

## STIMA PARAMETRI GEOTECNICI (CPT n°5)

## TERRENI COESIVI

## Coesione non drenata

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Cu (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Lunne & Eide	1,077299
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Lunne & Eide	0,8484717
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Lunne & Eide	0,6449328
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Lunne & Eide	0,9732629
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Lunne & Eide	1,503553
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Lunne & Eide	0,8654751
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Lunne & Eide	1,039814
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Lunne & Eide	1,606996
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Lunne & Eide	0,714857
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Lunne & Eide	1,305501
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Lunne & Eide	0,6761563
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Lunne & Eide	1,041417
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Lunne & Eide	1,562852
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Lunne & Eide	0,9057879

## Modulo Edometrico

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Eed (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Mitchell & Gardner (1975)	94,44
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Mitchell & Gardner (1975)	75,43166
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Mitchell & Gardner (1975)	58,6957
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Mitchell & Gardner (1975)	87,76
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Mitchell & Gardner (1975)	67,328500
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Mitchell & Gardner (1975)	79,692
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Mitchell & Gardner (1975)	95,382
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Mitchell & Gardner (1975)	72,747874
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Mitchell & Gardner (1975)	68,15
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Mitchell & Gardner (1975)	60,044999
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Mitchell & Gardner (1975)	65,435
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Mitchell & Gardner (1975)	97,93545
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Mitchell & Gardner (1975)	72,170000
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Mitchell & Gardner (1975)	87,47665

## Modulo di deformazione non drenato Eu

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Eu (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Ladd ed Altri 1977 n=30	28,2
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Ladd ed Altri 1977 n=30	22,5
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Ladd ed Altri 1977 n=30	17,7
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Ladd ed Altri 1977 n=30	26,4
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Ladd ed Altri 1977 n=30	40,5
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Ladd ed Altri 1977 n=30	24
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Ladd ed Altri 1977 n=30	28,5
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Ladd ed Altri 1977 n=30	43,5
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Ladd ed Altri 1977 n=30	20,4
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Ladd ed Altri 1977 n=30	36
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Ladd ed Altri 1977 n=30	19,5
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Ladd ed Altri 1977 n=30	29,4
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Ladd ed Altri 1977 n=30	43,2
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Ladd ed Altri 1977 n=30	26,1



**Modulo di deformazione a taglio**

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Modulo di deformazione a taglio (Kg/cm <sup>2</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Imai & Tomauchi	168,6194
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Imai & Tomauchi	146,9849
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Imai & Tomauchi	126,0973
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Imai & Tomauchi	161,2284
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Imai & Tomauchi	209,4335
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Imai & Tomauchi	152,0029
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Imai & Tomauchi	169,6451
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Imai & Tomauchi	219,578
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Imai & Tomauchi	138,1449
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Imai & Tomauchi	195,2837
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Imai & Tomauchi	134,7558
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Imai & Tomauchi	172,4057
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Imai & Tomauchi	218,5107
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Imai & Tomauchi	160,9102

**Grado di sovraconsolidazione**

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Ocr
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Schmertmann 1978	OCR > 6
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Schmertmann 1978	OCR = 6
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Schmertmann 1978	OCR = 6
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Schmertmann 1978	OCR = 6
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Schmertmann 1978	OCR = 6
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Schmertmann 1978	OCR = 6
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Schmertmann 1978	OCR = 3
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Schmertmann 1978	OCR = 3
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Schmertmann 1978	OCR = 3
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Schmertmann 1978	OCR = 1-1.5
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Schmertmann 1978	OCR = 3
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Schmertmann 1978	OCR = 1-1.5
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Schmertmann 1978	OCR = 1-1.5
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Schmertmann 1978	OCR = 1-1.5

**Peso unità di volume**

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Peso unità di volume (t/m <sup>3</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Meyerhof	1,962691
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Meyerhof	1,922577
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Meyerhof	1,876496
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Meyerhof	1,945629
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Meyerhof	2,018698
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Meyerhof	1,92591
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Meyerhof	1,956741
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Meyerhof	2,029876
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Meyerhof	1,893789
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Meyerhof	1,994969
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Meyerhof	1,884439
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Meyerhof	1,957
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Meyerhof	2,025196
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Meyerhof	1,933559



