

**REGIONE EMILIA ROMAGNA**  
**Provincia di Reggio Emilia**  
**COMUNE DI CASINA**

**Committenti: Guidetti Paolo e Rinaldi Claudia**

---

# **RELAZIONE GEOLOGICA**

**VARIANTE AL PSC**  
**Località Leguigno – Foglio 37 mapp.253**

Casina (RE),

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 - Stabilità dell'area	pag. n. 5
Cap. 4 - Indagine diretta	pag. n. 6
Cap. 5 - Valutazioni Geolitologiche	pag. n. 11
Cap. 6 - Classificazione Sismica	pag. n. 11
Cap. 7 - Analisi della risposta sismica locale	pag. n. 12
Cap. 8 - Considerazioni conclusive	pag. n. 13

## **ALLEGATI**

- Elaborato indagine sismica MASW

## **PREMESSA.**

Lo studio e le relative indagini sono stati eseguiti secondo quanto disposto dal DM 14/1/2008 e finalizzati alla variante al PSC comunale. Saranno necessari approfondimenti ed ulteriori prove per eventuali costruzioni future.

Si è inoltre consultata la rappresentazione della pericolosità sismica locale a scala provinciale e indirizzi per la pianificazione provinciale nonché gli allegati agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica (Del. Ass. Lgs. N. 112 del 02/05/2007).

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

- Estratto Carta Inventario del Dissesto PTCP 2010;
- Rischio sismico. Carta degli effetti locali;
- Rischio sismico. Carta degli effetti attesi;
- Rischio sismico. Carta dei Livelli di approfondimento.

Ho eseguito un rilevamento geologico di campagna e confrontato i dati emersi con altri lavori da me svolti in zona e con studi ufficiali esistenti e con la Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli.

Per la determinazione delle caratteristiche stratigrafiche e geomeccaniche locali del primo sottosuolo è stata eseguita una prova penetrometrica statica CPT1.

Per la classificazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica MASW.

## **Cap 1 - UBICAZIONE E MORFOLOGIA**

L'area in oggetto si trova a Leguigno, comune di Casina (RE), in via Leguigno Faggeto n.3.

La posizione morfologica è di alto versante, immediatamente a sud ovest della strada stessa che localmente funge da spartiacque.

La quota è circa compresa tra 600 e 595 metri s.l.m.

Sull'area in oggetto è presente un prato stabile con pendenza prevalentemente verso sud.

---

## **Cap 2 - INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO**

L'area in oggetto insiste su rocce appartenenti alla Formazione delle Argille Varicolori di Cassio (AVV) presenti in un ampio intorno e localmente confinanti al margine nord ovest del mappale con il Flysch di Monte Cassio (MCS).

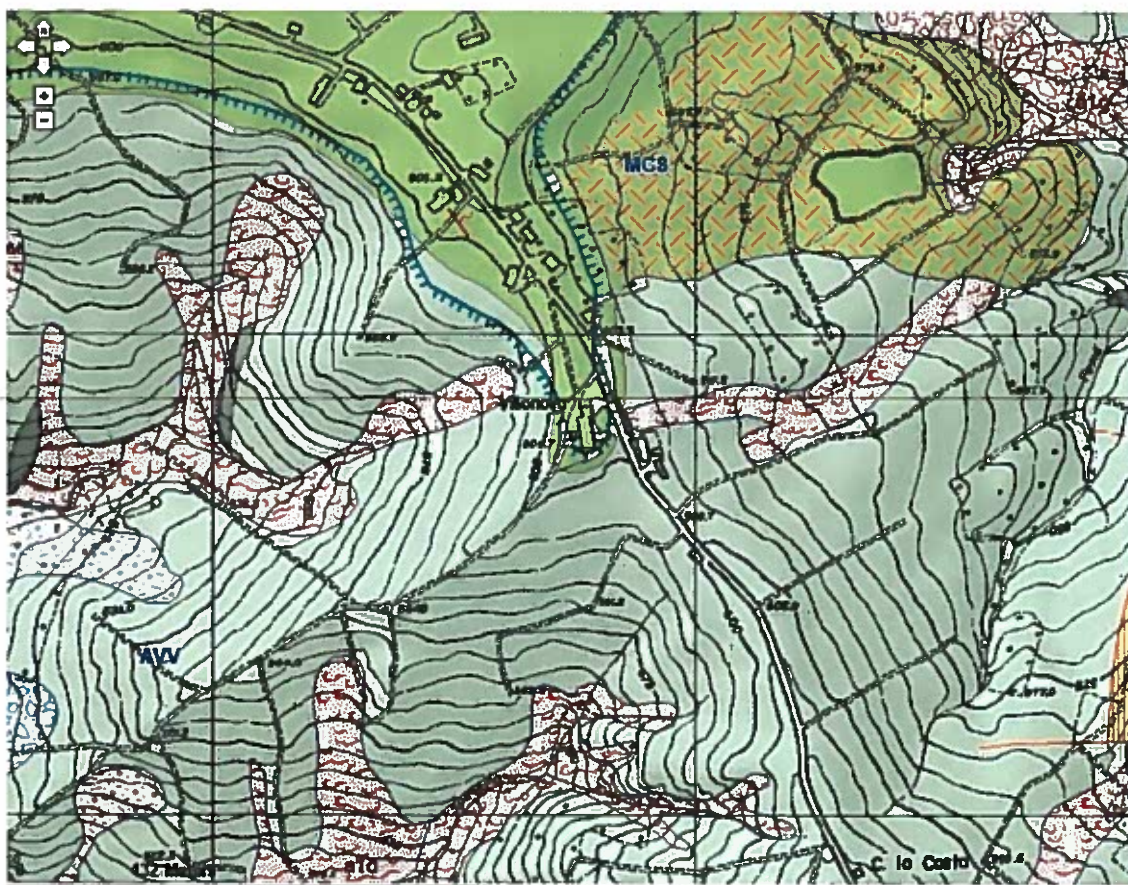
Le Argille Varicolori sono costituite da argille e argilliti rosse, grigio scure e verdastre, fissili, con intercalazioni sottili di arenarie fini e siltiti, calcilutiti e calcareniti e arenarie litiche e feldspatiche.

