi approcci del metodo, che si basavano essenzialmente su 2 ricevitori (Prova Sasw - Stoke et al., 1994).

Queste prove (masw-sasw) sfruttano la proprietà della dispersione geometrica, che rende la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh (V_R) dipendente dalla frequenza di eccitazione in mezzi verticalmente eterogenei.

L'onda di Rayleigh, costituisce un particolare tipo d'onda sismica ed è facilmente individuabile in quanto ha una velocità differente dai treni d'onda delle onde P ed S risultando più lenta anche di queste ultime, con una velocità di propagazione $V_R \approx 0,9 \div 0,96 V_s$ (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing Territorio Politecnico di TORINO)

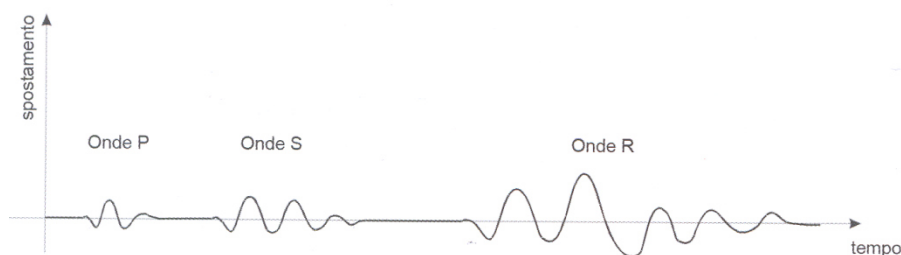


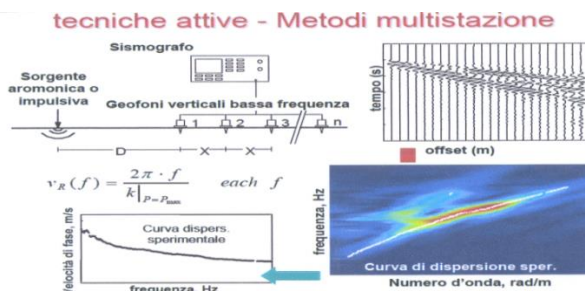
Fig. 3: sismogramma che evidenzia l'arrivo distinto di onde P, S e di Rayleigh (da Crespellani e Facciorusso “Dinamica dei terreni”)

L'onda di Rayleigh si trasmette infatti sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo ed è il risultato dell'interferenza e della combinazione d'onde sismiche di pressione (P-waves) e onde di taglio polarizzate verticalmente (Sv-waves).

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione (piccolo sisma) e nel registrare le vibrazioni prodotte sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

Il profilo di V_s viene determinato attraverso la soluzione di un problema matematico di inversione della curva di dispersione (V_R in funzione della frequenza).

In un mezzo reale stratificato avviene una dispersione delle onde prodotte; in altre parole, una deformazione del treno d'onda, dovuto alla variazione della velocità di propagazione, con la frequenza, che varia in relazione alle caratteristiche di "rigidezza" di ogni singolo strato. Nella figura sotto esposta (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing. Territorio Politecnico di TORINO) è ben riassunto il processo di acquisizione ed il passaggio alla curva di dispersione:



Gli elementi a bassa frequenza penetrano quindi più in profondità, con velocità di fase in genere più alta, rispetto alle componenti ad alta frequenza.

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, visualizzato dai grafici $V(\text{fase})/f(\text{frequenza})$, tramite elaborazioni e programmi dedicati, è convertito in profili V_s / **profondità**.

Interpretazione dati acquisiti

L'interpretazione delle tecniche di rilievo sismico MASW, prendono spunto come sopra accennato dalle prime tecniche studiate da Nazarian e Stokoe (1984-94) che per primi hanno presentato il metodo SASW che utilizzava una sorgente d'impulso e 2 soli sismometri di rilevazione (1 Hz).

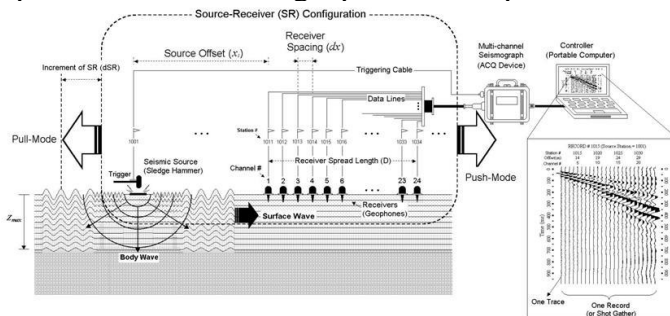
Tale tecnica come d'altronde anche la Masw, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è notorio che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

A tale scopo Park et Alii (1999) hanno studiato e sviluppato il metodo MASW, per sopperire alle difficoltà d'applicazione, della tecnica Sasw in diverse situazioni.

La differenza principale è l'utilizzo simultaneo di 24 (o più) geofoni (sismometri polarizzati verticalmente - frequenza massima 4,5 Hz) per consentire di ricavare numerosi profili di velocità V_s , ricavati dallo studio delle velocità di fase, dei numerosi treni d'onda di Rayleigh che sono registrati ai sismometri.

I geofoni possono essere spazati da 0,5 sino ad un massimo di circa 2-3 m e forniscono una ridondanza statistica delle misure delle velocità di fase, avvalorandone quindi la veridicità (rispetto al metodo Sasw che si basava solo su di un'unica misura).

Le tracce dei sismogrammi possono essere salvate nel dominio temporale, permettendo quindi di distinguere ed evidenziare (nel record di registrazione) le onde di Rayleigh, caratterizzate da elevata ampiezza di segnale (la quasi totalità dell'energia prodotta si ripartisce nelle onde di Rayleigh).



Dal sismogramma tramite una trasformata nel dominio, **frequenza (f) – numero d'onda (k)**, le tracce cui corrispondono i massimi spettrali (senza trascurare i modi superiori se presenti) si può così risalire alla curva di dispersione (cioè un grafico ampiezza/frequenza) mediante la relazione:

$$V_R(f)=f/k.$$

che consente di individuare il segnale proprio, relativo alle onde superficiali che interessano tale metodologia.