## Peso unità di volume saturo

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Peso unità di volume saturo (t/m <sup>3</sup> )
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Meyerhof	2,042691
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Meyerhof	2,002577
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Meyerhof	1,956496
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Meyerhof	2,025629
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Meyerhof	2,098698
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Meyerhof	2,00591
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Meyerhof	2,036741
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Meyerhof	2,109876
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Meyerhof	1,973789
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Meyerhof	2,074969
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Meyerhof	1,964439
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Meyerhof	2,037
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Meyerhof	2,105196
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Meyerhof	2,013559

## Permeabilità

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	K (cm/s)
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Piacentini-Righi 1988	1,00E-11
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Piacentini-Righi 1988	1,00E-11
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Piacentini-Righi 1988	4,48E-09
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Piacentini-Righi 1988	6,48E-11
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Piacentini-Righi 1988	6,97E-09
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Piacentini-Righi 1988	5,04E-09
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Piacentini-Righi 1988	2,19E-11
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Piacentini-Righi 1988	1,00E-11
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Piacentini-Righi 1988	1,00E-11
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Piacentini-Righi 1988	2,97E-11
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Piacentini-Righi 1988	5,52E-05
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Piacentini-Righi 1988	6,31E-09
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Piacentini-Righi 1988	1,91E-11
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Piacentini-Righi 1988	1,46E-07

## Coefficiente di consolidazione

	Prof. Strato (m)	qc (Kg/cm <sup>2</sup> )	fs (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica totale (Kg/cm <sup>2</sup> )	Tensione litostatica efficace (Kg/cm <sup>2</sup> )	Correlazione	Coefficiente di consolidazione (cm <sup>2</sup> /s)
Strato 1	0,80	18,888	1,4	7,835996E-02	7,835996E-02	Piacentini-Righi 1988	5,6664E-07
Strato 2	2,00	15,08633	1,011111	0,2720141	0,2720141	Piacentini-Righi 1988	4,525899E-07
Strato 3	3,40	11,73914	0,5619048	0,5186126	0,4786126	Piacentini-Righi 1988	1,578409E-04
Strato 4	3,80	17,552	0,9666667	0,6888295	0,5588295	Piacentini-Righi 1988	3,413516E-06
Strato 5	5,80	26,9314	1,2	0,9293705	0,6793705	Piacentini-Righi 1988	5,632706E-04
Strato 6	6,80	15,9384	0,7466667	1,227205	0,8272047	Piacentini-Righi 1988	2,411703E-04
Strato 7	7,80	19,0764	1,08	1,421243	0,9212433	Piacentini-Righi 1988	1,254281E-06
Strato 8	9,20	29,09915	1,714286	1,661001	1,041001	Piacentini-Righi 1988	8,729745E-07
Strato 9	10,00	13,63	0,85	1,878597	1,148597	Piacentini-Righi 1988	4,089E-07
Strato 10	10,80	24,018	1,316667	2,033946	1,223946	Piacentini-Righi 1988	2,138112E-06
Strato 11	11,20	13,087	0,3333334	2,151311	1,281311	Piacentini-Righi 1988	2,168186
Strato 12	13,40	19,58709	0,8969697	2,403951	1,403951	Piacentini-Righi 1988	3,707207E-04
Strato 13	14,80	28,868	1,571429	2,7606	1,5806	Piacentini-Righi 1988	1,650159E-06
Strato 14	15,40	17,49533	0,688889	2,960274	1,680274	Piacentini-Righi 1988	7,655317E-03



## CONSIDERAZIONI SISMICHE

### Considerazioni sismiche di carattere generale

Il territorio del comune di Cesena è classificato in zona 2 (Ordinanza P.C.M. n°3274 del 23.03.2003) con coefficiente di intensità sismica  $C = 0.07$ , massimo macrosismico compreso fra l' VIII e il IX grado della scala MCS, magnitudo di riferimento  $M_w = 6.14$  (da relazione consigliata dal G.N.D.T.,  $M = \frac{I + 1.93}{1.78}$ , con nel nostro caso  $I = 9$  e accelerazione di picco

orizzontale al suolo, (per suolo tipo A per  $T = 0$ ) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni,  $a_g = 0.186g$  per l'area di via Parataglio e  $a_g = 0.187g$  per l'area di via Cerca (da tabella B allegata al D.M.14 gennaio 2008).

In particolare per le aree in esame l'azione sismica di progetto in base alla quale valutare il rispetto dello stato limite preso in considerazione (SLV), viene definita partendo dalla pericolosità sismica di base del sito (lat.44°,1920N e long.12°,2807E per via Parataglio) e (lat.44°,1962N e long.12.2804E per via Cerca)

### Determinazione della categoria del suolo di fondazione in base alla velocità equivalente di propagazione ( $V_{s30}$ ) delle onde di taglio

Metodo previsto dal D.M. 14 gennaio 2008.

Vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E ad ognuna delle quali è associato uno spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Classe	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30}$ superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ , compresi fra 360 m/s e 800 m/s ( $N_{snt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30}$ compresi fra 180 e 360 m/s ( $15 < N_{snt,30} < 50$ nei terreni a grana grossa, $70 < c_{u30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati oppure di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s30} < 180$ m/s ( $N_{snt,30} < 15$ nei terreni a grana grossa, $c_{u30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, giacenti su un substrato di riferimento ( $V_{s30} > 800$ m/s).

Classe	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s30}$ inferiori a 100 m/s (o $10 < cu_{30} < 20$ ), 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 argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria non rientrante nelle classi precedenti.

Per  $V_{s30}$  s'intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati fino ad una profondità di 30 metri dal piano di posa della fondazione, calcolata secondo la relazione:

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

Nelle pagine successive sono riportate metodologia e risultati delle indagini sismiche (MASW) realizzate nelle due aree in esame e dalle quali risulta un valore  $V_{s30} = 185 \text{ m/s}$  nell'area di via Parataglio e un valore  $V_{s30} = 193 \text{ m/s}$ , corrispondenti in entrambe le aree a suoli di categoria **C**.

### ALLEGATI

Metodologia e risultati delle indagini sismiche (MASW)

# COMUNE DI CESENA

PROVINCIA DI FORLÌ-CESENA

***Determinazione della categoria di suolo di fondazione eseguita sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ) dei terreni costituenti l'area sita in via Parataglio, presso la frazione San Giorgio nel comune di Cesena (FC). P.U.A. AT3-AT5 10/02.***



I.G.B. Snc  
Via della Tecnica 57/A4  
40068 San Lazzaro di Savena (BO)  
Tel 0516255377 – Cell 349 7846581  
Fax 0514998378  
E-mail igbsnc@gmail.com  
P.I. e C.F.: 02689571202



**Committente: Istituto Diocesano per il sostentamento del clero-  
Diocesi Cesena-Sarsina e altri**

Dott. Geol. Stefano Maggi

Agosto 2010



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## SOMMARIO.....

2	IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO	3
3	PREMESSE	4
4	DESCRIZIONE DELLE INDAGINI	5
4.1	Metodologia MASW ATTIVA (Multichannel Analysis of Surface Waves)	5
4.1.1	Introduzione generale	5
4.1.2	Onde superficiali di Rayleigh (onde R)	5
4.1.3	Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata	6
4.2	Tecnica MASW PASSIVA : procedura e strumentazione utilizzata	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
5	ACQUISIZIONE DATI	9
6	RISULTATI	10



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## 2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO

- ❑ Il presente documento viene identificato con il numero **67c.2010** rev. n°1;
- ❑ Le indagini ed il lavoro svolto sono stati coordinati dal Dott. Geol. **Stefano Maggi**;
- ❑ Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. **Stefano Maggi** in data **26/08/2010**;
- ❑ Il documento si compone di n°11 fogli e da n°12 pagine di allegati.





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

### **3 PREMESSE**

Su incarico del Dott. Geol. Andrea Magnani, per conto dell'Istituto Diocesano per il Sostentamento del Clero – Diocesi Cesena-Sarsina e Altri, in data 24/08/2010, è stata effettuata un'indagine geofisica mediante tecnica MASW attiva, nel territorio del comune di Cesena (FC), in via Parataglio.

L'indagine è stata eseguita al fine di ottenere la classificazione del tipo di suolo presente nel sito, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio verticali ( $V_s$ ) entro i primi 30 m di profondità, in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" (pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n. 30).

La presente indagine geofisica è consistita nell'esecuzione di N. 1 profilo sismico la cui ubicazione è riportata in Tav. 1 in allegato.

L'acquisizione è stata condotta tramite sismografo a 24 canali modello *DOLANG JEA 24* con scarico dei dati direttamente su p.c.

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è "MASW"© by Ing. Vitantonio Roma (All rights reserved).