In concordanza stratigrafica affiora, sotto l'abitato esistente, il sovrastante Flysch di Monte Cassio. Si tratta di torbiditi a base calcarenitica passante a marne calcaree, marne e calcari marnosi, alternate a pacchi di strati torbiditici arenaceo-pelitici.

Sull'area esaminata, la formazione marina (AVV) è ricoperta da terre sciolte prevalentemente argillose risultanti dall'alterazione della roccia di substrato e inglobanti frammenti gravitati della formazione superiore (MCS).

Lo spessore delle coperture sciolte, evidenziato dalla CPT1, è contenuto nel primo metro di prova.

Segue l'estratto della Carta Geologica del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli.



### Cap 3 - STABILITÀ DELL'AREA

Il rilevamento geologico di superficie non ha evidenziato tracce di movimenti gravitativi in atto.

Al di sotto del primo metro, sono presenti argille compatte con buone caratteristiche geotecniche seguite da argilliti e livelli arenitici inalterati del substrato marino (AVV).

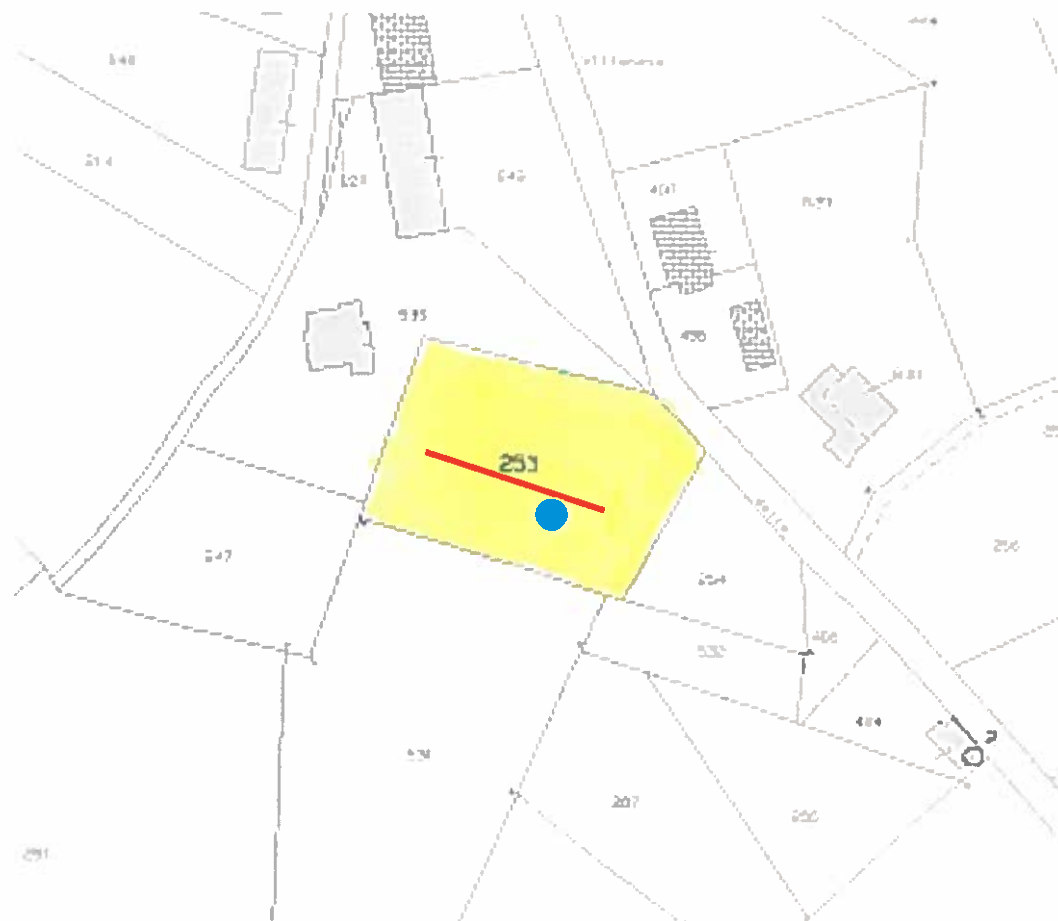
La carta del dissesto allegata non evidenzia, sul mappale esaminato, alcun tipo di frana o dissesto.

Il grado di stabilità complessiva dei terreni esaminati risulta sufficiente.

#### Cap. 4 - INDAGINE DIRETTA – Prova penetrometrica statica.

La campagna di indagini geognostiche è consistita nell'esecuzione di n. 1 prova penetrometrica statica (CPT1) mediante penetrometro statico dinamico Pagani.

La CPT1 e l'indagine sismica (MASW) sono ubicate nella planimetria catastale di seguito riportata.



La prova penetrometrica statica CPT consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ( $v = 2 \text{ cm/s} + 0,5 \text{ cm/s}$ ).

La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta (martinetto idraulico), opportunamente ancorato al suolo, che agisce su una batteria doppia di aste (esterne cave e interne piene coassiali) alla cui estremità inferiore è collegata la punta.

La punta conica (di tipo telescopico) è dotata di manicotto sovrastante per la misura dell'attrito laterale (punta/manicotto tipo "Begemann").

---

Le dimensioni della punta/manicotto sono standard e precisamente:

- diametro di base del cono  $\varphi = 35,7 \text{ mm}$ ;
- area della punta conica  $A_p = 10 \text{ cm}^2$ ;
- angolo di apertura del cono  $\alpha = 60^\circ$ ;
- superficie laterale del manicotto  $A_m = 150 \text{ cm}^2$ .

