

COMUNE DI CASINA

ING. FABIO FILIPPI – STUDIO TECNICO

Via Don Pasquino Borghi n. 2 – CASINA

Tel. E fax: 0522609766

Email: fabiofilippi@libero.it

C.F. FLPFBA57B05B967G – p. iva:01083900355

PROGETTISTA E D.L.

Ing. Fabio Filippi

COMMITTENTI:

Filippi Fabio (Mapp. 9-37)

Filippi Marco (Mapp. 9)

Guidetti Daniela (Mapp. 38)

DATA

10-09-2021

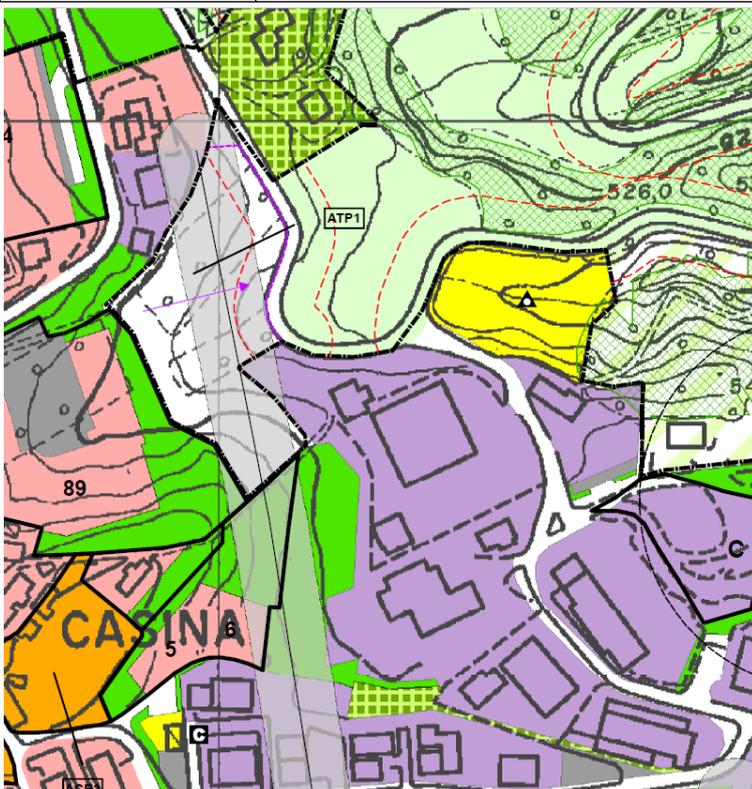
AGGIORNAMENTO

PROGETTO: Accordo Operativo AMBITO Territoriale Produttivo ATP1

Sito in Via Don Pasquino Borghi – Fg. 52, Mapp. 9-37-38 – Comune di Casina (RE)

12R

RELAZIONE GEOLOGICO SISMICA E ANALISI GEOTECNICA
DEL TERRENO



Dott. Geol. Paolo Melli

Dott. Geol. Chiara Filippi



INDICE

Premessa	pag. n. 3
Cap. 1 - Ubicazione e Morfologia	pag. n. 4
Cap. 2 - Inquadramento Geomorfologico	pag. n. 4
Cap. 3 - Cenni di idrogeologia	pag. n. 6
Cap. 4 - Stabilità dell'area	pag. n. 6
Cap. 5 - Indagini dirette	pag. n. 7
Cap. 6 - Indagine sismica HVSR, VS ₃₀ e valutazione degli effetti sismici di sito	pag. n. 25
Cap. 7 - Considerazioni conclusive	pag. n.47

PREMESSA.

Lo studio e le indagini relative al progetto : A.O. Ambito ATP1, in via Don Pasquino Borghi a Casina (RE) sono stati eseguiti secondo quanto disposto dal DM 17/01/2018 e dal D.G.R. 630 del 29/04/2019.

Si sono confrontati i dati emersi con altri lavori svolti in zona e con studi ufficiali esistenti; in particolare con la Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli.

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite quattro prove penetrometriche con penetrometro statico dinamico Pagani a punta meccanica (**CPT1**, **CPT2** e **DPSH2**, **DPSH3** e **CPT4**).

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

- prospezione geofisica con il metodo sismico **MASW** (multichannel analysis of surface waves);
- indagine geofisica passiva a stazione singola **HVSR** (TROMINO).

Per la presente relazione sono stati consultati elementi del PTCP 2010 di Reggio Emilia e tavole e schede del PSC di Casina.

Cap 1 - UBICAZIONE E MORFOLOGIA

La posizione in oggetto si trova a Casina (RE) in via Don Pasquino Borghi – fg. 52, mapp. 9-37-38.

I terreni sono a nord ovest dell'area artigianale di Casina (RE).

La condizione morfologica è di vallecchia di versante, con asse ovest-est e inclinazione verso est.

Le quote topografiche sono comprese tra 540 e 560 m s.l.m., circa.

Confina a est e a valle con la ex S.S.63.

Cap 2 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

L'area in oggetto insiste su rocce appartenenti alla Formazione di Pantano (**Pat**) presenti in un ampio intorno che comprende l'abitato di Casina.

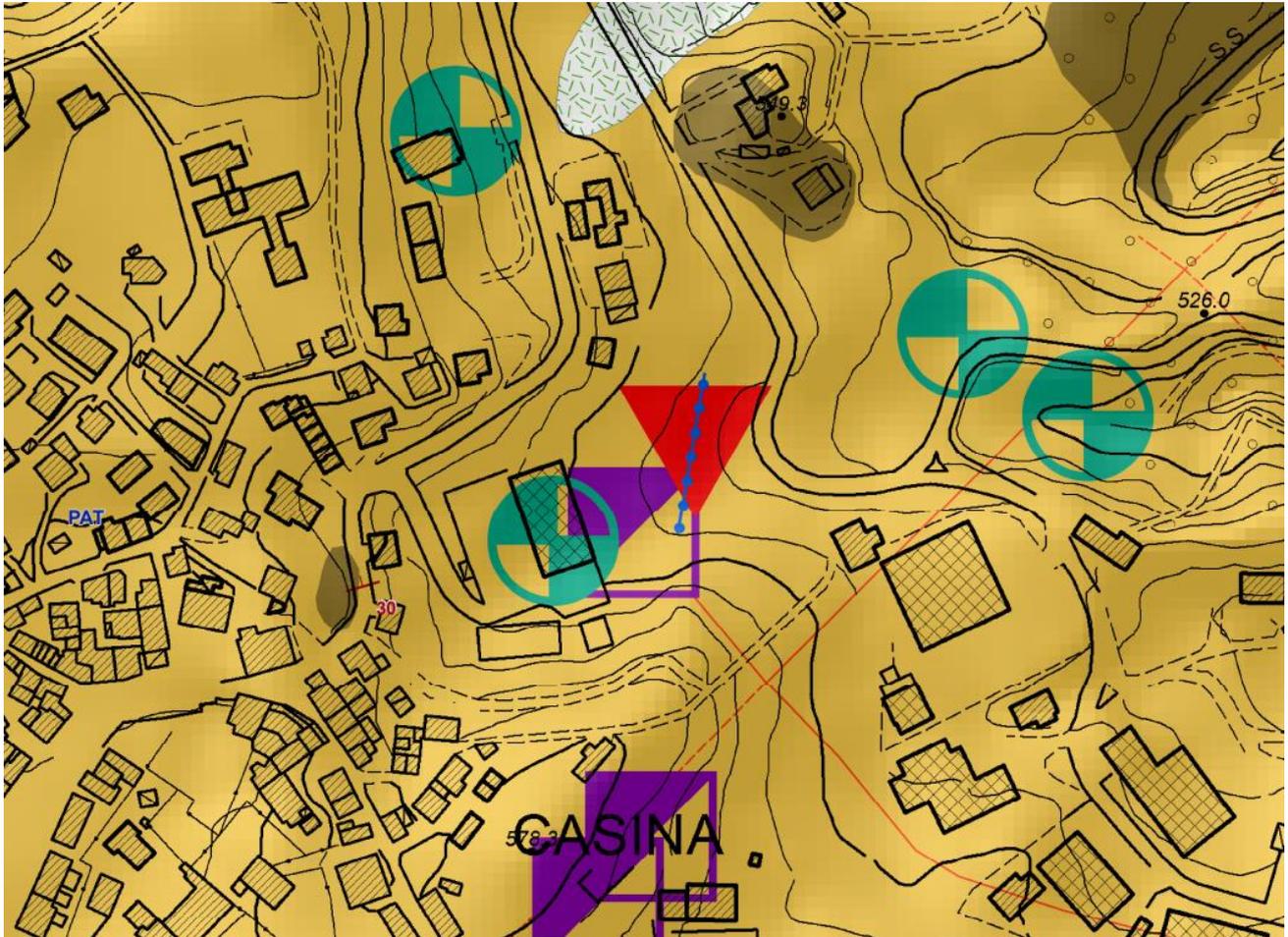
Si tratta di Areniti finissime, grigie, alternate a peliti marnose e siltose; la stratificazione è generalmente poco marcata o impercettibile a causa dell'intensa bioturbazione.

Localmente alternanze decimetriche di strati arenitici fini bioturbati e di areniti finissime marnose grigie con stratificazione non sempre ben definita.

Sono affioranti a monte del supermercato Sigma nella scarpata stradale (una misura di strato indica immersione verso Nord con inclinazione di 30°) e a nord dell'area lungo la ex S.S.63; presentano debole copertura sciolta soprattutto nel fianco nord della vallecchia.

Le prove penetrometriche evidenziano scarse coperture sciolte prevalentemente sabbioso limose, tranne che nella CPT1 dove seguono argille prevalenti sino a 6,6 metri.

Tutte le prove terminano a rifiuto in roccia in posto.