Il processo iniziale di individuazione della curva di dispersione caratteristica del sito in esame è ottenuto tramite il software (**SWAN®** vers. 2008) seguito poi da una fase di elaborazione-interpretazione, eseguendo una “analisi spettrale” si procede sostanzialmente nella risoluzione del cosiddetto problema inverso: a partire dalla curva di dispersione misurata in situ, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri sismici, secondo il seguente schema:

- Concatenazione dei file contenenti i record di registrazione in situ.
- fase di pre-processing per “ottimizzare” i record stessi in modo da migliorare la qualità dell’interpretazione cioè eventuale filtraggio o “pulizia” dei dati grezzi.
- Passaggio dal sismogramma al dominio spettrale mediante trasformata FK.
- Picking dei punti dello spettro per ottenere la curva di dispersione sperimentale; la procedura consiste nel trovare per ogni frequenza dei massimi assoluti/relativi dello spettro FK, finalizzata alla individuazione del modo fondamentale di propagazione dell’onda (ovvero quello a velocità minore), senza trascurare (analisi multimodale) di ricercare anche eventuali modi superiori.
- Estrazione curva di dispersione sperimentale mediante la procedura sopra indicata dallo spettro FK.
- Inversione: tale procedura è avviata allo scopo di ottimizzare un modello stratigrafico che sia relativo e sovrapponibile alla curva di dispersione sperimentale propria del sito; in tale procedura il programma **SWAN®** utilizza una tecnica di inversione lineare tipo OCCAM che presenta il vantaggio di minimizzare l’errore quadratico medio tra dati sperimentali e dati teorici. In linea generale come in gran parte dei processi di inversione (definiti “try and error”) l’inversione viene fermata quando un determinato parametro, definito ϵ (cioè la differenza fra dato osservato e dato calcolato) è in genere $< 2-3\%$. L’inversione OCCAM, utilizzando differenze quadratiche medie, da risultati ancora migliori, di un’inversione lineare classica, dato che quando si raggiunge lo stop dell’inversione (ϵ_{MIN}) cioè un valore percentualmente molto piccolo, la sovrapposizione delle curve è davvero buona.
- Fase di ottimizzazione e di taratura della curva teorica, realizzata contestualmente alla procedura d’inversione, con inserimento (eventuale) di strati sino ad un massimo di 30, assegnazione di moduli di Poisson e taratura dello spessore degli strati mediante confronto con prove dirette (prove penetrometriche, stratigrafie di sondaggio, colonne di perforazioni di pozzi ecc.) ed eseguendo ulteriori processi di inversione allo scopo di raffinare il risultato ottenuto, cioè una curva di dispersione teorica finale molto ben sovrapposta a quella sperimentale.

L’obiettivo finale cioè l’ottenimento di un profilo verticale delle V_s , minimizzando le imprecisioni (risultati random), ottenendo quindi un modello ad elevata attendibilità e fortemente rappresentativo, mediante le tarature, del reale profilo V_s /profondità del sito in analisi, come d’altronde suggerito anche da ricercatori in ambito geofisico (es. Dal Moro et alii Gruppo Esplor. Geofisica - Dip. Geol e Scienze Marine Univ. Trieste *“cosa migliore è confrontare lo spettro di velocità osservato, con le curve teoriche di dispersione di un modello che riteniamo plausibile per l’area sotto esame.”*).

Considerazioni sulle tecniche di inversione:

- Le tecniche d’inversione possono fornire soluzioni non univoche, ma proprio ovviare a questa possibilità, si eseguono TARATURE, con dati reali del sito (prove cpt, stratigrafie ecc.) utilizzando anche parametri che esprimono la “rigidezza” degli strati individuati (es. coeff. Poisson), proprio per indirizzare l’inversione verso un modello molto vicino a quello reale.
- La funzione obiettivo (il misfit tra dato osservato e dato calcolato) è prossima a zero, solo in caso ideale in assenza di rumore; per questo motivo il sismogramma può essere trattato o filtrato per ridurre al minimo od eliminare eventuali rumori o disturbi esterni, che non hanno nulla a che fare con l’onda sismica che stiamo analizzando.
- E’ fuorviante e non corretto attribuire una percentuale di errore eseguendo una operazione di alterazione delle velocità sismiche, ottenute dall’esecuzione dei dettagliati processi di inversione

sopra esposti (esempio attribuendo un errore globale del $\pm 10\%$, quindi alterando ad es. le velocità sismiche ottenute moltiplicando $\cdot 0,9$ le Vs dei singoli strati), perché in tal modo si **vanificherebbe** completamente l'elaborazione Masw, che è stata fatta con cura ed esperienza secondo principi codificati e consolidati. Ipotizzando possa esistere un modello Vs/profondità analogo a quello definito con l'interpretazione corretta della prova Masw, ma con velocità alterate (cioè diminuite/aumentate del 10%) si otterrebbe un Match fra curva sperimentale e teorica **completamente non attendibile**. A titolo di esempio si allegano alcune figure che illustrano tale erronea operazione di alterazione delle Vs calcolate.

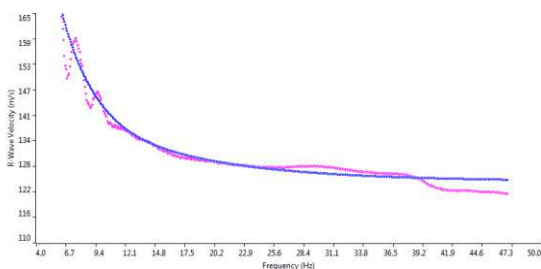


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica (blu) ottenuta dal processo inversione Masw dominio frequenza/velocità.
Si noti la quasi perfetta corrispondenza del fitting fra le due curve