Nei diagrammi e nelle tabelle allegate, sono riportati i valori della resistenza rilevati dalla lettura di campagna durante l'infissione dello strumento ad intervalli regolari di 20 cm:

- $R_p$  ( $\text{Kg/cm}^2$ ) = resistenza alla punta (conica);
- $R_p + R_l$  ( $\text{Kg/cm}^2$ )

Le letture di campagna ( $R_p$  e  $R_p+R_l$ ) sono riportate nel tabulato e sono state convertite in QC e FS e rappresentate nel grafico della prova.

Il rapporto QC/FS è stato utilizzato per ricavare la stratigrafia.

Dalla elaborazione dati si ottengono valutazioni sulla consistenza dei materiali attraversati.

Al termine dell'esecuzione della prova si verifica l'eventuale presenza di acqua nel sottosuolo e il suo livello con freatimetro.

## ANALISI PROVE STATICHE CON PENETROMETRO MECCANICO [CPT]

Committente: dott.ssa Filippi

Localita': Leguign - Casina

Passo delle misure = 20.00 cm.

## PROVA PENETROMETRICA STATICA n. 1

## VALORI DI RESISTENZE MISURATI

z	Rp	RI
0.4	5	13
0.6	8	16
0.8	19	36
1.0	35	78
1.2	36	71
1.4	33	65
1.6	26	56
1.8	27	57
2.0	58	100
2.2	44	69
2.4	25	59
2.6	23	46
2.8	21	42
3.0	28	60
3.2	75	85
3.4	36	81
3.6	38	80
3.8	37	102
4.0	48	104
4.2	47	115
4.4	180	240
4.6	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	0.5	53.3	10.67	Torba	17.5	7.3	7.3	0.0
0.6	0.8	53.3	6.67	Torba	17.5	10.8	10.8	0.0
0.8	1.9	113.3	5.96	Argilla	18.0	14.4	14.4	0.0
1.0	3.5	286.7	8.19	Argilla	18.0	18.0	18.0	0.0
1.2	3.6	233.3	6.48	Argilla	18.0	21.6	21.6	0.0
1.4	3.3	213.3	6.46	Argilla	18.0	25.2	25.2	0.0
1.6	2.6	200.0	7.69	Argilla	18.0	28.8	28.8	0.0
1.8	2.7	200.0	7.41	Argilla	18.0	32.4	32.4	0.0
2.0	5.8	280.0	4.83	Argilla limosa	18.5	36.1	36.1	0.0
2.2	4.4	166.7	3.79	Argilla limosa	18.5	39.8	39.8	0.0
2.4	2.5	226.7	9.07	Torba	17.5	43.3	43.3	0.0
2.6	2.3	153.3	6.67	Argilla	18.0	46.9	46.9	0.0
2.8	2.1	140.0	6.67	Argilla	18.0	50.5	50.5	0.0
3.0	2.8	213.3	7.62	Argilla	18.0	54.1	54.1	0.0



3.2	7.5	66.7	0.89	Sabbia	20.0	58.1	58.1	0.0
3.4	3.6	300.0	8.33	Argilla	18.0	61.7	61.7	0.0
3.6	3.8	280.0	7.37	Argilla	18.0	65.3	65.3	0.0
3.8	3.7	433.3	11.71	Argilla	18.0	68.9	68.9	0.0
4.0	4.8	373.3	7.78	Argilla	18.0	72.5	72.5	0.0
4.2	4.7	453.3	9.65	Argilla	18.0	76.1	76.1	0.0
4.4	18.0	400.0	2.22	Sabbia limosa	19.5	80.0	80.0	0.0
4.6	25.0	326.7	1.31	Sabbia	20.0	84.0	84.0	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	34			19.7	20.5	4	0.208	60.0	180
0.6	Torba	27			31.6	22.2	6.5	0.155	98.0	200
0.8	Argilla	20			75.4	30	15.5	0.146	233.0	245
1.0	Argilla	21			139.3	30	28.7	0.175	431.0	281
1.2	Argilla	20			143.1	30	29.5	0.153	443.0	283
1.4	Argilla	21			131	30	27	0.152	405.0	278
1.6	Argilla	27			102.8	27.2	21.2	0.169	318.0	263
1.8	Argilla	27			106.7	25.1	22	0.165	330.0	265
2.0	Argilla limosa	17			230.6	30	47.5	0.131	713.0	316
2.2	Argilla limosa	17			174.4	30	35.9	0.117	539.0	297
2.4	Torba	33			98.3	17.3	20.2	0.187	303.0	261
2.6	Argilla	31			90.1	14.6	18.5	0.155	278.0	256
2.8	Argilla	33			82	12.3	16.9	0.155	253.0	250
3.0	Argilla	32			109.8	15.4	22.6	0.168	339.0	267
3.2	Sabbia	6	46	38.8		3.5	27.5		241.0	335
3.4	Argilla	32			141.5	17.4	29.1	0.177	437.0	283
3.6	Argilla	30			149.4	17.4	30.8	0.165	462.0	287
3.8	Argilla	38			145.19	16	29.9	0.222	449.0	285
4.0	Argilla	30			189.1	19.8	39	0.170	585.0	303
4.2	Argilla	33			185	18.5	38.1	0.195	572.0	301
4.4	Sabbia limosa	8	64	40.0		4.8	48.4		373.0	410
4.6	Sabbia	4	73	40.2		5.7	57.6		418.0	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