Legenda

Province



Comuni



Griglia 10.000



Prove lineari

— prova ReMi

Prove puntuali

• misure di microtremore a stazione singola (HVSR)

• prova dinamica con penetrom. superpesante (DPSH)

• prova dinamica con penetrometro medio (DPM)

— forme geomorf./antrop. (10K)
 — orlo di terrazzo fluviale

Punti di osservaz. e misura (10K)



stratificazione dritta

Coperture quaternarie (10K)

— a3 - Deposito di versante s.l.

Limiti di unità geologiche (10K)

— faglia certa

— faglia incerta

Affioramenti (aree) (10K)



Unità geologiche (10K)

— PAT - Formazione di Pantano

Cap 3 - CENNI DI IDROGEOLOGIA

La formazione marina presente in zona (Pat) possiede permeabilità limitata per porosità o per fratturazione.

Le soprastanti coperture sciolte limoso sabbioso argillose presentano un medio basso grado di permeabilità.

Le acque di superficie grazie alla posizione di versante sono limitate alle acque piovane di proiezione diretta e provenienti dalle aree sovrastanti.

Esse sono correttamente raccolte nel fossato in asse alla vallecola e a valle nella cunetta di monte della ex S.S.63.

Nell'area di influenza non sono segnalate sorgenti.

Le prove penetrometriche statiche e dinamiche non hanno evidenziato presenza di acqua in falda o di impregnazione.

Cap 4 - STABILITÀ DELL'AREA

La carta inventario del dissesto (PAI-PTCP) non evidenzia alcun tipo di frana o dissesto.

Le condizioni geomorfologiche, la presenza di roccia in posto a breve profondità, l'assenza di acque nel sottosuolo e di tracce di passati fenomeni gravitativi, indicano che i terreni in esame sono stabili..

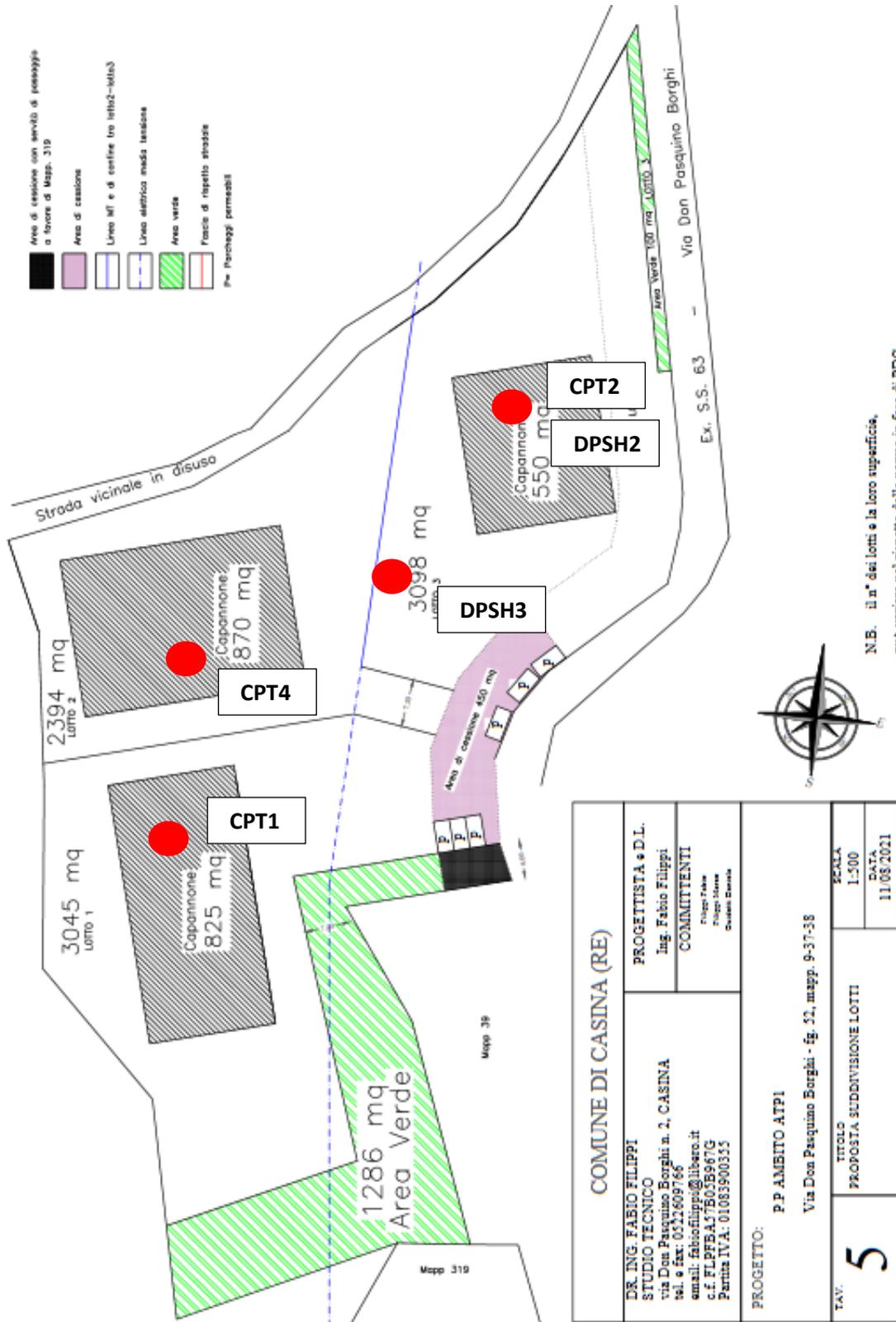
Cap. 5 INDAGINI DIRETTE

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite quattro prove penetrometriche con penetrometro statico dinamico Pagani a punta meccanica (CPT1, CPT2 e DPSH2, DPSH3 e CPT4).

Si osserva, nella foto seguente, la roccia alterata affiorante in prossimità della DPSH3.



Si riportano di seguito l'ubicazione e i tabulati delle resistenze.



N.B. il n° dei lotti e la loro superficie, può variare nel rispetto delle norme in fase di PDC

5.1 - Prove penetrometriche

CPT1

La CPT1 si è spinta sino ad una profondità di 7 m dal p.c.

Lo spessore delle coperture sciolte è costituito da sabbie limose fino a 1,2 metri, seguito da argille prevalenti fino a 6,6 metri.

Al fondo si va a rifiuto nel substrato (PAT) con R_p pari a 250 bar.

I valori di R_p nelle coperture sono mediamente di 20 bar.

A termine prova non è stata rinvenuta acqua nel foro di sonda.



ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: geol. Chiara Filippi

Localita': Casina

Data: 14/09/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. 1

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	46	62
0,6	38	53
0,8	38	52
1,0	42	57
1,2	28	39
1,4	24	41
1,6	23	40
1,8	21	40
2,0	21	41
2,2	18	38
2,4	18	39
2,6	19	40
2,8	18	36
3,0	18	35
3,2	15	33
3,4	16	32
3,6	18	32
3,8	19	33
4,0	18	33
4,2	18	32
4,4	19	33
4,6	17	30
4,8	19	33
5,0	22	39
5,2	20	42
5,4	21	38
5,6	22	38
5,8	20	38
6,0	18	33
6,2	18	32
6,4	18	32
6,6	29	62
6,8	115	200
7,0	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	4,6	106,7	2,32	Sabbia limosa	19,5	7,7	7,7	0,0
0,6	3,8	100,0	2,63	Sabbia limosa	19,5	11,6	11,6	0,0
0,8	3,8	93,3	2,46	Sabbia limosa	19,5	15,5	15,5	0,0
1,0	4,2	100,0	2,38	Sabbia limosa	19,5	19,4	19,4	0,0
1,2	2,8	73,3	2,62	Sabbia limosa	19,5	23,3	23,3	0,0
1,4	2,4	113,3	4,72	Argilla	18,0	26,9	26,9	0,0
1,6	2,3	113,3	4,93	Argilla	18,0	30,5	30,5	0,0
1,8	2,1	126,7	6,03	Argilla	18,0	34,1	34,1	0,0
2,0	2,1	133,3	6,35	Argilla	18,0	37,7	37,7	0,0
2,2	1,8	133,3	7,41	Torba	17,5	41,2	41,2	0,0
2,4	1,8	140,0	7,78	Torba	17,5	44,7	44,7	0,0
2,6	1,9	140,0	7,37	Torba	17,5	48,2	48,2	0,0
2,8	1,8	120,0	6,67	Argilla	18,0	51,8	51,8	0,0
3,0	1,8	113,3	6,30	Argilla	18,0	55,4	55,4	0,0
3,2	1,5	120,0	8,00	Torba	17,5	58,9	58,9	0,0
3,4	1,6	106,7	6,67	Torba	17,5	62,4	62,4	0,0
3,6	1,8	93,3	5,19	Argilla	18,0	66,0	66,0	0,0
3,8	1,9	93,3	4,91	Argilla	18,0	69,6	69,6	0,0
4,0	1,8	100,0	5,56	Argilla	18,0	73,2	73,2	0,0
4,2	1,8	93,3	5,19	Argilla	18,0	76,8	76,8	0,0
4,4	1,9	93,3	4,91	Argilla	18,0	80,4	80,4	0,0
4,6	1,7	86,7	5,10	Argilla	18,0	84,0	84,0	0,0
4,8	1,9	93,3	4,91	Argilla	18,0	87,6	87,6	0,0
5,0	2,2	113,3	5,15	Argilla	18,0	91,2	91,2	0,0
5,2	2,0	146,7	7,33	Torba	17,5	94,7	94,7	0,0
5,4	2,1	113,3	5,40	Argilla	18,0	98,3	98,3	0,0
5,6	2,2	106,7	4,85	Argilla	18,0	101,9	101,9	0,0
5,8	2,0	120,0	6,00	Argilla	18,0	105,5	105,5	0,0
6,0	1,8	100,0	5,56	Argilla	18,0	109,1	109,1	0,0
6,2	1,8	93,3	5,19	Argilla	18,0	112,7	112,7	0,0
6,4	1,8	93,3	5,19	Argilla	18,0	116,3	116,3	0,0
6,6	2,9	220,0	7,59	Argilla	18,0	119,9	119,9	0,0
6,8	11,5	566,7	4,93	Argilla limosa	18,5	123,6	123,6	0,0
7,0	25,0	326,7	1,31	Sabbia	20,0	127,6	127,6	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	Sabbia limosa	5	53	44,5		16	14,9		54,0	300
0,6	Sabbia limosa	8	45	42,7		10,3	14,1		68,0	287
0,8	Sabbia limosa	9	43	41,7		8	14,6		83,0	287
1,0	Sabbia limosa	9	43	41,2		7	16,2		99,0	294
1,2	Sabbia limosa	13	35	39,0		4,3	12,4		101,0	267
1,4	Argilla	21			94,9	26,9	19,5	0,129	293,0	258
1,6	Argilla	23			90,8	22,6	18,7	0,132	281,0	256
1,8	Argilla	27			82,6	18,4	17	0,147	255,0	250
2,0	Argilla	29			82,5	16,6	17	0,151	255,0	250
2,2	Torba	34			70,4	13	14,5	0,165	218,0	242
2,4	Torba	36			70,2	11,9	14,4	0,170	216,0	242
2,6	Torba	35			74,09	11,7	15,2	0,165	228,0	245
2,8	Argilla	35			69,9	10,2	14,4	0,155	216,0	242
3,0	Argilla	36			69,8	9,6	14,3	0,150	215,0	242
3,2	Torba	42			57,6	7,4	11,8	0,173	177,0	232
3,4	Torba	40			61,5	7,5	12,6	0,155	189,0	235
3,6	Argilla	35			69,4	8	14,3	0,135	215,0	242
3,8	Argilla	35			73,2	8	15,1	0,132	227,0	245
4,0	Argilla	38			69,09	7,1	14,2	0,140	213,0	242
4,2	Argilla	38			68,9	6,8	14,2	0,135	213,0	242
4,4	Argilla	37			72,8	6,9	15	0,132	225,0	245
4,6	Argilla	40			64,59	5,8	13,3	0,134	200,0	238
4,8	Argilla	38			72,5	6,3	14,9	0,132	224,0	245
5,0	Argilla	37			84,4	7	17,3	0,135	260,0	253
5,2	Torba	44			76,2	6,1	15,7	0,164	236,0	247
5,4	Argilla	40			80,09	6,2	16,5	0,138	248,0	250
5,6	Argilla	38			83,9	6,2	17,3	0,131	260,0	253
5,8	Argilla	43			75,8	5,4	15,6	0,146	234,0	247
6,0	Argilla	44			67,59	4,7	13,9	0,140	209,0	242
6,2	Argilla	44			67,5	4,5	13,9	0,135	209,0	242
6,4	Argilla	45			67,3	4,4	13,8	0,135	207,0	242
6,6	Argilla	42			111,2	7	22,9	0,167	344,0	270
6,8	Argilla limosa	21			455,1	28	93,8	0,132	1407,0	370
7,0	Sabbia	6	68	39,1		3,8	62,7		556,0	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