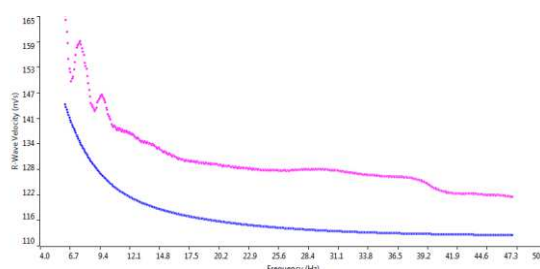


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica "alterata" modificando le Vs diminuendole erroneamente del 10% (blu) dominio frequenza/velocità.
Si noti la completa "sfasatura" della curva teorica sinonimo di un allontanamento dalla reale stratigrafia sismica che caratterizza il sito quindi un modello **NON ACCETTABILE**

Le curve di dispersione sopra esposte sono da considerare indicative e non riferite alla indagine Masw della presente relazione; sono riferite ad un generico sito con una stratificazione di 5 strati, mantenuti identici nelle 2 simulazioni, con analoghi coefficienti di Poisson assegnati (variabili fra 0.45-0.48) e $V_{S30} \approx 190$ m/sec (grafico a sinistra) e $V_{S30} \approx 170$ m/sec (grafico a destra).

Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{s30})

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (come previsto da DM 17/01/2018) sono stati esaminati i dati ottenuti dalle prospezioni sismiche di superficie, opportunamente tarati con dati stratigrafici e litologici presenti in bibliografia (pozzi, sezioni stratigrafiche ecc.) e con le prove penetrometriche eseguite in sito.

i valori della velocità media delle onde di taglio V_s risultano pertanto:

metodo sismico attivo-MASW onde Rayleigh:

1° strato: da 0,0 a 0,80 m	spessore medio 0,80 m	velocità media onde V_s 150 m/sec
2° strato: da 0,80 a 2,60 m	spessore medio 1,80 m	velocità media onde V_s 200 m/sec
3° strato: da 2,60 a 5,60 m	spessore medio 3,00 m	velocità media onde V_s 380 m/sec
4° strato: da 5,60 a 15,80 m	spessore medio 10,20 m	velocità media onde V_s 470 m/sec
5° strato: da 15,80 a $\geq 30,00$ m	spessore medio $\geq 14,20$ m	velocità media onde V_s 520 m/sec

In base a quanto sopra, la classificazione delle categorie dei suoli di fondazione, come da All. 2 (cfr. Ord. Pres. Consiglio dei Ministri 3274 del 20/03/2003 e art. 3.2.2 DM 17/01/2018), ai vari strati sismo stratigrafici individuati, è stato associato il valore della velocità V_s direttamente misurate, consentendo di ottenere la V_{s30} , cioè la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{si}}}$$

dove

h_i = spessore dello strato i-esimo
 V_{si} = velocità onde S nello stato i-esimo
 N = numero strati considerati

Ottenendo in base ai dati sopra esposti,

Prospezione MASW $V_{s30} = 421$ m/sec (da p.c. a -30 m)

Da cui si presume che, in base alla misura delle onde di taglio V_{s30} , il terreno corrisponde alla categoria del suolo di fondazione di tipo **B** (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.)

Si ricorda che in base a quanto previsto da art. 3.2.2 NTC2018, "Per le fondazioni superficiali, la profondità del calcolo delle V_s è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Indagine sismica Microtremori (misura HVSR)

Per la misura della frequenza caratteristica del sito e/o per determinazione dello spessore della coltre superficiale, è stata eseguita una stazione per l'acquisizione dei microtremori sismici (Rilievo HVSR).

Per l'acquisizione dei dati di microtremore sismico, è stato utilizzato uno degli strumenti più diffusi per l'acquisizione di dati in sismica passiva a stazione singola, denominato "TROMINO"®, certificato e coperto da brevetto internazionale.

Tale strumentazione appositamente progettata, rappresenta la nuova generazione di strumenti digitali per la misura ad alta risoluzione del rumore sismico ambientale ed anche per la misura delle vibrazioni su strutture (norma Din 4150 e UNI 9916).

Tecnicamente è un sismografo idoneo al rilievo del microtremore sismico, nell'intervallo di frequenze fra 0,1 e 512 Hz, mediante l'impiego di masse strumentali molto ridotte, con una struttura rigida non risonante e costruita con materiali non diffrangenti.

I sensori sono costituiti da una terna di velocimetri smorzati che trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore e dinamica ≥ 23 bit. Queste caratteristiche strumentali consentono un'elevata accuratezza nella misura dei dati, maggiore di 10^{-4} , sulle componenti spettrali maggiori/uguali a 0,1 Hz. Praticamente si tratta di installare solidalmente al suolo il Tromino® e di misurare il tremore sismico, con durata di registrazione adeguata alla frequenza minima di interesse per il sito in analisi.

Per l'area in esame s'ipotizza di misurare la frequenza della coltre sedimentaria, di copertura del bedrock sismico (quindi con spessore massimo ipotizzabile non superiore a 300 m), da ciò ne deriva una stima (in prima approssimazione) della frequenza dell'ordine di circa 0,5 Hz, che equivale ad un periodo $T = 2$ sec. Pertanto, per poter "osservare" e registrare con Tromino® queste frequenze, si tratta di mantenere in acquisizione lo strumento per una durata minima teorica di almeno 2 sec. Poiché poi il metodo si basa su tecniche di risoluzione spettrale elevata, il segnale viene acquisito su finestre temporali di almeno 10 volte più lunghe.

Inoltre, è opportuna, ed indispensabile, anche una ridondanza statistica (30-40 ripetizioni), che consente di mediare opportunamente le registrazioni, per evitare di interpretare rumori "locali" random.

In sintesi, per ottenere un'acquisizione di rumore sismico (microtremore) a scopi stratigrafici anche profondi, si devono quindi analizzare dati con durata di acquisizione minima di 15 minuti.

Il risultato della acquisizione eseguita nel sito in esame è quindi analizzato mediante il codice di calcolo 'Grilla' (ver. 8.0), che consente di archiviare, analizzare e permettere la revisione del segnale misurato in sito.

Tale software consente di realizzare approfondite analisi spettrali di base e procedure per analisi HVSR (meglio nota come tecnica di Nakamura) secondo procedure codificate dal progetto di ricerca SESAME (2004).