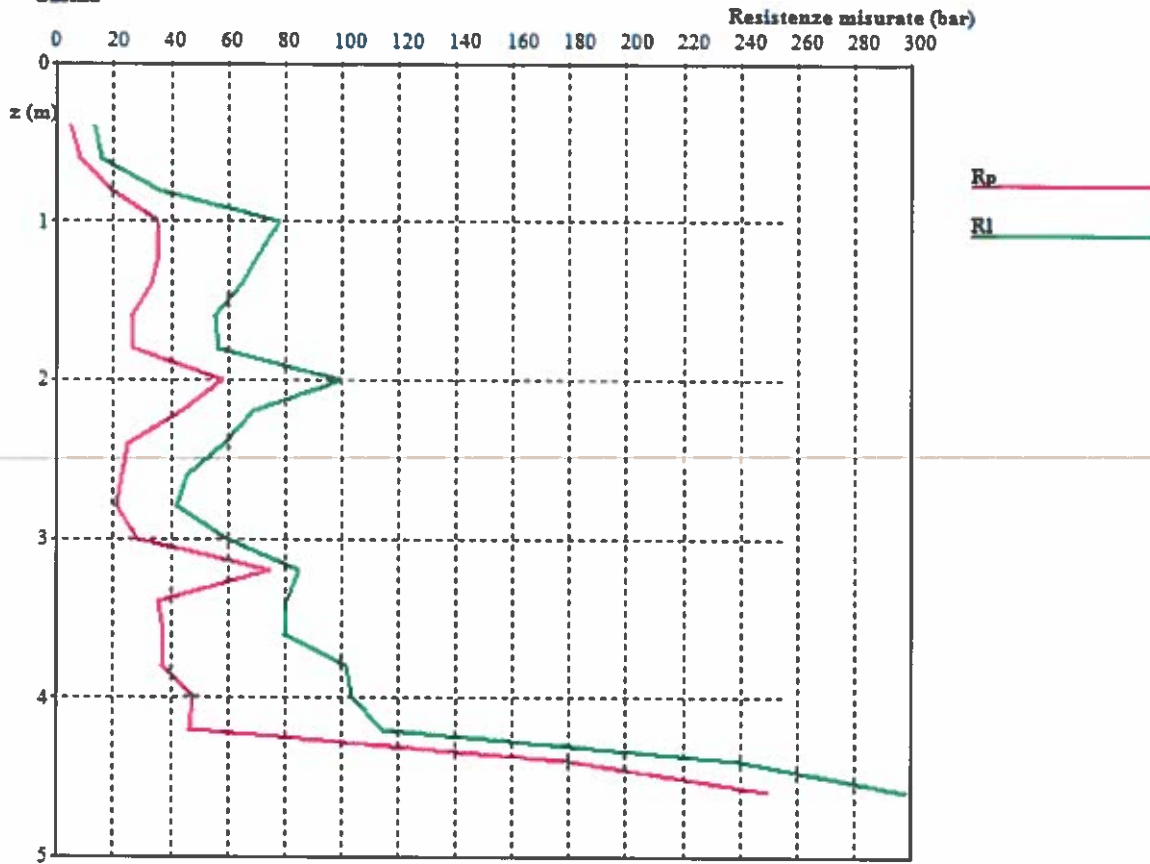
M = modulo confinato (MPa)

Cc = indice di compressibilità (-)

Go = modulo di taglio (MPa)

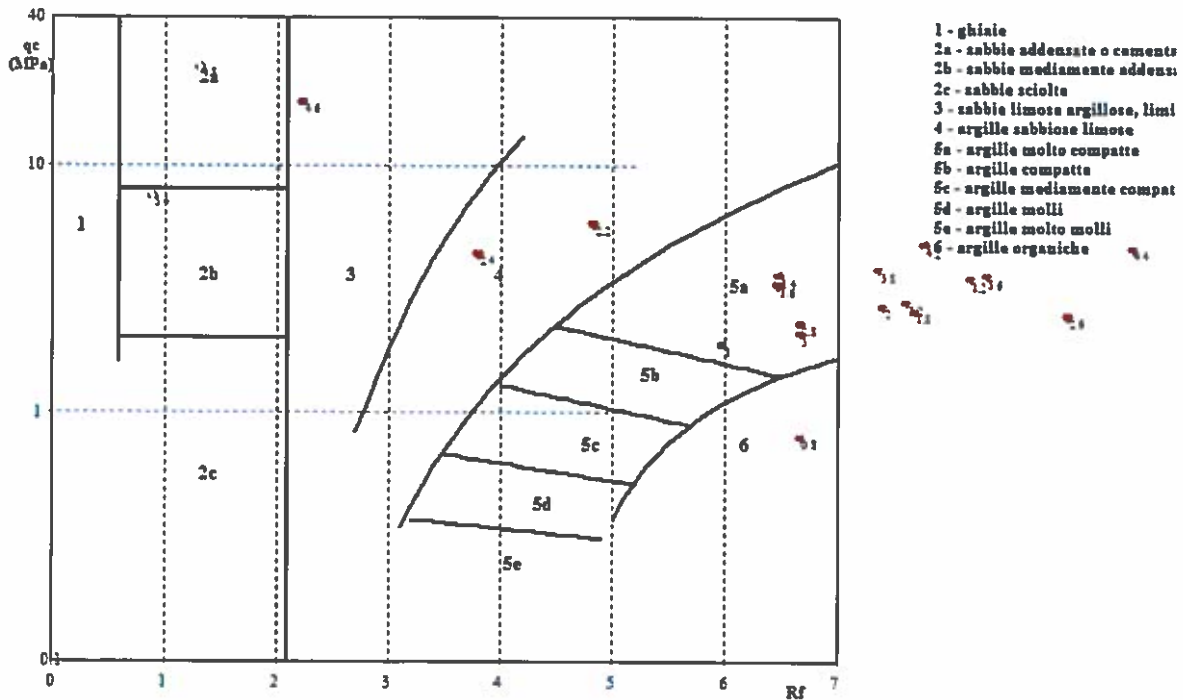
Vs = velocità onde di taglio (m/s)

Prova Penetrometrica Statica 1  
Casina -



Prova Penetrometrica Statica 1  
Casina -

Criterio di identificazione di Schmertmann, 1978



## Cap. 5 - VALUTAZIONI GEOLITOLOGICHE

Lo spessore delle coperture sciolte, evidenziato dalla CPT1, è contenuto nel primo metro di prova.