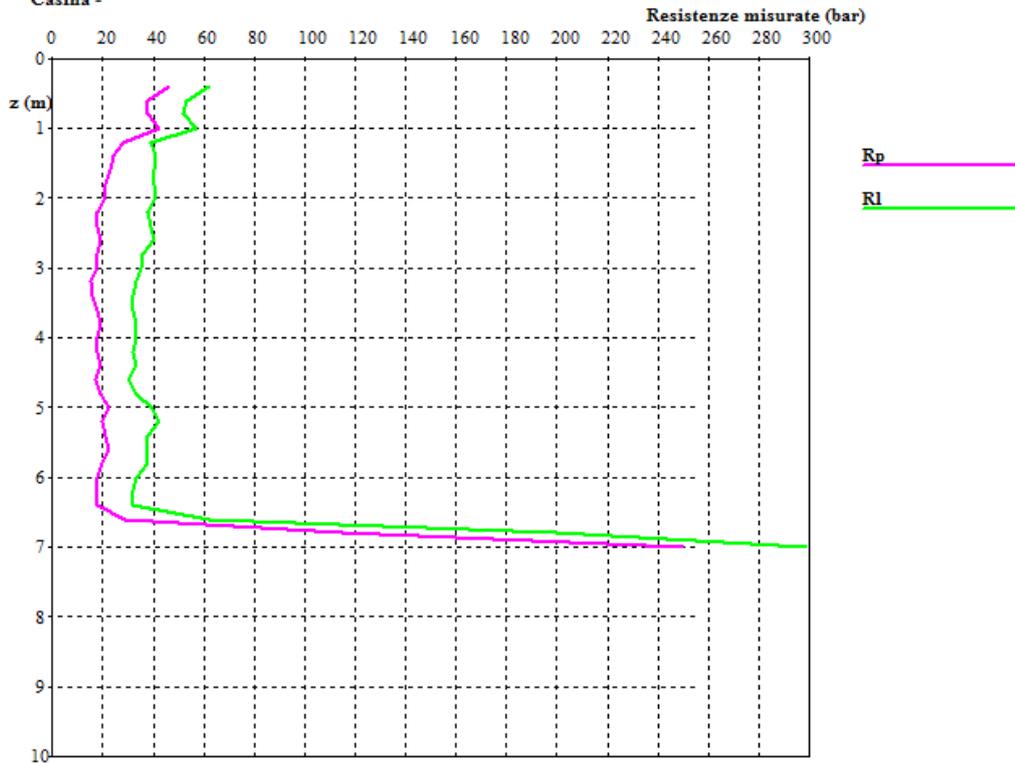
M = modulo confinato (MPa)

Cc = indice di compressibilità (-)

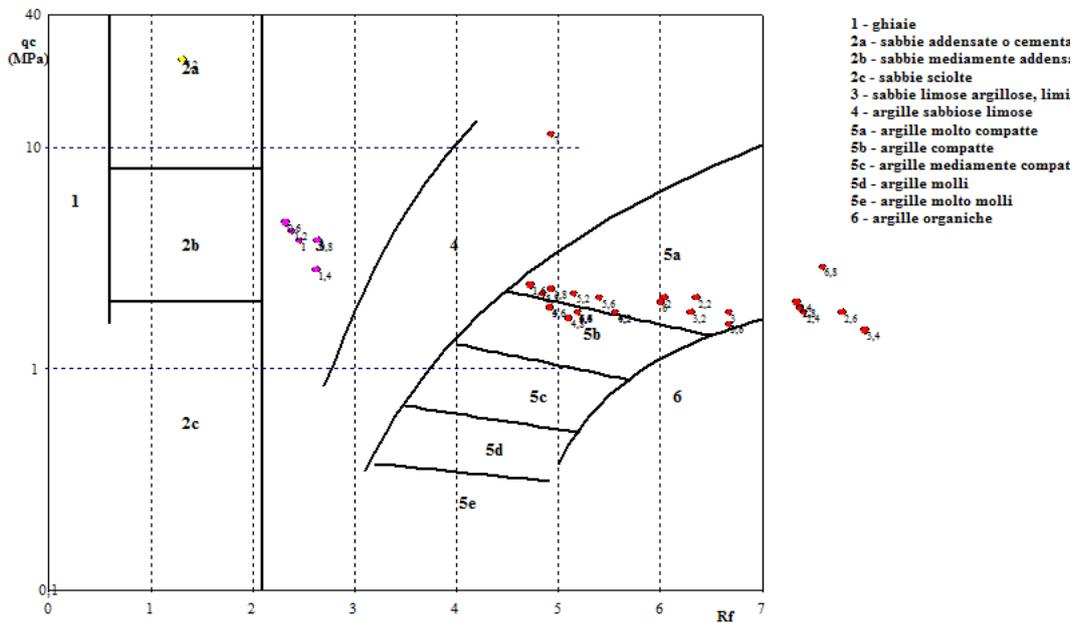
Go = modulo di taglio (MPa)

Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica 1
 Casina -



Prova Penetrometrica Statica 1 Casina -
 Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



CPT2

La **CPT2**, che evidenzia fin dall'inizio roccia alterata sabbiosa e argilloso limosa, si è spinta sino al rifiuto ad una profondità di 1,2 m dal p.c.

I valori di R_p sono in aumento da 40 bar a 250 bar.



CPT2

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: geol. Chiara Filippi

Localita': Casina

Data: 14/09/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. 2

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	RI
0,4	41	64
0,6	88	102
0,8	110	178
1,0	200	240
1,2	250	299

z = profondità

Rp = resistenza di punta (bar)

RI = resistenza d'attrito (bar)

VALORI CALCOLATI

z	Qc	Fs	Rf	L	g	sv	sv'	Uo
0,4	4,1	153,3	3,74	Argilla limosa	18,5	7,5	7,5	0,0
0,6	8,8	93,3	1,06	Sabbia	20,0	11,5	11,5	0,0
0,8	11,0	453,3	4,12	Argilla limosa	18,5	15,2	15,2	0,0
1,0	20,0	266,7	1,33	Sabbia	20,0	19,2	19,2	0,0
1,2	25,0	326,7	1,31	Sabbia	20,0	23,2	23,2	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 limosa	9			163,69	30	33,7	0,116	506,0	292
0,6	Sabbia	0	66	44,4		16,6	22,8		83,0	348
0,8	Argilla limosa	8			439,4	30	90,6	0,121	1359,0	366
1,0	Sabbia	1	87	42,8		17,2	36,1		145,0	420
1,2	Sabbia	1	92	42,1		16,7	41,4		174,0	442

z = profondità (m)

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

Id = indice di densità (%)