I passi principali sono:

- ◆ uso di strumentazione certificata e/o verificata da opportune commissioni (tecnico - scientifiche).
- ◆ analisi dettagliata dello spettro di Fourier delle componenti verticali del segnale per individuare ed eliminare componenti "monocromatiche" (possibile rumore antropico)
- ◆ eliminare (in genere la sequenza completa è di suddividere l'acquisizione in sotto finestre di 20 sec) le sotto finestre con contenuti TRANSIENTI, cioè le porzioni di segnale contenenti transienti legati a sorgenti vicine al sensore (cioè passi o passaggi di autoveicoli).
- ◆ calcolo H/V per ogni sottofinestra selezionata mediante:
 - eliminazione segnale di eventuali offset
 - calcolo spettri di Fourier
 - Smoothing degli spettri Fourier per minimizzare effetti d'instabilità numerica del computo dei rapporti, ottimizzando caso x caso la % di smoothing, per evitare di alterare le caratteristiche dello spettro intrinseco e quindi della curva H/V che ne deriva
 - Calcolo delle curve H/V in componente N-S - E-O – verticale

- ◆ Stima del valore medio dei rapporti spettrali per ciascuna sottofinestra e definizione deviazione standard
- ◆ Identificazione curve H/V dei picchi statisticamente più significativi e stima indice di affidabilità da opportuni test statistici che permettono di definire l'affidabilità della curva H/V ed identificare il picco più significativo su criteri quantitativi.
- ◆ Se l'acquisizione viene eseguita in diverse condizioni d'acquisizione: es. esecuzione in diverse ore del giorno, diverso processing dei dati, diverse condizioni atmosferiche ecc., i risultati della curva H/V devono risultare paragonabili.

Si ricorda che il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze che corrispondono alle frequenze naturali f_n di vibrazione del deposito:

$$f_n = 1/T_n = (V_s * (2n-1)) / (4 * H) \text{ con } n=1,2, \dots$$

mentre risulta ridotto di amplificazione alle frequenze elevate a causa dello smorzamento del terreno. Di particolare importanza è la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito denominata frequenza fondamentale di risonanza:

$$f_l = 1/T_l$$

E' quindi di interesse, porre particolare attenzione, a possibili fenomeni di doppia risonanza, cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico e quelle degli edifici.

Dal punto di vista empirico è noto che la frequenza del primo modo flessionale di un edificio, con struttura in c.a. e a geometria regolare, è governata principalmente dall'altezza e può pertanto essere calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula:

$$\text{freq. 1° Flessionale edificio} \approx 10\text{Hz} / \text{numero piani}$$

la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{freq. 1° modo flessionale edificio} \approx \text{freq. fondamentale (o di risonanza) del sito}$$

è particolarmente da tenere in considerazione, poiché può dar luogo ad incrementi imprevisti della massima amplificazione sismica e/o ad un risentimento dell'input sismico per una durata maggiore rispetto alla condizione di assenza di risonanza, deve quindi essere oggetto di studi approfonditi e di cui deve opportunamente tenerne in debito conto il progettista strutturale.

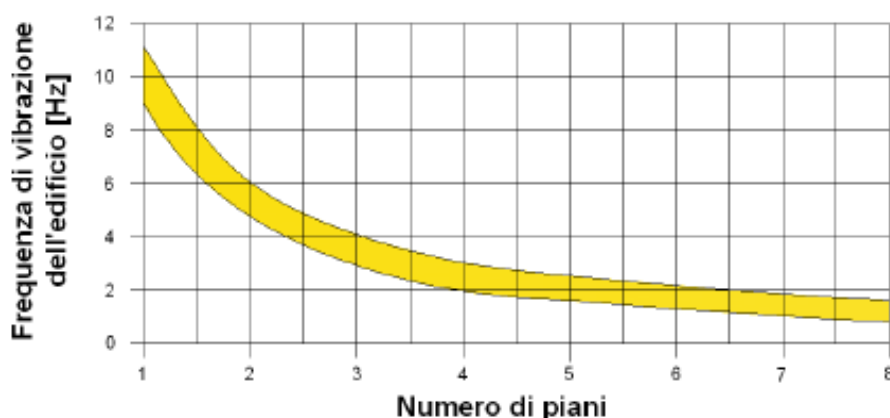


Fig4: Frequenza indicativa di vibrazione degli edifici rapportata al numero dei piani

Il risultato dell'elaborazione è il grafico del “Rapporto spettrale orizzontale su verticale”, presentato nella scheda “**misura microtremori (HVSr)**”, che mette in evidenza (se presenti) picchi di amplificazione del segnale ($HVSr > 1$) dovuti alla presenza nel sottosuolo di contrasti di impedenza sismica fra gli strati che innescano amplificazioni del segnale sismico.

Il valore finale del HVSr in funzione della frequenza espresso nel grafico è indicato da una linea rossa che indica la media RMS delle componenti orizzontali rispetto alle verticali, mentre l'intervallo di confidenza (95%) relativo all'ampiezza HVSr è dato dalle linee nere sottili.