Al di sotto del primo metro sono presenti argille prevalenti con buone caratteristiche geotecniche, seguite da argilliti e livelli arenitici del substrato marino (AVV).

Non si è riscontrata presenza di acque nello spessore sondato.

---

## CAP. 6 – CLASSIFICAZIONE SISMICA

Secondo il § 3.2 del D.M. 2008 “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 PVR, 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.

Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- FO valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.

- T\*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale”.

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 la stima della pericolosità sismica viene definita mediante un approccio “sito dipendente” e non più tramite un criterio “zona dipendente”.

Per la classificazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica (Stendimento sismico – MASW) allegata alla presente relazione.

Dall'indagine eseguita è risultata una  $V_{s30} = 392$  m/sec (da p.c. a -30 m).

La categoria del suolo di fondazione è la **B** (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_s$  30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s).

## **Cap. 7 - ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE**

PTCP 2010

La tavola 8 QC6 (218SO) – Rischio sismico Carta degli effetti locali – evidenzia assenza di elementi morfologici (area subpianeggiante con inclinazione inferiore a 15°).

La tavola 9a (218NO) - Rischio sismico. Carta degli effetti attesi – pone l'area in classe H (nessun effetto atteso).

La tavola 9b (218NO) - Rischio sismico. Carta dei Livelli di approfondimento indica un livello di approfondimento 1.

## **CAP. 8 – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

L'area in oggetto si trova a Leguigno, comune di Casina (RE), in via Leguigno Faggeto n.3 (Foglio 37- mappale 257).

Essa insiste su rocce appartenenti alla Formazione delle Argille Varicolori di Cassio (AVV).

Lo spessore delle coperture sciolte, evidenziato dalla prova penetrometrica statica eseguita, è contenuto nel primo metro di prova.

Al di sotto del primo metro sono presenti argille prevalenti con buone caratteristiche geotecniche, seguite da argilliti e livelli arenitici del substrato marino (AVV).

Non si è riscontrata presenza di acque nello spessore sondato.

Il rilevamento geologico di superficie non ha evidenziato tracce di movimenti gravitativi in atto.

La carta del dissesto non evidenzia, sul mappale esaminato, alcun tipo di frana o dissesto.

Il grado di stabilità complessiva dei terreni esaminati risulta sufficiente.

Per la classificazione sismica del terreno di fondazione è stata eseguita una indagine geofisica (Stendimento sismico – MASW) allegata alla presente relazione dalla quale risulta l'appartenenza del terreno alla categoria B.

Le carte del Rischio sismico (PTCP 2010) evidenziano assenza di elementi morfologici, nessun effetto atteso e un livello di approfondimento 1.

In base a quanto sopra sintetizzato l'area è idonea alla variante urbanistica.

Casina (RE)

Dott. Geol. Chiara Filippi



**TECNOGEOFISICA S.n.c.**

**COMMITTENTE:**

Dott. Geol. Chiara Filippi  
via Roma, 3  
42034 Casina (RE)

**COMMESSA:**

Indagine geofisica  
Misura Vs<sub>30</sub> con metodologia MASW

**LOCALITA':**

Leguigno  
Comune di Casina (RE)

**TITOLO:**

Relazione Tecnica

Via S. Cattania, 1/a  
41012 Carpi (MO)

[info@tecnogeofisica.com](mailto:info@tecnogeofisica.com)  
[www.tecnogeofisica.com](http://www.tecnogeofisica.com)



## INDAGINE GEOFISICA

### Committente:

Dott. Geol. Chiara Filippi  
via Roma, 3  
42034 Casina (RE)

**Intervento:** Indagine sismica  
Indagine MASW

**Località:** Leguigno  
Comune di Casina (RE)

## INDICE

<b>Premessa</b> .....	<b>3</b>
Caratteristiche attrezzatura	4
<b>Metodologia d'indagine MASW</b> .....	<b>5</b>
Interpretazione dati acquisiti	7
Categorie di suolo di fondazione (Azione sismica di progetto $V_{s30}$ )	9
Allegati	10
Scheda Indagine MASW	11

---

## Premessa

Su commissione di:

Dott. Geol. Chiara Filippi

Via Roma, 3 - 42034 Casina (RE)

È stata effettuata una indagine sismica tipo MASW (Multichannel Spectral Analysis of Waves), in un terreno di proprietà dei Sig. Guidetti, in località Leguigno di Casina (RE).

La prova è stata ubicata come indicato dalla committenza e visualizzato nella scheda allegata a fine testo.