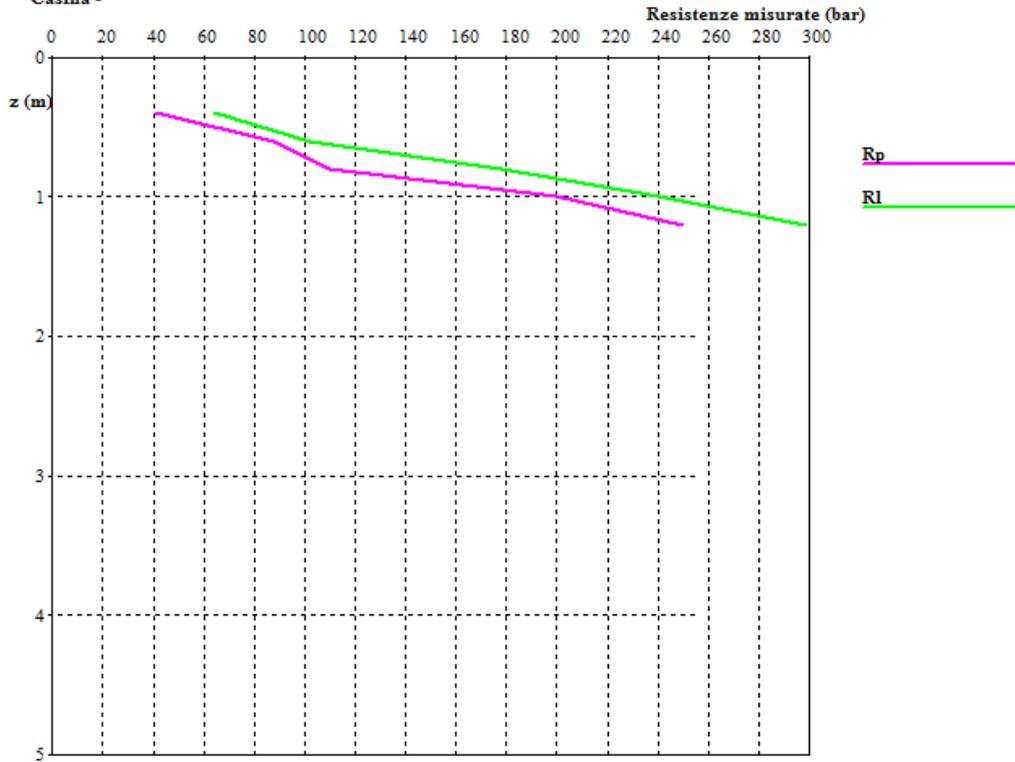
f = angolo d'attrito (°)

Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)

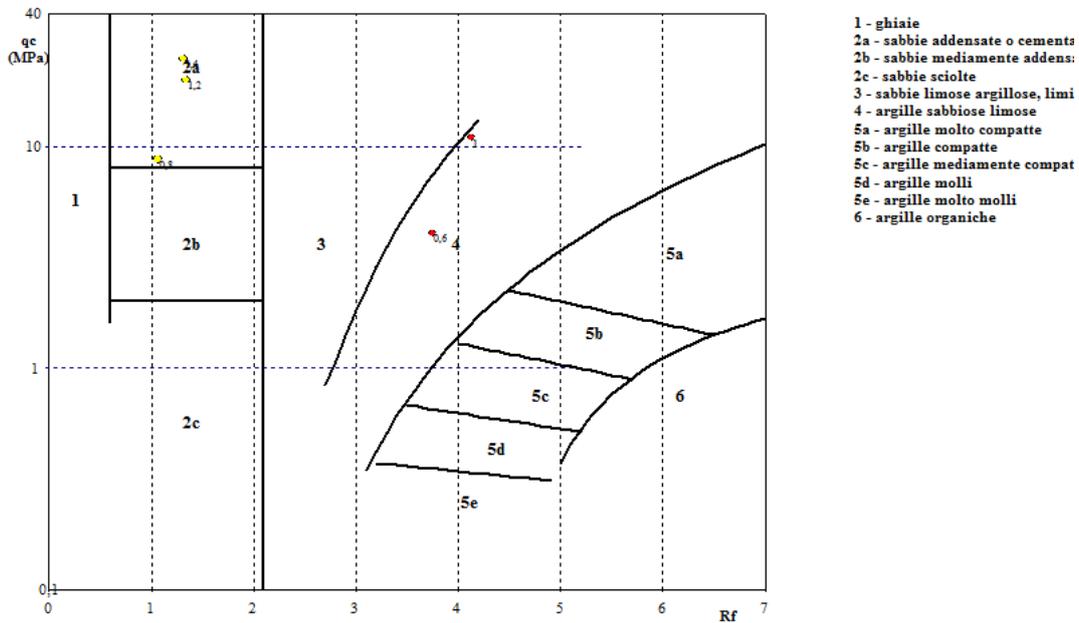
OCR = grado di sovraconsolidamento

M = modulo confinato (MPa)

Prova Penetrometrica Statica 2
 Casina -



Prova Penetrometrica Statica 2 Casina -
 Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



La prova è stata continuata in modalità dinamica.

DPSH2

La **DPSH2** evidenzia nei primi 30 cm roccia alterata, N60 (numero colpi standardizzato) =45.

Segue l'ingresso in uno strato con N60 di 75 seguito da rifiuto a 1,8 metri.

A termine prova non è stata rinvenuta acqua.

DPSH2

ANALISI PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE CONTINUE

Committente: geol. Chiara Filippi

Localita': Casina

Data: 14/09/2021

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. 2

VALORI DI N

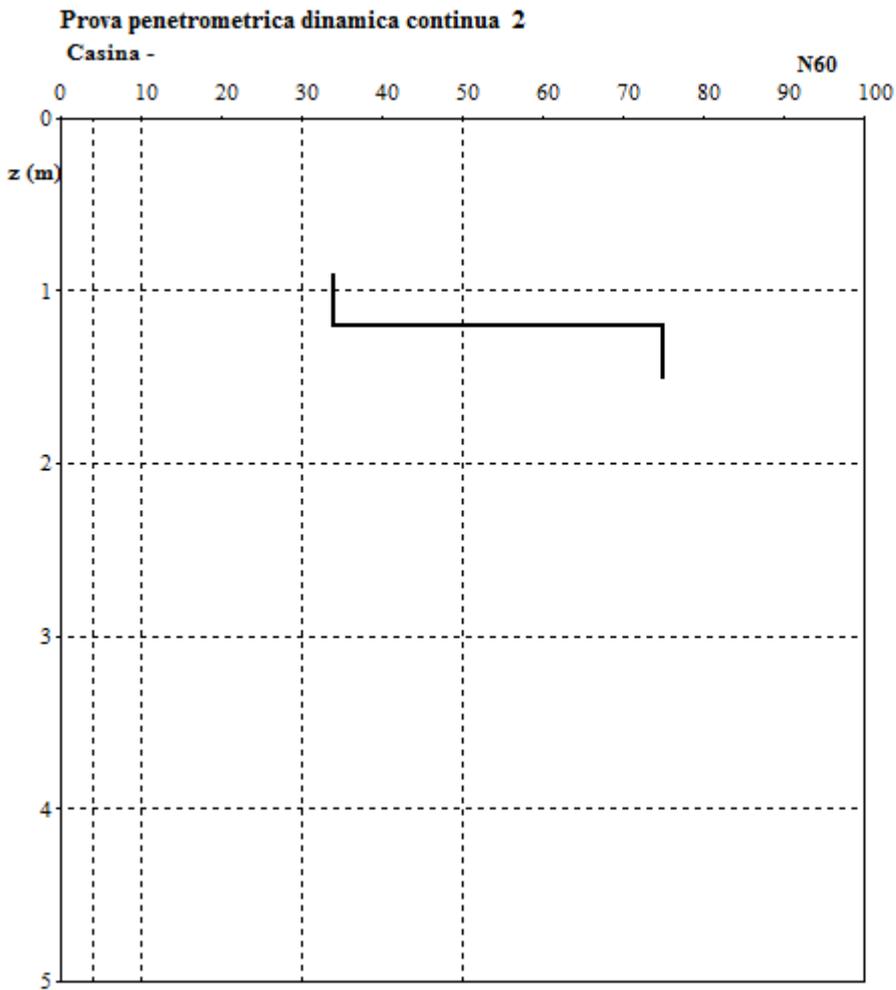
z (m)	N	N60	Nc
0,3	45	34	68
0,6	100	75	136

z = profondità

N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica



DPSH3

La **DPSH3** evidenzia da subito ingresso in roccia alterata con aumento degli N60 con la profondità.

Si ha rifiuto con N60 di 75 a 1,8 metri.

A termine prova non è stata rinvenuta acqua.



DPSH3

ANALISI PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE CONTINUE

Committente: geol. Chiara Filippi
Localita': Casina

Data: 14/09/2021

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. 3

VALORI DI N

z (m)	N	N60	Nc
0,3	5	4	8
0,6	6	5	10
0,9	12	9	18
1,2	23	17	34
1,5	46	35	67
1,8	100	75	128

z = profondità

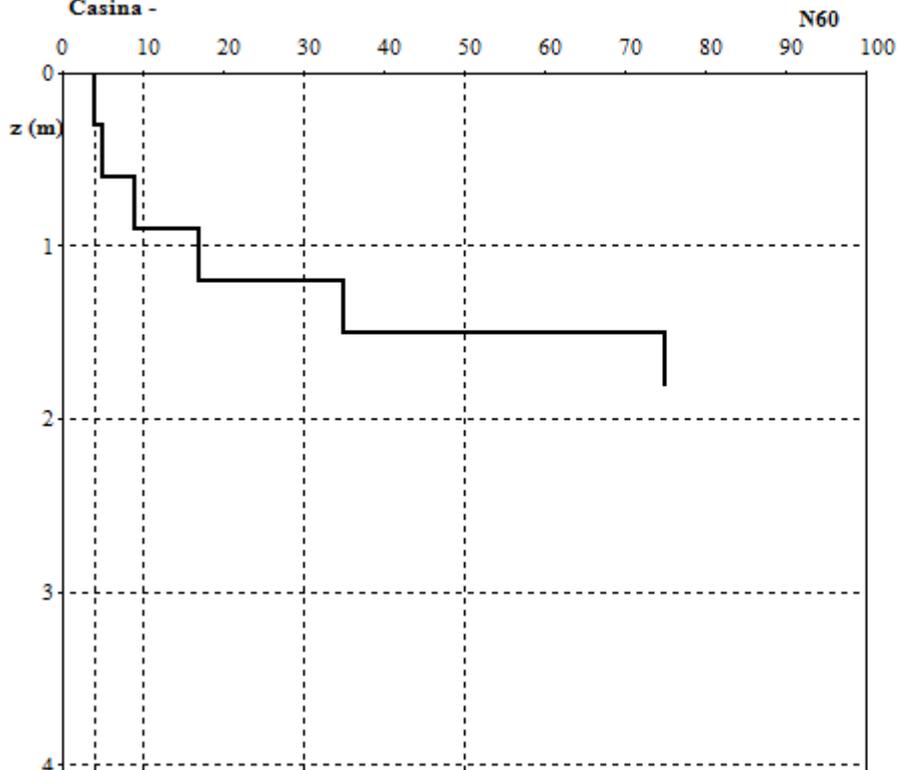
N = numero colpi originale

N60 = numero colpi standardizzato

Nc = numero dei colpi corretto per la pressione litostatica

Prova penetrometrica dinamica continua 3

Casina -



CPT4

La **CPT4** si è spinta sino ad una profondità di 2 m dal p.c.