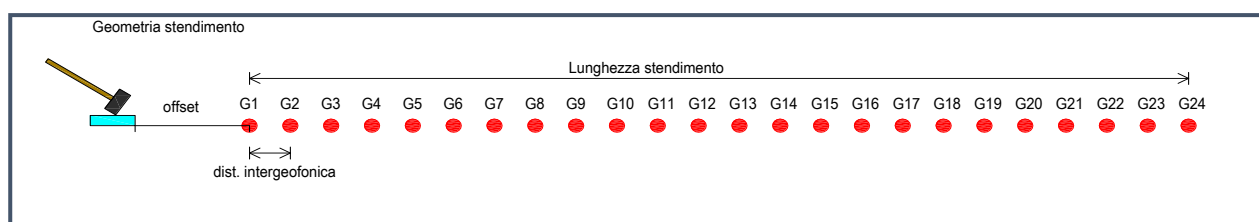
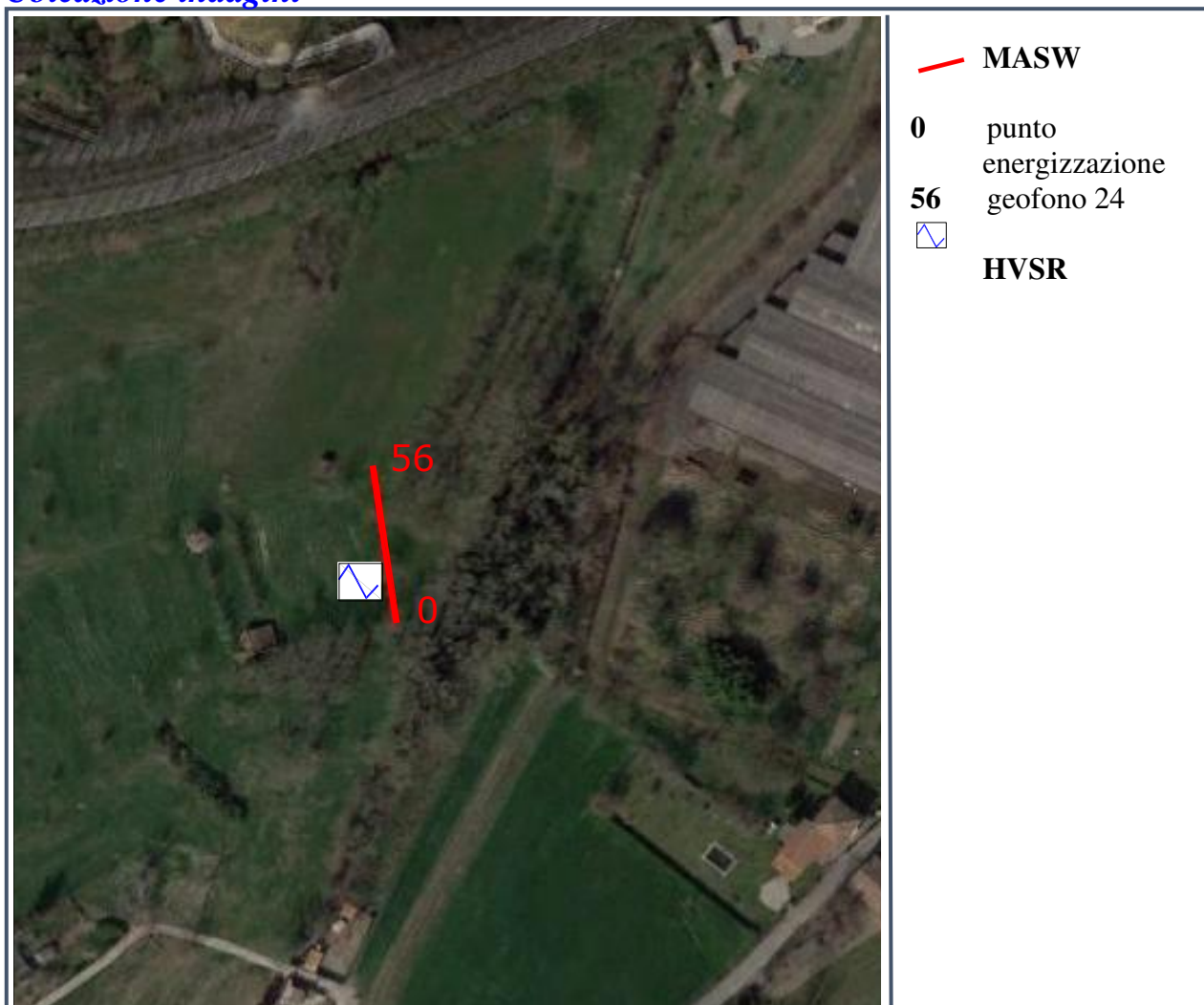
Il grafico “Spettro delle singole componenti” esprime invece l'andamento delle singole componenti registrate dal Tromino; componente N-S; componente E-O e componente Up-Down alle varie frequenze.

Nel caso in esame si tratta di una registrazione che rientra nei criteri di validazione della tabella SESAME (3 valori su 3 sono soddisfatti), con evidenziato un picco con frequenza (f) principale a **22,38 Hz**.

TECNOGEOFISICA SNC

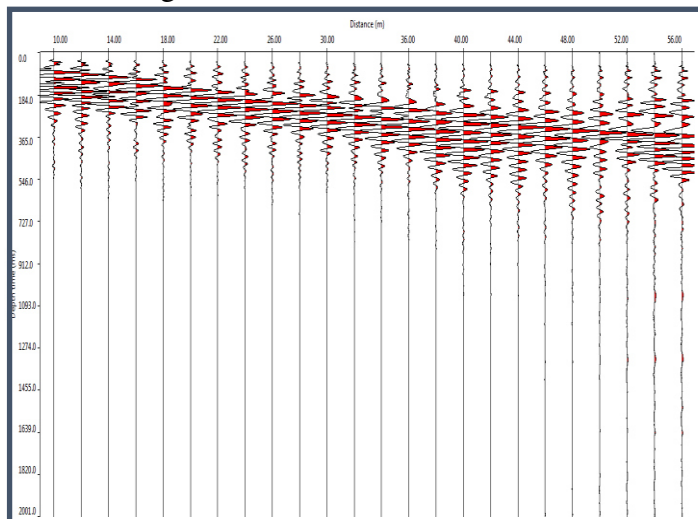
Allegati Intervento

Ubicazione indagini

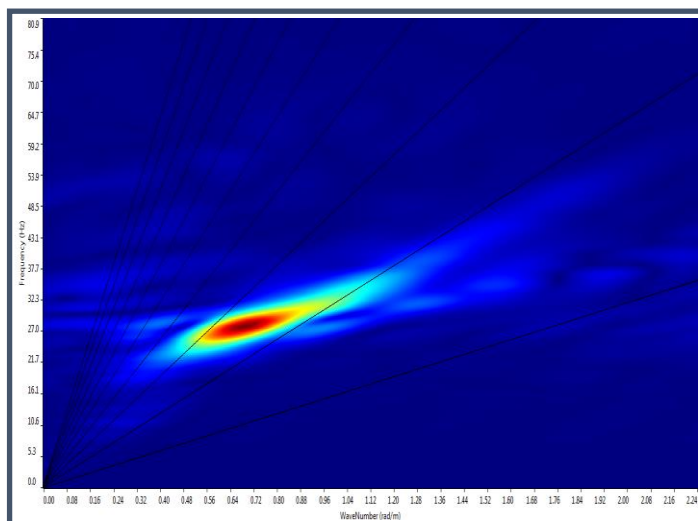


Tipologia indagine	Numero geofoni	Interdistanza geofonica m	Lunghezza linea m	Offset m	Lunghezza complessiva Linea m	Ubicazione centro indagine
MASW	24	2,0	46	10	56	Lat. N 44,697549 Long. E 10,439261
HVSR						Lat. N 44,697381 Long. E 10,439186