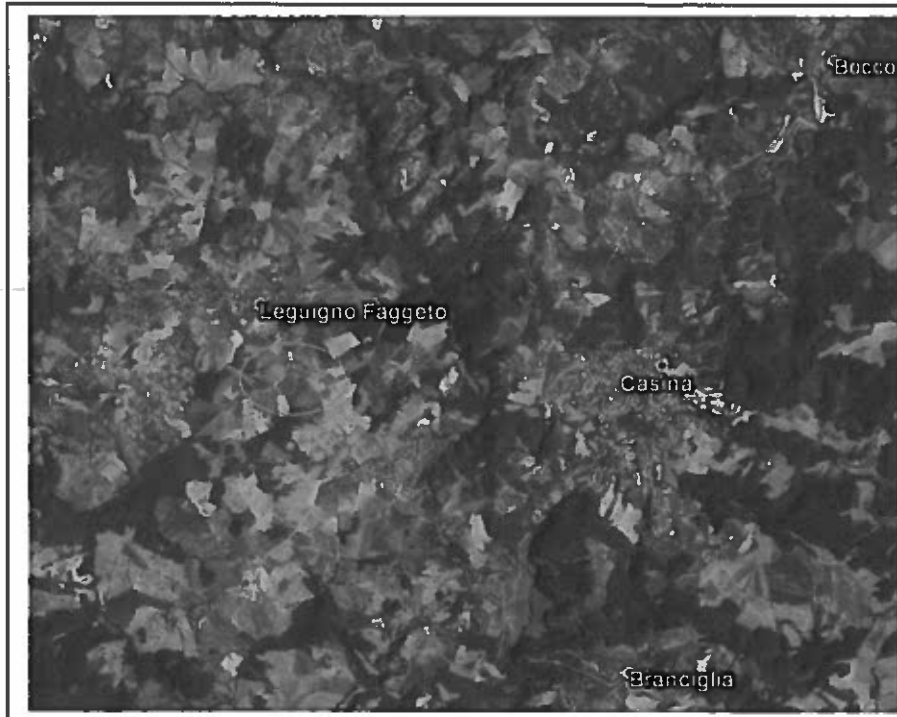


Fig.1 Ubicazione area di indagine

L'indagine MASW è indirizzata a misurare le velocità delle onde sismiche ( $V_s$ ) del sottosuolo e la valutazione del parametro  $V_{s30}$  come prescritto da:

- *Ordinanza del P.C.M. n° 3274 del 20 marzo 2003*
- *D.M. 14 gennaio 2008 "Norme tecniche per le Costruzioni".*

Si ricorda che la normativa richiede l'azione sismica di progetto sulla base della zona sismica di appartenenza del sito e la categoria sismica di suolo su cui sarà realizzata l'opera. 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 1) è invece convenzionalmente eseguita sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

dove  $V_{S_i}$  e  $h_i$  sono la velocità delle onde di taglio e lo spessore dello stato  $i$ -esimo.



Suolo	Descrizione geotecnica	Vs30 (m/sec)
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3m	>800
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{opt} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_u > 250$ kPa nei terreni a grana fina)	360-800 ( $N_{spt} > 50$ ) ( $C_u > 250$ KPa)
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{opt} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_u < 250$ kPa nei terreni a grana fina)	180-360 ( $15 < N_{spt} < 50$ ) ( $70 < C_u < 250$ KPa)
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{opt} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_u < 70$ kPa nei terreni a grana fina)	<180 ( $N_{spt} < 15$ ) ( $C_u < 70$ KPa)
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_{s30} > 800$ m/s)	
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < C_{u30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.	<100 ( $10 < C_u < 20$ Kpa)
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti	

Tabella 1: classificazione del tipo di suolo secondo le "Nuove norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14/01/2008  
Tabelle 3.2.II (categorie di suolo) e 3.2.III (categorie di suolo aggiuntive) mod.

### Caratteristiche attrezzatura

Le indagini in sito sono state eseguite utilizzando un sismografo multicanale ad incrementi di segnale, della P.A.S.I. mod. 16SG24 a 24 canali. Le specifiche tecniche dello strumento sono:

-processore:	Pentium 200 MMx Intel,
-Trattamento dati:	Floating Point 32-Bit,
-Ambiente operativo:	Windows 3.11,
-Canali:	24
-Display:	VGA colori LCD_TFT 10,4"
-Supporto memorizz.:	Hard Disk 2,1 Gb
-Risoluzione acquisizione:	6/24 bit
-Sonde ambiente interne:	temperatura, umidità relativa
-Formato dati:	Pasi (.osv) e SEG-2 (.dat),
-Durata acquisizioni:	Rifrazione, 32+2048 ms      Riflessione, 32+16384 ms,
-Tempi campionamento:	da 16 $\mu$ s a 2 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

#### Altra strumentazione:

- 24 geofoni da 4,5 Hz per la Masw
- due cavi con lunghezza 65 m l'uno per collegare in serie i geofoni
- Sorgente impulsiva: mazza battente da 10 Kg con piastra metallica 15x15 cm su cui battere, da disporre sul terreno.
- Bindella metrica per posizionare i ricevitori.

## Metodologia d'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.

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

➤ Numero geofoni	24
➤ Distanza Intergeofonica	1,5 m
➤ Lunghezza stendimento geofonico	34,5 m
➤ Distanza punto di shot da ultimo geofono "offset"	10 m
➤ Lunghezza complessiva	44,5 m

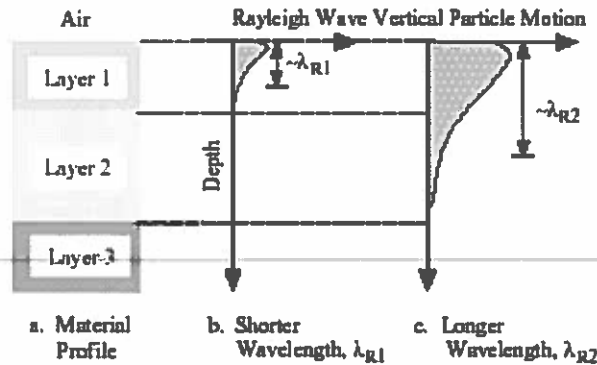
Si ricorda che data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), la tecnica di acquisizione per onde di superficie necessita di geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4,5 Hz.

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.