La prova evidenzia l'ingresso in roccia alterata prevalentemente sabbiosa, a 0,6 metri sotto il p.c..

Si ha poi un aumento delle resistenze sino a rifiuto nel substrato, a 2 metri, (PAT) con R_p pari a 250 bar.

A termine prova non è stata rinvenuta acqua nel foro di sonda.



CPT4

ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: geol. Chiara Filippi

Localita': Casina

Data: 14/09/2021

Passo delle misure = 20,00 cm.

PROVA PENETROMETRICA STATICA n. 4

VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	Rl
0,4	12	31
0,6	45	60
0,8	53	78
1,0	53	73
1,2	47	72
1,4	52	71
1,6	62	120
1,8	185	290
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	1,2	126,7	10,56	Torba	17,5	7,3	7,3	0,0
0,6	4,5	100,0	2,22	Sabbia limosa	19,5	11,2	11,2	0,0
0,8	5,3	166,7	3,14	Sabbia limosa	19,5	15,1	15,1	0,0
1,0	5,3	133,3	2,52	Sabbia limosa	19,5	19,0	19,0	0,0
1,2	4,7	166,7	3,55	Argilla limosa	18,5	22,7	22,7	0,0
1,4	5,2	126,7	2,44	Sabbia limosa	19,5	26,6	26,6	0,0
1,6	6,2	386,7	6,24	Argilla	18,0	30,2	30,2	0,0
1,8	18,5	700,0	3,78	Sabbia limosa	19,5	34,1	34,1	0,0
2,0	25,0	326,7	1,31	Sabbia	20,0	38,1	38,1	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)

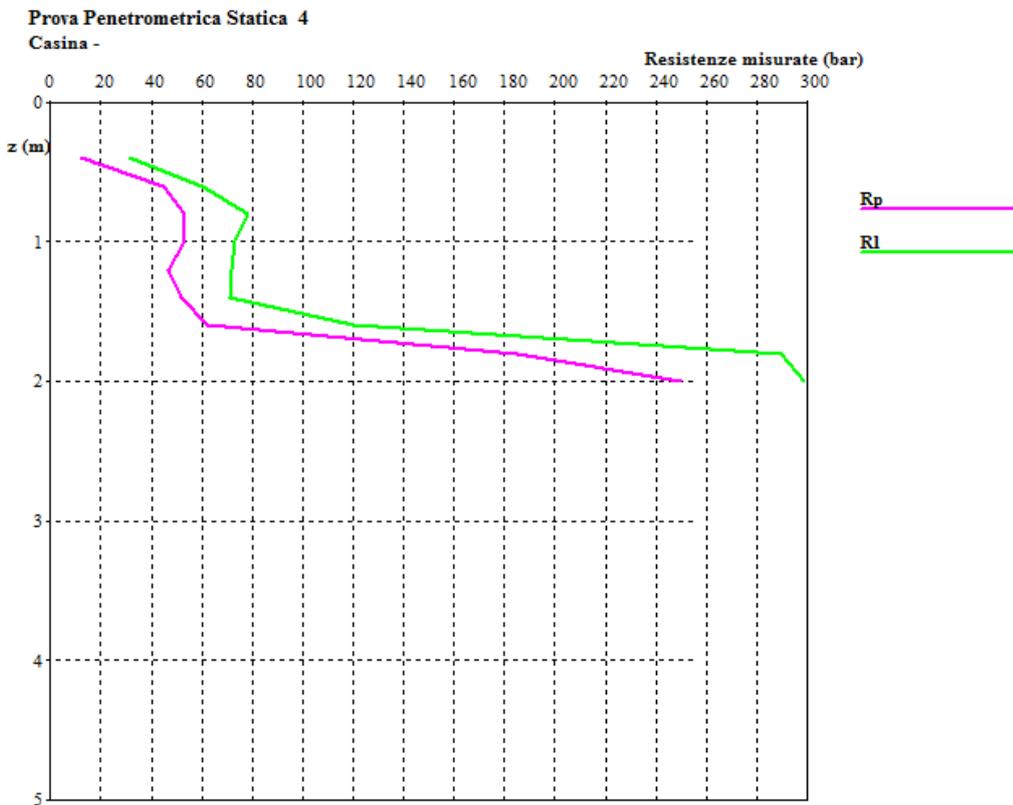
sv' = tensione litostatica effettiva (kPa)

Uo = pressione nei pori (kPa)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

z	L	CF	Id	f	Su	OCR	M	Cc	Go	Vs
0,4	Torba	26			47,7	30	9,8	0,207	147,0	220
0,6	Sabbia limosa	6	49	43,3		11,7	15,6		69,0	298
0,8	Sabbia limosa	9	50	42,7		10,1	18,1		88,0	310
1,0	Sabbia limosa	8	48	41,9		8,2	18,8		103,0	310
1,2	Argilla limosa	12			187,1	30	38,5	0,114	578,0	301
1,4	Sabbia limosa	10	45	40,7		6	19,4		129,0	308
1,6	Argilla	18			246,8	30	50,9	0,149	764,0	321
1,8	Sabbia limosa	9	75	42,2		10,5	41,1		210,0	413
2,0	Sabbia	2	84	41,7		11,3	47,6		244,0	442

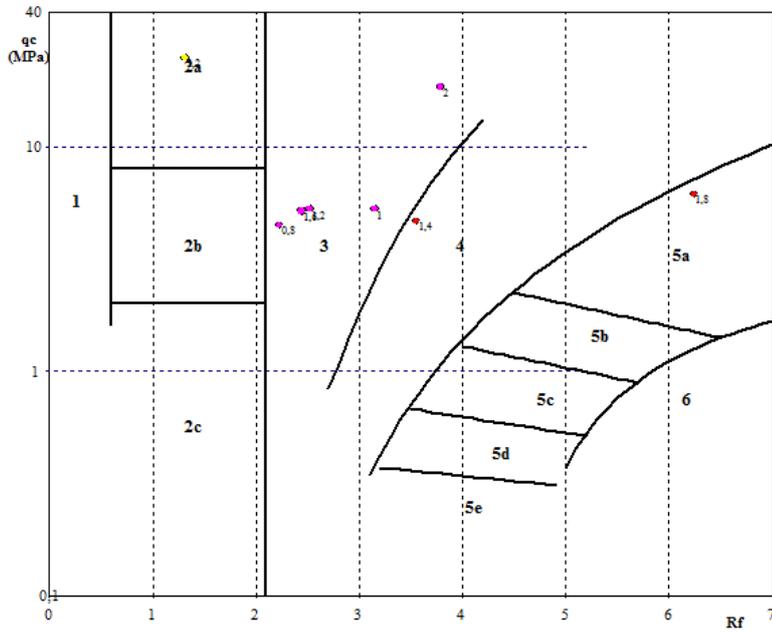
- z = profondità (m)
- CF = contenuto di fine [passante al 200] (%)
- Id = indice di densità (%)
- f = angolo d'attrito (°)
- Su = resistenza al taglio non drenata (kPa)
- OCR = grado di sovraconsolidamento
- M = modulo confinato (MPa)
- Cc = indice di compressibilità (-)
- Go = modulo di taglio (MPa)
- Vs = velocità onde di taglio (m/s)



Prova Penetrometrica Statica 4

Casina -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



- 1 - ghiaie
- 2a - sabbie addensate o cements
- 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

Cap. 6 – INDAGINE SISMICA HVSR, VS₃₀ 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 è stata eseguita una Indagine geofisica HVSR e una MASW.

6.1 – MASW e HVSr

Tecnogeofisica s.n.c.

COMMITTENTE:

Dott. Geol. Chiara Filippi

Via Roma, 3

42034 Casina (RE)

COMMESSA:

Indagine geofisica

Valutazione V_{s_n} con metodologia MASW

Indagine HVSr

LOCALITA':

via don P. Borghi

Casina (RE)

DATA:

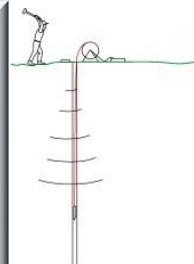
Settembre 2021

Via S. Cattania, 1/a

41012 Carpi (MO)

info@tecnogeofisica.com

www.tecnogeofisica.com



INDAGINE GEOFISICA

Committente:

Dott. Geol. Chiara Filippi

Via Roma, 3

42034 Casina (RE)

Intervento:

Indagine MASW

Indagine HVSr

Località:

via don P. Borghi

Casina (RE)

INDICE

Premessa	28
Caratteristiche attrezzatura	30
Indagine MASW	31
Interpretazione dati acquisiti	34
Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto V_{sh} o per il caso in esame V_{S30})	36
Indagine sismica Microtremori (misura HVSr)	38
Allegati Intervento	41
Ubicazione indagini	41
Scheda Indagine Masw	42
Scheda Indagine HVSr	43
Documentazione fotografica	46

Premessa

Il giorno 15 settembre 2021, su commissione di:

Dott. Geol. Chiara Filippi

Via Roma, 3

42034 Casina (RE)

Sono state effettuate una prova sismica tipo MASW (Multichannel Spectral Analysis of Waves) e una prova HVSr in un terreno sito in via don P. Borghi a Casina (RE).