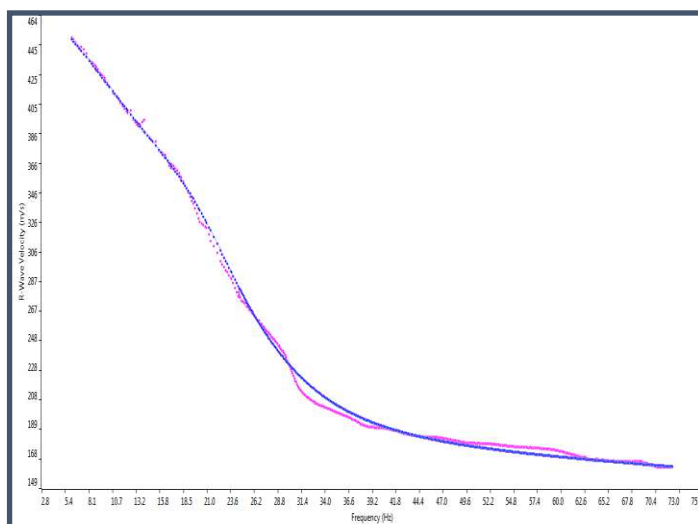
Scheda Indagine Masw



Sismogramma nel dominio spazio/tempo



Spettro FK - Rappresentazione del sismogramma nel dominio numero d'onda – frequenza



Sovrapposizione curva di dispersione calcolata /curva teorica rappresentata nel dominio Frequenza/Velocità

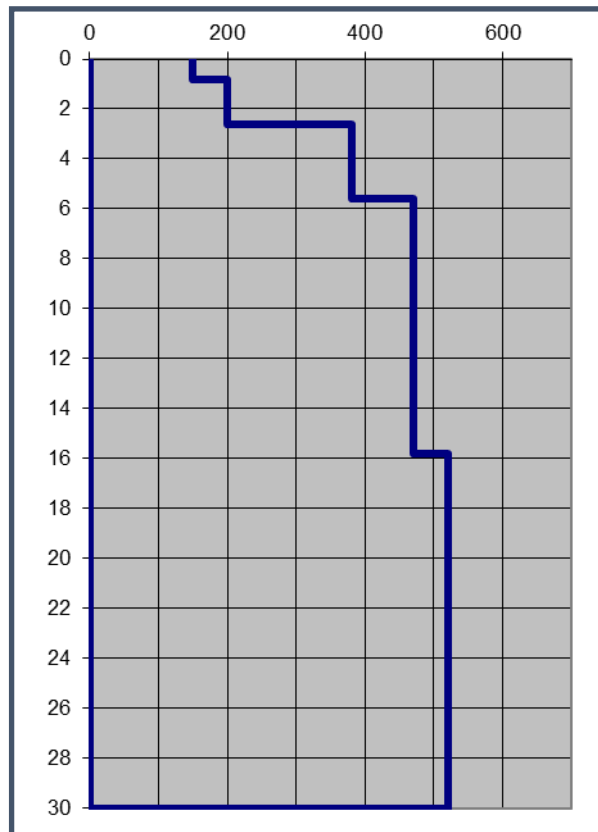


Grafico velocità/profondità onde di taglio Vs

Risultati Elaborazione MASW

Strato	profondità		Spessore m	Vel. m/sec
	da	a		
Strato1	0.00	0.80	0.80	150
Strato2	0.80	2.60	1.80	200
Strato3	2.60	5.60	3.00	380
Strato4	5.60	15.80	10.20	470
Strato5	15.80	≥30.00	≥14.20	520

$$V_{s0} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

Dove:

hi = spessore dello strato i-esimo

V_{si} = velocità onde S nello stato i-esimo

N = numero strati considerati

V_{s30} da p.c. a –30 m = 421 m/sec

Scheda Indagine HVSR

Strumento: TRZ-0099/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 05/05/21 09:15:23 Fine registrazione: 05/05/21 09:35:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

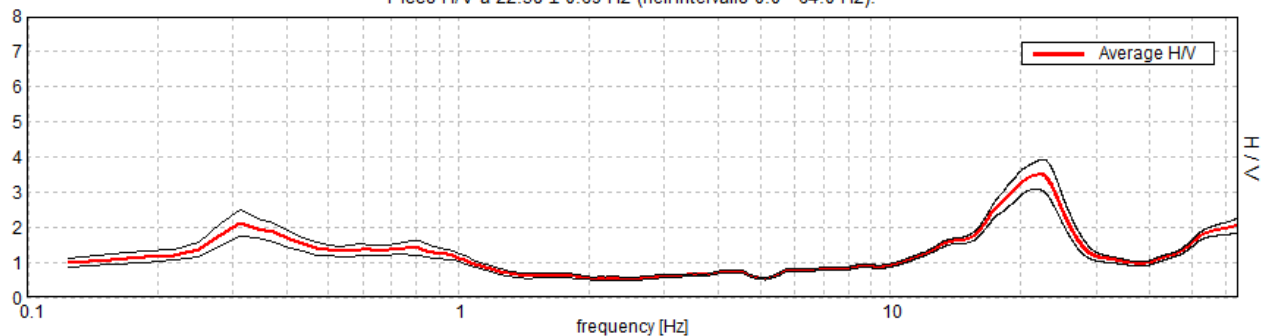
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