Viceversa 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 Vs assegnata ad una determinata profondità z dal piano campagna, calcolata in funzione della lunghezza d'onda, cioè :

$$z = \frac{\lambda}{(1,5 / 2,0)}$$

Inoltre si evidenzia che:

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<sub>R</sub>) 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<sub>R</sub> ≈ 0,9 + 0,96 V<sub>s</sub> (da V. Socco Lab. Geofisica Appl. Dip. Ing Territorio Politecnico di TORINO)

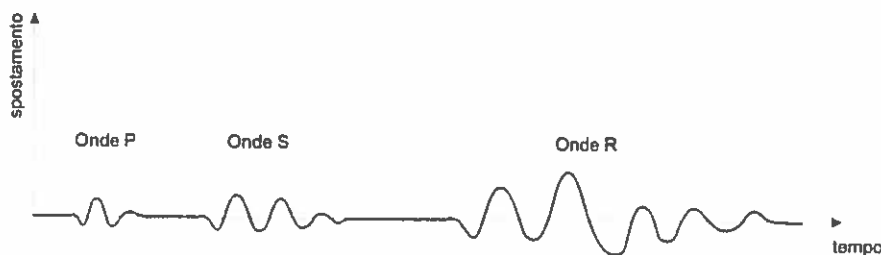


Fig. 3: sismogramma che evidenzia l'arrivo distinto di onde P, S e di Rayleigh (da Crespellani e Facciorusso "Dinamica dei terreni")

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).

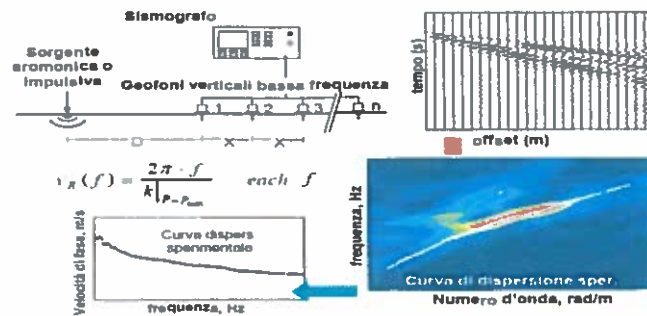
La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione (piccolo sisma) e nel registrare le vibrazioni prodotte sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

Il profilo di Vs viene determinato attraverso la soluzione di un problema matematico di inversione della curva di dispersione (V<sub>R</sub> 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:

### tecniche attive - Metodi multistazione



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 traggono 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).

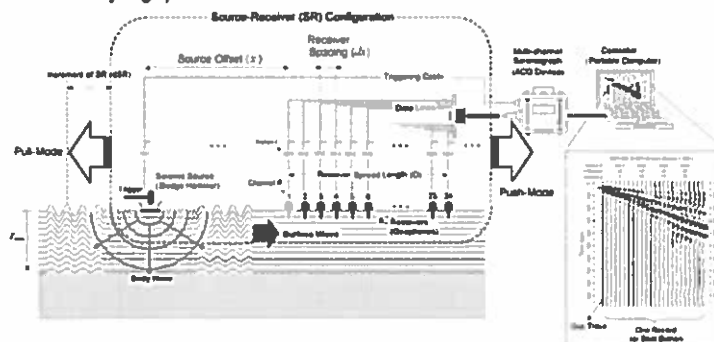
Tale tecnica come d'altronde anche la Masw, è basata sul fatto che osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione, è noto che la quasi totalità dell'energia (circa 2/3 o più) si propaga tramite onde superficiali (onde di Rayleigh).

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,  $f$  – 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  $\epsilon$  (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 ( $\epsilon_{MIN}$ ) 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 sbagliato 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 \*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. Infatti 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 Macth 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.

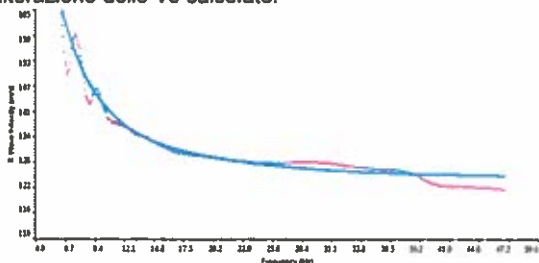


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica (blu) ottenuta dal processo inversione Masw dominio frequenza/velocità. Si noti la quasi perfetta corrispondenza del fitting fra le due curve

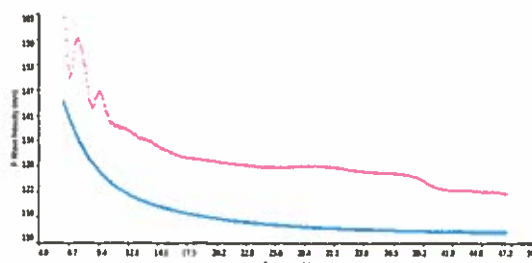


Grafico con sovrapposizione fra curva dispersione sperimentale (magenta) e curva teorica "alterata" modificando le Vs diminuendole erroneamente del 10% (blu) dominio frequenza/velocità. Si noti la completa "sfasatura" della curva teorica sinonimo di un allontanamento dalla reale stratigrafia sismica 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 $V_{s30}$ )

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (come previsto da art. 3.2 del DM 14-1-08) 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 delle 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: velocità media onde $V_s$ 171 m/sec	spessore medio 0,36 m
2° strato: velocità media onde $V_s$ 78 m/sec	spessore medio 0,42 m
3° strato: velocità media onde $V_s$ 232 m/sec	spessore medio 2,98 m
4° strato: velocità media onde $V_s$ 329 m/sec	spessore medio 2,73 m
5° strato: velocità media onde $V_s$ 377 m/sec	spessore medio 2,96 m
6° strato: velocità media onde $V_s$ 517 m/sec	spessore medio 15,24 m
7 strato: velocità media onde $V_s$ 504 m/sec	spessore medio $\geq 5,31$ m

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 20-3-2003 e art. 3.2.2 DM 14-1-08), 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:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove

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

In base ai dati sopra esposti e a quanto previsto dall' art. 3.2.2 NTC08, si ricorda che: "Per le fondazioni superficiali la profondità di calcolo delle  $V_s$  va riferita al piano di imposta delle stesse,..",

Prospezione MASW

$V_{s30}$  = 392 m/sec (da p.c. a -30 m)

Da cui si evince che il terreno in analisi rientra nella 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 con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s)