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

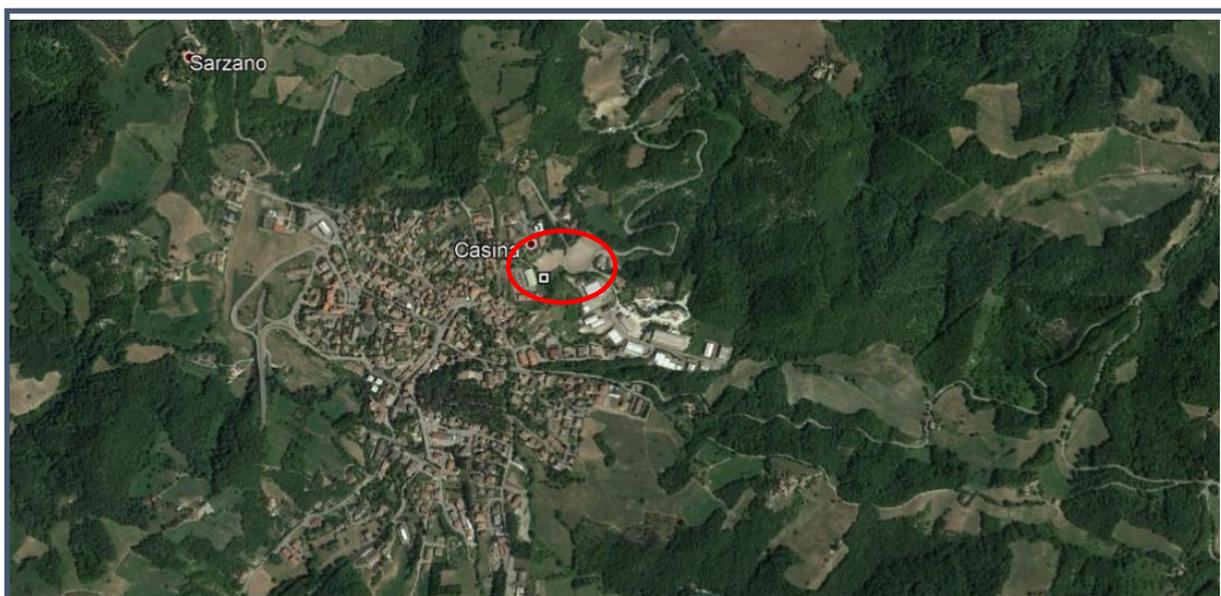


Fig.1 Ubicazione area di indagine

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 44,512069 Long. E 10,502845
HVSr						Lat. N 44,512176 Long. E 10,502935

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>Depositati 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>Depositati 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 Vs 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 Vs/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

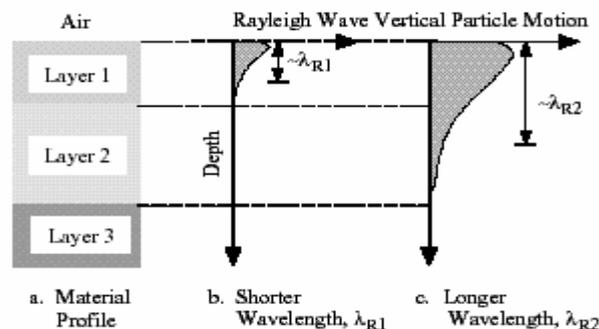
La Base Masw eseguita, per le possibilità operative presenti in corrispondenza del sito di intervento, presenta (Compreso il punto di shot) la geometria come indicato:

➤ 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 sismica 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 Vs e dalla frequenza. (Stokoe II and Santamarina, 2000).

La relazione quindi che meglio consente di valutare la profondità di indagine 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 indagine 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)



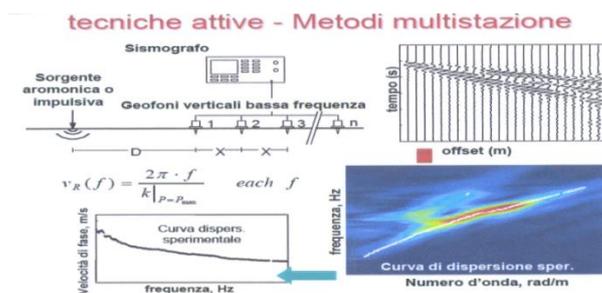
Fig. 3: sismogramma che evidenzia l'arrivo distinto di onde P, S e di Rayleigh (da Crespellani e Facciorusso "Dinamica dei terreni")

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).

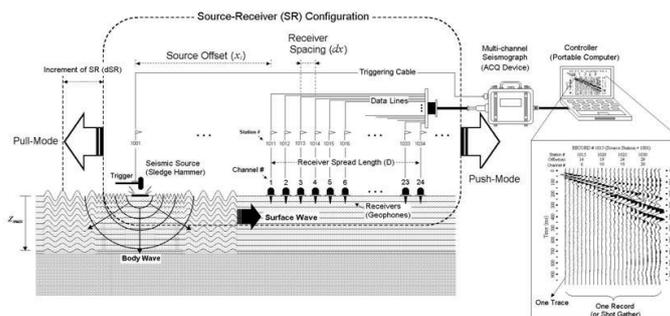
Tale tecnica come d'altronde anche la Masw, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è notorio che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

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.

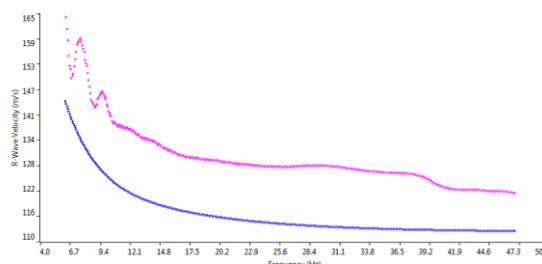
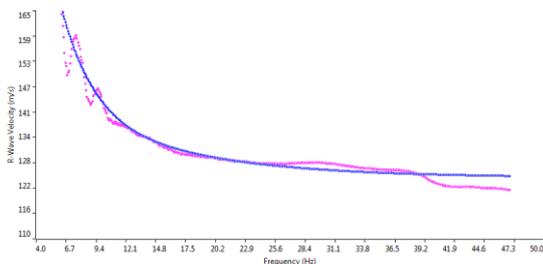
L’obiettivo finale cioè l’ottenimento di un profilo verticale delle Vs, minimizzando le imprecisioni (risultati random), ottenendo quindi un modello ad elevata attendibilità e fortemente rappresentativo, mediante le tarature, del reale profilo Vs/profondità del sito in analisi, come d’altronde suggerito 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.



<p>Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica (blu) ottenuta dal processo inversione Masw dominio frequenza/velocità.</p> <p>Si noti la quasi perfetta corrispondenza del fitting fra le due curve</p>	<p>Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica “alterata” modificando le Vs diminuendole erroneamente del 10% (blu) dominio frequenza/velocità.</p> <p>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</p>
--	--

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 Vs risultano pertanto:

metodo sismico attivo-MASW onde Rayleigh:

1° strato: da 0,0 a 0,90 m	spessore medio 0,90 m	velocità media onde Vs 160 m/sec
2° strato: da 0,90 a 3,25 m	spessore medio 2,35 m	velocità media onde Vs 200 m/sec
3° strato: da 3,25 a 7,50 m	spessore medio 4,25 m	velocità media onde Vs 257 m/sec
4° strato: da 7,50 a 16,10 m	spessore medio 8,60 m	velocità media onde Vs 480 m/sec
5° strato: da 16,10 a 22,00 m	spessore medio 5,90 m	velocità media onde Vs 520 m/sec
6° strato: da 22,00 a ≥30,00 m	spessore medio ≥8,00 m	velocità media onde Vs 650 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 Vs direttamente misurate, consentendo di ottenere la Vs₃₀, 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} = **397** m/sec (da p.c. a -30 m)

Da cui si presume che, in base alla misura delle onde di taglio Vs₃₀, 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 Vs 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:

$$f_1 = 1/T_1$$

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:

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

la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

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

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.

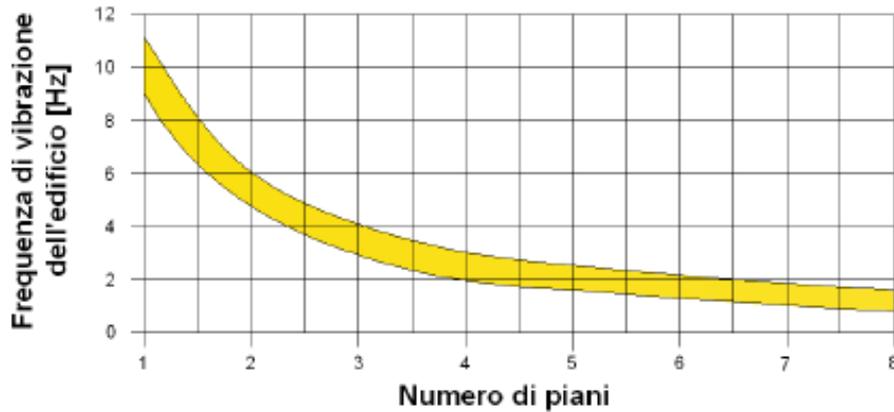


Fig4: Frequenza indicativa di vibrazione degli edifici rapportata al numero dei piani

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 ($HVSr \gg 1$) dovuti alla presenza nel sottosuolo di contrasti di impedenza sismica fra gli strati che inneschino amplificazioni del segnale sismico.