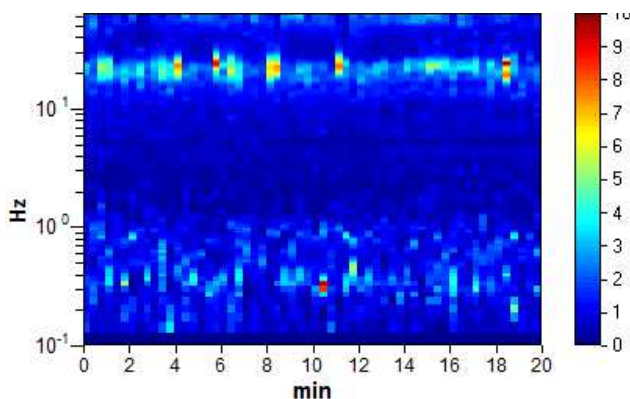
Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

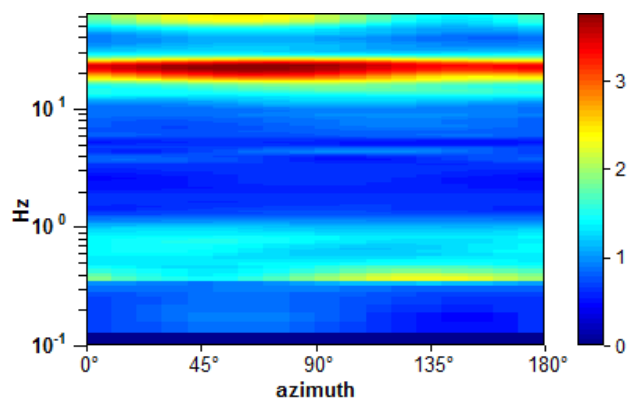
Picco H/V a 22.38 ± 0.69 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



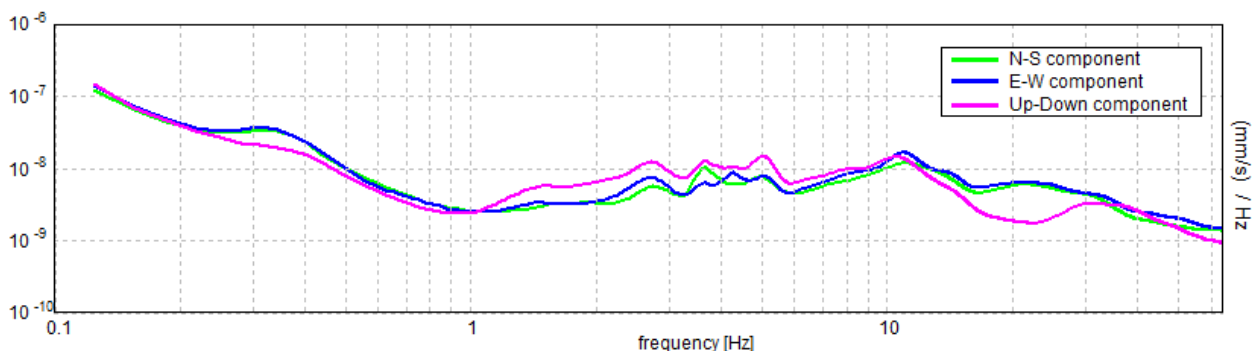
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 22.38 ± 0.69 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$22.38 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$26850.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 1075	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	15.625 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	26.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.49 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03074 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.68777 < 1.11875$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4326 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

- ✓ i primi 3 criteri della voce **1)** definiscono se la registrazione è stata condotta per un tempo sufficientemente lungo rispetto alla frequenza del picco
- ✓ i secondi 6 criteri della voce **2)** dovrebbero stabilire se il picco è significativo dal punto statistico; è consigliato che ne siano soddisfatti il più possibile ma non necessariamente lo devono essere tutti.

Documentazione fotografica



Piazzamento indagine HVSR



Piazzamento indagine MASW

6.2 – Zona sismica

Si riporta una tabella riassuntiva che indica i valori di a_g , espressi come frazione dell'accelerazione di gravità g , da adottare come valore generale di riferimento in ciascuna delle zone sismiche del territorio nazionale.

Zona sismica	Accelerazione orizzontale massima scaricata sul suolo (a_g)
1	0,35 g
2	0,25 g
3	0,15 g
4	0,05 g

Il comune di Montecchio Emilia ricade in zona sismica 3 con una accelerazione massima al suolo (a_g) = 0,15g.

6.3 - Categoria del terreno di fondazione.

Per la modellazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una Indagine sismica di tipo MASW e una Indagine geofisica HVSR con registrazione del microtremore sismico –TROMINO)

Prospezione MASW V_{s30} = **421** m/sec (da p.c. a -30 m)

Da cui si desume che, in base alla misura delle onde di taglio V_{s30} , il terreno corrisponde alla categoria del suolo di fondazione di tipo **B** (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.)

6.4 - Livello di approfondimento

PTCP 2010 e Variante 2019

La tavola QC6 – (200SO) – Rischio sismico Carta degli effetti locali – evidenzia limi e argille (peliti) di piana alluvionale.

La tavola 9a (200SO– PSC 2014)) - Rischio sismico. Carta degli effetti attesi – pone l'area in classe C (amplificazione stratigrafica).

La tavola 9b (200SO - Rischio sismico. Carta dei Livelli di approfondimento indica che si debba effettuare un'analisi semplificata (secondo livello di approfondimento).

6.5 - Analisi semplificata di secondo livello

Fattori di amplificazione

Per il calcolo dei fattori di amplificazione sismica si sono utilizzate le tabelle e formule dell'allegato A2 del DGR 630/2019 (A2.1.2.-Margine tipo A-).