**Allegati**



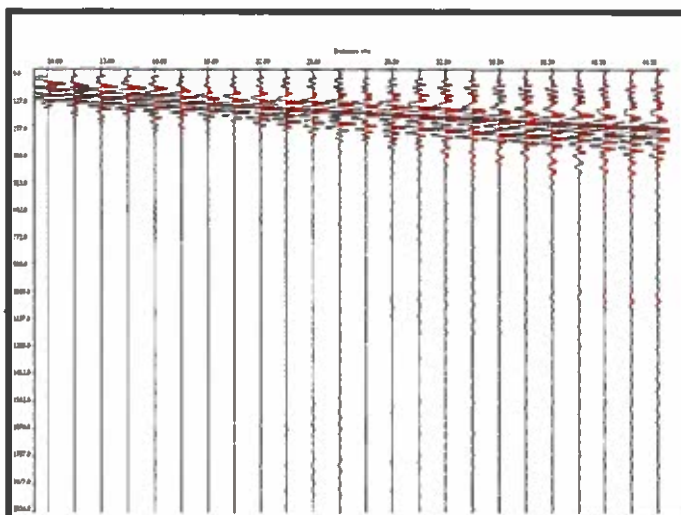
**Ubicazione Masw**

- 0 Punto di Shot
- 44,5 ubicazione geofono 24

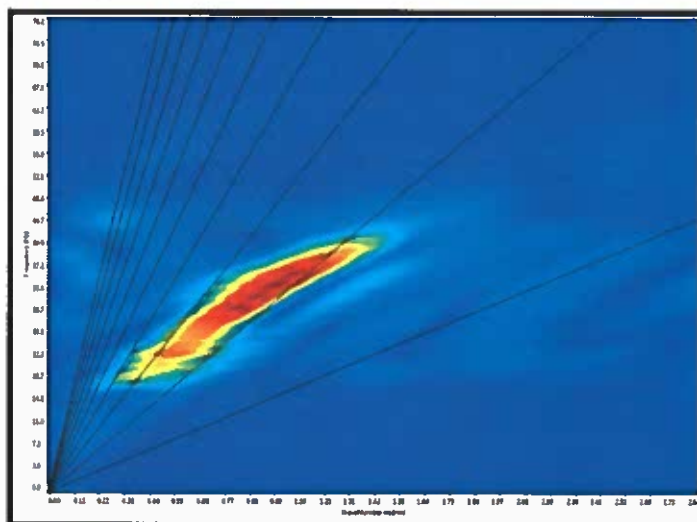


**Piazzamento Masw**

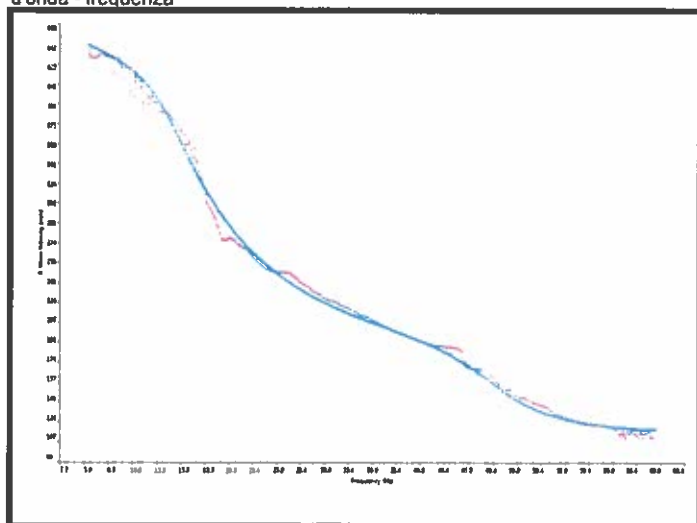
Scheda Indagine MASW



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

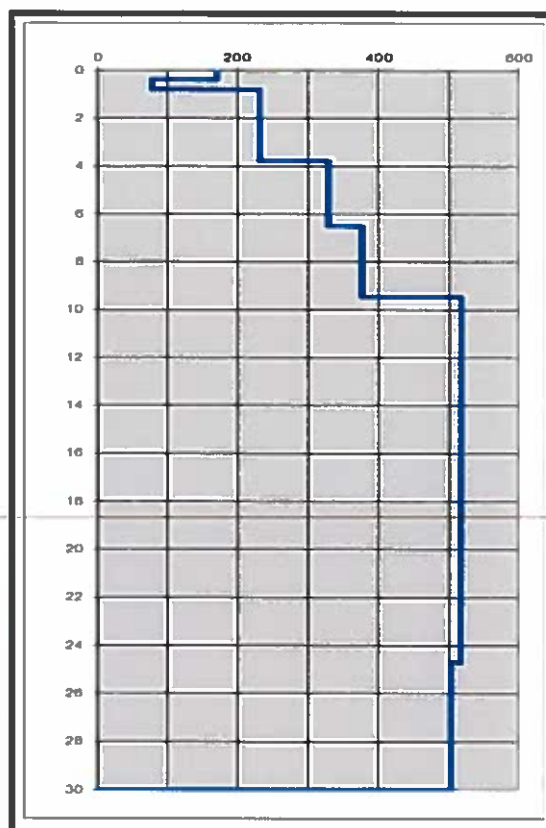


Grafico velocità/profondità onde di taglio Vs

**Risultati Elaborazione MASW**

Strato	profondità		Spessore m	Vel. m/sec
	da	a		
Strato1	0.00	0.36	0.36	171
Strato2	0.36	0.78	0.42	78
Strato3	0.78	3.76	2.98	232
Strato4	3.76	6.49	2.73	329
Strato5	6.49	9.45	2.96	377
Strato6	9.45	24.69	15.24	517
Strato7	24.69	30.00	5.31	504

**Vs<sub>30</sub> = 392 m/sec**

Che 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 fine molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs<sub>30</sub> compresi tra 360 m/s e 800 m/s)