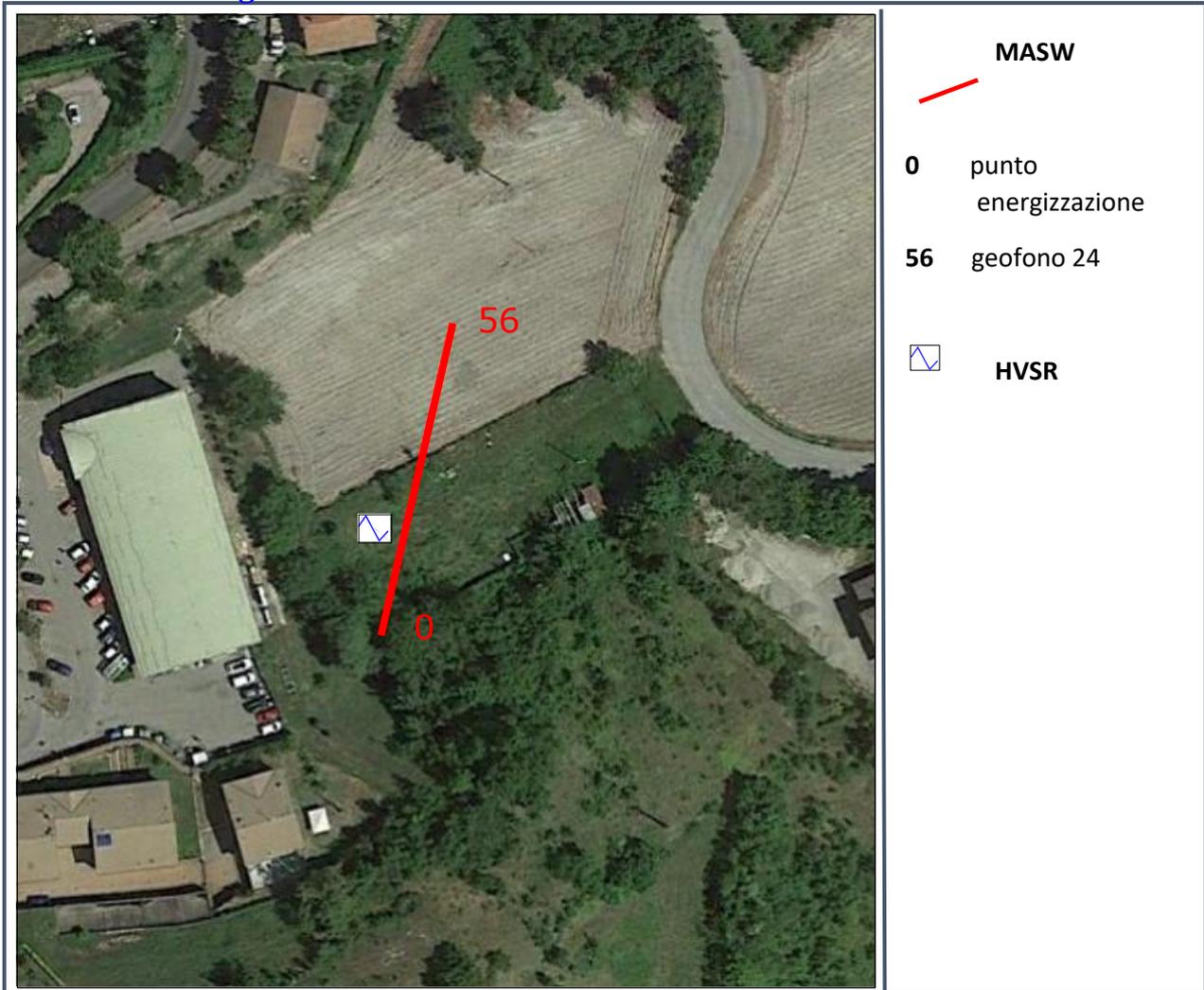
Il valore finale del HVSr in funzione della frequenza espresso nel grafico è indicato da una linea rossa che indica la media RMS delle componenti orizzontali rispetto alle verticali, mentre l'intervallo di confidenza (95%) relativo all'ampiezza HVSr è dato dalle linee nere sottili.

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 **9,38 Hz**.

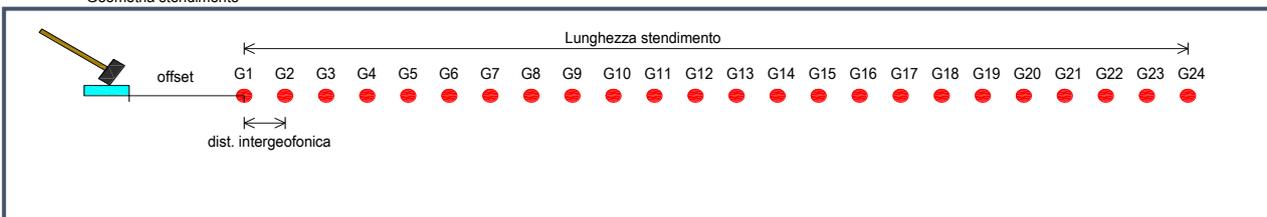
Allegati Intervento

Ubicazione indagini



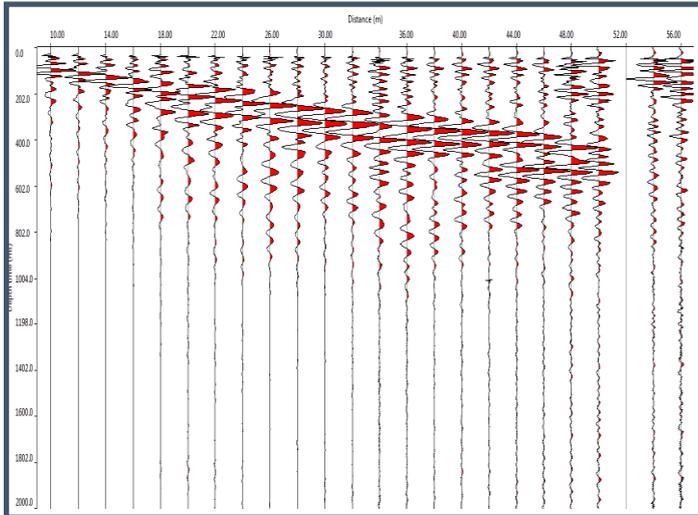
- MASW**
- 0** punto energizzazione
- 56** geofono 24
- HVSr**

Geometria stendimento



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 44,512069 Long. E 10,502845
HVSr						Lat. N 44,512176 Long. E 10,502935

Scheda Indagine Masw



Sismogramma nel dominio spazio/tempo

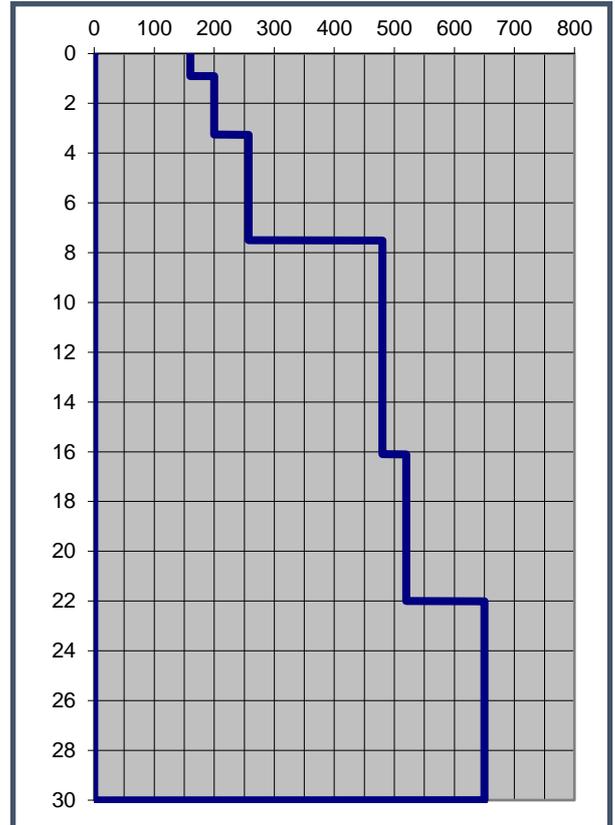
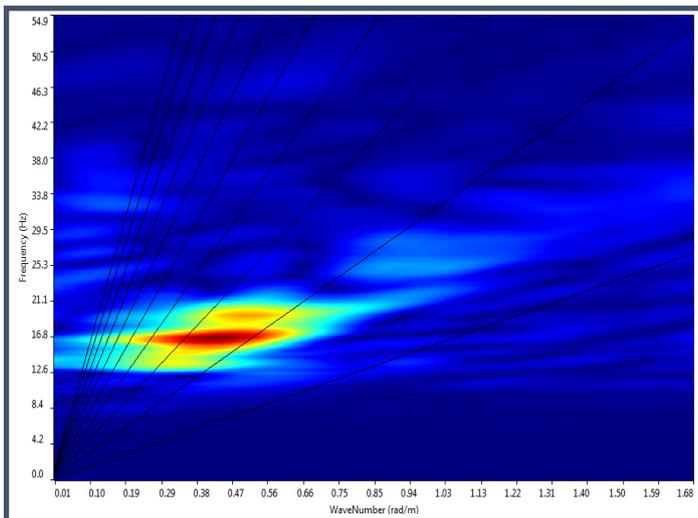
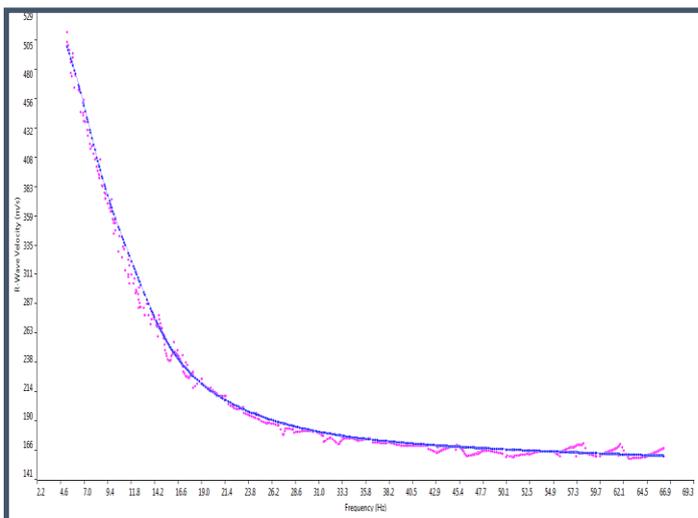