MARGINE di tipo A: caratterizzato da terreni fini o grossolani poco consolidati, di spessore non superiore a 30 m, sovrastanti orizzonti prevalentemente grossolani a comportamento più rigido (indicativamente con valore di V_s media almeno doppio rispetto a quello dei sedimenti sovrastanti); H è riferito allo spessore di sedimenti fini o grossolani poco consolidati sovrastanti i sedimenti continentali più rigidi

A2.1 - Tabelle per il calcolo dei fattori di amplificazione sismica (secondo livello di approfondimento)

Per la stima del fattore di amplificazione (FA) devono essere realizzate indagini geotecniche e geofisiche che permettano di definire lo spessore H del deposito di copertura e la velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato (V_{SH} e V_{S30}) del deposito di copertura.

Per copertura si intende una coltre detritica di origine continentale (alluvionale, eluvio-colluviale, gravitativa, ...) o di alterazione presente dalla superficie al tetto del substrato geologico per un intervallo H non inferiore a 3 m. H è quindi lo spessore della copertura o profondità del substrato rigido, ovvero del *bedrock* sismico,

La velocità equivalente delle onde di taglio è definita dalle formule di seguito riportate:

$$V_{SH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, H è lo spessore totale (in m) dei terreni di copertura, o profondità del tetto del *bedrock* sismico, h_i è lo spessore (in m) dello strato i-esimo (fino al *bedrock* sismico), V_{Si} è la velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al *bedrock* sismico);

Lo spessore delle coperture sciolte continentali sulla formazione marina pliocenica è in zona di circa 30 metri (vedi pozzi e masw).

Per il calcolo del VSH si sono considerati i primi due strati sismici corrispondenti a sedimenti fini o grossolani poco consolidati sovrastanti le ghiaie a comportamento più rigido.

V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,1	1,8	1,5		
10	2,3	2,2	2,0	1,8		
15	2,1	2,1	2,0	1,8		
20	2,1	2,1	2,0	1,9		
25	2,0	2,0	2,0	1,9		
30	1,9	1,9	1,9	1,9		

Fattore di Amplificazione **PGA**

V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,0	1,7	1,5		
10	2,5	2,3	2,0	1,8		
15	2,4	2,4	2,1	1,9		
20	2,3	2,3	2,1	2,0		
25	2,2	2,2	2,1	2,0		
30	2,0	2,0	2,0	1,9		

Fattore di Amplificazione **SAI** (0,1s≤T≤0,5s)

V _{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,9	1,7	1,7	1,6		
10	2,7	2,2	1,9	1,8		
15	3,3	2,9	2,3	2,0		
20	3,4	3,1	2,6	2,2		
25	3,3	3,2	2,8	2,4		
30	3,1	3,1	2,8	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA2**(0,4s≤T≤0,8s)

V _{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,6	1,6	1,6	1,6		
10	2,0	1,8	1,7	1,7		
15	2,9	2,3	2,0	1,9		
20	3,4	2,8	2,3	2,0		
25	3,9	3,4	2,7	2,3		
30	3,8	3,6	3,0	2,5		

Fattore di Amplificazione **SA3** (0,7s≤T≤1,1s)

V _{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,2	1,9	1,7	1,6		
10	2,6	2,4	2,0	1,8		
15	2,6	2,5	2,2	1,9		
20	2,5	2,5	2,3	2,0		
25	2,3	2,3	2,2	2,1		
30	2,1	2,1	2,1	2,0		

Fattore di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)

V _{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,8	1,7	1,6	1,6		
10	2,3	2,0	1,8	1,7		
15	3,2	2,6	2,1	2,0		
20	3,5	3,1	2,5	2,1		
25	3,7	3,4	2,8	2,4		
30	3,6	3,5	3,0	2,6		

Fattore di Amplificazione **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

Risultano i seguenti fattori di amplificazione:

F.A. PGA = 2,1;

F.A. SA1 = 2,0;

F.A. SA2 = 1,7;

F.A. SA3 = 1,6;

F.A. SI1 = 1,9;

F.A. SI2 = 1,7.

Cap. 7 CONSIDERAZIONI FINALI

Il tracciato in progetto raccorda la strada provinciale 28, localmente via E. Curiel, tra il ponte Enza a ovest e l'abitato di Montecchio Emilia a est, con la strada provinciale 12.

I terreni sono sub pianeggianti, adibiti ad uso agricolo e presentano pendenza verso nord – nord est sino all'inversione per la risalita sull'argine alla S.P.28.

Le quote sono comprese tra 108,5 metri s.l.m. a sud e 95,5 metri s.l.m. a nord.

La Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli definisce i terreni oggetto di studio come appartenenti alla Successione neogenico – quaternaria del margine appenninico padano.

Affiorano in particolare terreni appartenenti alla Unità di Modena (**AES8a**): ghiaie e sabbie ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua.

Lo spessore del primo strato di ghiaie, desunto dalle stratigrafie dei pozzi, è compreso tra 3 e 4,5 nel settore nord del tracciato e tra 10 e 12,5 presso Cà Lunga.

La falda freatica superficiale è impostata in questo spessore di ghiaia, risente fortemente delle precipitazioni e del livello di acqua nell'Enza; l'escursione stagionale è notevole.

Nel corso delle prove, nel maggio 2021, il livello di falda è stato misurato a 3 metri sotto il piano di campagna (prova 7).

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite otto prove penetrometriche statiche e dinamiche con penetrometro statico/dinamico a punta meccanica.

Per la caratterizzazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica:

- Prospezione geofisica (**MASW**) e indagine in sismica passiva (**HVSR**).

Dalle prove penetrometriche eseguite e dall'analisi della stratigrafia dei pozzi di zona, risulta che il tetto delle ghiaie è generalmente compreso, lungo il tracciato, tra 0,6 e 1,8 metri fatta eccezione per la prova n.7.

Le coperture sulle ghiaie sono date da argille prevalenti, argille limose e livelli sabbiosi più in profondità.

L'elaborazione dei dati acquisiti dalla MASW e dalla sismica passiva HVSR ha determinato una velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 metri sotto il piano di posa delle fondazioni: $V_{s30} = 421 \text{ m/sec}$.

La categoria del sottosuolo è la B.

Dall'Indagine sismica Microtremori (misura HVSR) si evidenzia un picco con frequenza (f) principale a 22,38 Hz.

Reggio Emilia, dicembre 2021

Dott. Geol. Paolo Melli