Grafico velocità/profondità onde di taglio Vs



Spettro FK - sismogramma nel dominio numero d'onda - frequenza



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

Strato	profondità		Spessore m	Vel. m/sec
	da	a		
Strato1	0.00	0.90	0.90	160
Strato2	0.90	3.25	2.35	200
Strato3	3.25	7.50	4.25	257
Strato4	7.50	16.10	8.60	480
Strato5	16.10	22.00	5.90	520
Strato6	22.00	≥30.00	≥8.00	650

Risultati Elaborazione MASW

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

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 = **397 m/sec**

Scheda Indagine HVSR

Strumento: TRZ-0099/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 15/09/21 17:36:08 Fine registrazione: 15/09/21 17:56:08

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 92% tracciato (selezione manuale)

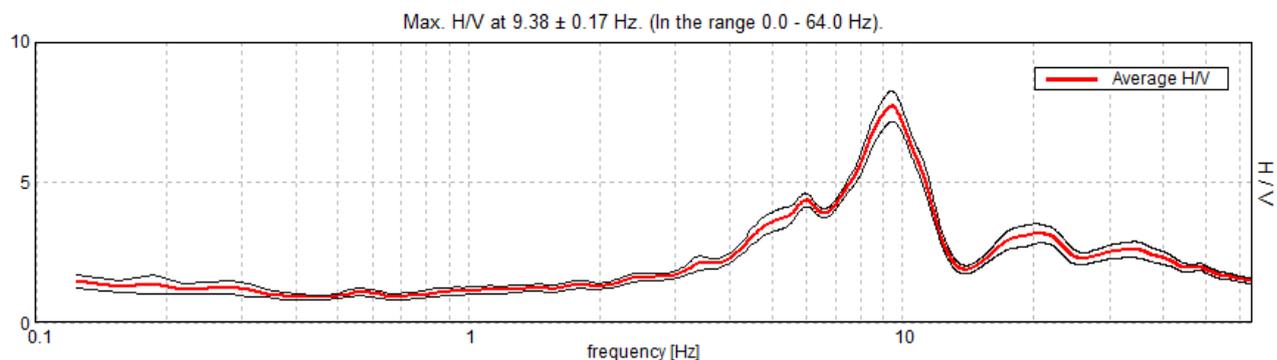
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

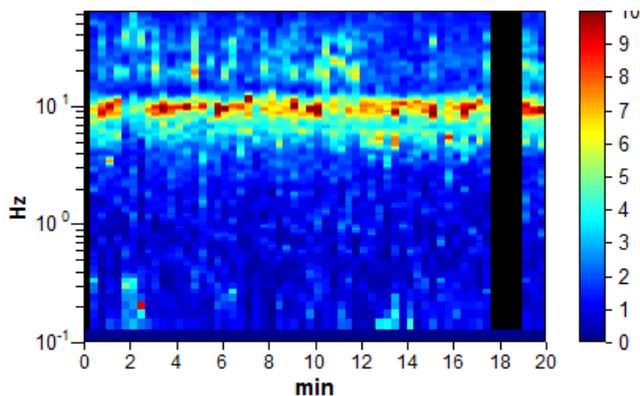
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

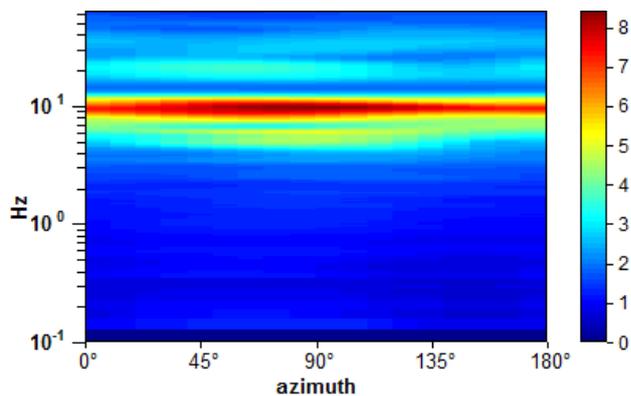
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



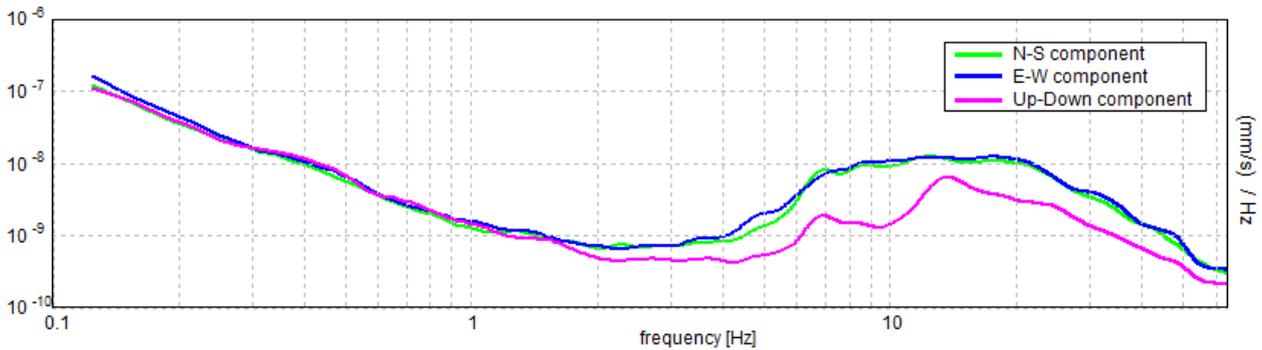
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



Picco H/V a 9.38 ± 0.17 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$9.38 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$10312.5 > 200$	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 451	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	5.531 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	11.906 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$7.71 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01792 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.16797 < 0.46875$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.5553 < 1.58$	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 – Risultati ottenuti

Il valore di velocità ottenuto pari a $VS_{30} = 397 \text{ m/sec}$ e l'osservazione del dato stratigrafico, hanno permesso di classificare il suolo di fondazione nella categoria **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.)

6.3 – Definizione del livello di approfondimento

PTCP 2016

La tavola QC6 (218NE) – Rischio sismico Carta degli effetti locali – evidenzia sulla quasi totalità dell'area, terreni con acclività inferiore a 15°; solo in una ridotta porzione del fianco sud della vallecola in oggetto sono presenti terreni con acclività uguale o di poco superiore a 15°

La tavola 9a (218NE) - Rischio sismico. Carta degli effetti attesi – pone la quasi totalità dell'area in classe H (nessun effetto atteso). La ridotta porzione del fianco sud della vallecola è in classe E (amplificazione topografica).

La tavola 9b (218NE) - Rischio sismico. Carta dei Livelli di approfondimento indica per la quasi totalità dell'area un livello 1 e un livello 2 nella ridotta porzione del fianco sud della vallecola.

Le indagini geognostiche (geotecniche e geofisiche) confermano i livelli di approfondimento indicati dal PTCP.

CAP. 7 – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Per la determinazione delle caratteristiche lito-stratigrafiche e geotecniche locali del sottosuolo, sono state eseguite quattro prove penetrometriche con penetrometro statico dinamico Pagani a punta meccanica (**CPT1**, **CPT2** e **DPSH2**, **DPSH3** e **CPT4**).

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

- prospezione geofisica con il metodo sismico **MASW** (multichannel analysis of surface waves);
- indagine geofisica passiva a stazione singola **HVSR** (TROMINO).

L'area in oggetto insiste su rocce appartenenti alla Formazione di Pantano (**Pat**) presenti in un ampio intorno che comprende l'abitato di Casina.

Si tratta di Areniti finissime, grigie, alternate a peliti marnose e siltose.

Sono affioranti a monte del supermercato Sigma nella scarpata stradale (una misura di strato indica immersione verso Nord con inclinazione di 30°) e a nord dell'area lungo la ex S.S.63; presentano debole copertura sciolta soprattutto nel fianco nord della vallecchia.

Le prove penetrometriche evidenziano scarse coperture sciolte prevalentemente sabbioso limose, tranne che nella CPT1 dove seguono argille prevalenti sino a 6,6 metri.

Tutte le prove terminano a rifiuto in roccia in posto.

La formazione marina presente in zona (Pat) possiede permeabilità limitata per porosità o per fratturazione. Le soprastanti coperture sciolte limoso sabbioso argillose posseggono un medio basso grado di permeabilità.

Le prove penetrometriche non hanno evidenziato acqua in falda o di impregnazione.

Con il metodo sismico attivo-MASW sono stati individuati i seguenti strati:

1° strato: da 0,0 a 0,90 m	spessore medio 0,90 m	velocità media onde Vs 160 m/sec
2° strato: da 0,90 a 3,25 m	spessore medio 2,35 m	velocità media onde Vs 200 m/sec
3° strato: da 3,25 a 7,50 m	spessore medio 4,25 m	velocità media onde Vs 257 m/sec
4° strato: da 7,50 a 16,10 m	spessore medio 8,60 m	velocità media onde Vs 480 m/sec
5° strato: da 16,10 a 22,00 m	spessore medio 5,90 m	velocità media onde Vs 520 m/sec
6° strato: da 22,00 a ≥30,00 m	spessore medio ≥8,00 m	velocità media onde Vs 650 m/sec

La conseguente $VS_{30} = 397 \text{ m/sec}$ e l'osservazione del dato stratigrafico, hanno permesso di classificare il suolo di fondazione nella categoria **B**.

Le condizioni geomorfologiche, la presenza di roccia in posto a breve profondità, l'assenza di acque nel sottosuolo e di tracce di passati fenomeni gravitativi, indicano che i terreni in esame sono stabili.

Reggio Emilia, settembre 2021