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

### 4.1 Metodologia MASW ATTIVA (*Multichannel Analysis of Surface Waves*)

#### 4.1.1 Introduzione generale

La tecnica MASW venne introdotta per la prima volta nell'ambito della comunità geofisica e geotecnica agli inizi del 1999. La *Multichannel Analysis of Surface Waves* è un metodo sismico mediante il quale è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) in relazione alla profondità ( $V_s$  versus *profondità*), attraverso l'analisi delle onde superficiali tipo Rayleigh (onde  $R$ ). Tale tecnica permette quindi di ottemperare a quanto previsto nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", secondo il quale i terreni, su cui devono essere eseguite opere edili di una certa rilevanza, devono essere classificati sulla base del parametro  $V_{s30}$ . La classificazione prevista per i terreni comprende cinque categorie definite da una simbologia alfanumerica da  $A$  ad  $E$  e successive integrazioni  $S1$  e  $S2$ . A ciascuna di queste categorie corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. Il parametro  $V_{s30}$  rappresenta la media ponderata dei valori di velocità delle onde di taglio

$V_{s30}$  nei primi 30 metri di sottosuolo indagato e viene espressa matematicamente dalla seguente equazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}$$

dove  $V_{s30}$  : velocità media ponderata delle onde di taglio "S";  
 $h_i$  : spessore dello strato esimo;  
 $v_i$  : velocità delle onde di taglio "S" nello strato esimo.

#### 4.1.2 Onde superficiali di Rayleigh (onde $R$ )

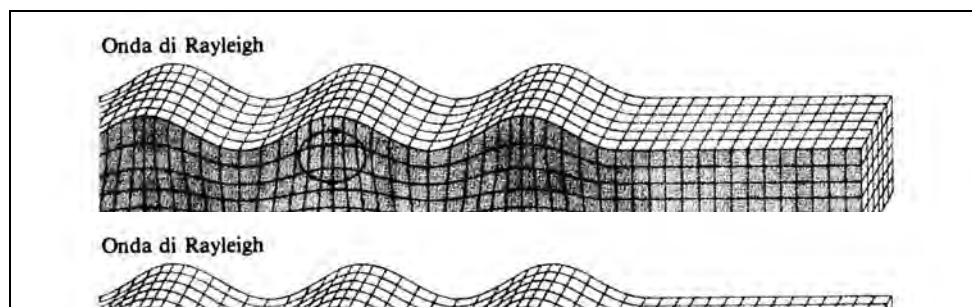
Esistono diversi tipi di onde superficiali, oltre alle già citate onde di Rayleigh ( $P+S_v$ ), si conoscono le onde di Love ( $Sh$ ) e le onde di Lamb. Le onde di Rayleigh rappresentano la componente principale delle onde superficiali e sono generate dall'interazione tra onde di compressione (o di volume)  $P$  e onde di taglio verticali  $S_v$  ogniqualevolta si è in presenza di una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Le onde  $R$  si propagano alla superficie libera (vedi Fig. 1) con un moto ellittico retrogrado (moto antiorario) che si inverte alla profondità di  $\lambda/2\pi$  (dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda). L'ampiezza di tale spostamento decresce secondo una legge esponenziale, pertanto diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

L'utilizzo delle onde superficiali di tipo Rayleigh per la costruzione di un profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  è giustificato da una serie di fattori:

- La percentuale di energia convertita in onde  $R$  è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde  $P$  (7%) e onde  $S$  (26%);



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.



**Figura 1 - Modalità di propagazione delle onde R**

- ❑ il metodo d'analisi basato sulle onde *R* non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- ❑ buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;
- ❑ la propagazione delle onde di *Rayleigh*, anche se influenzata dalla  $V_p$  (velocità delle onde di compressione  $P$ ) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della  $V_s$  che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

Tenuto conto dei fattori sopraelencati, l'elemento fondamentale che permette l'impiego di tecniche basate sulle onde superficiali, in questo caso la tecnica *MASW* e le onde *Rayleigh*, è una caratteristica chiamata *dispersione*. La dispersione è una proprietà delle onde superficiali che consiste nella deformazione di un treno d'onde dovuta alla variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza. Per le onde *R* questa variazione si manifesta solo all'interno di un mezzo stratificato. In altre parole, ipotizzando una variazione di densità del terreno in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda  $\lambda$  (e quindi per una certa frequenza  $\nu$ ) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di  $\lambda/2$  (anche se recenti studi hanno posto questo limite a  $\lambda/2.5$ ). Inoltre, la velocità delle onde *R* ( $V_r$ ) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ).

Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di *Rayleigh*, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

#### **4.1.3 Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata**

La procedura *MASW* si può sintetizzare in tre stadi successivi e distinti:

- ❑ acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

- ❑ costruzione della curva di dispersione : grafico velocità di fase  $V_r$  – frequenza  $\nu$ ;
- ❑ inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale della  $V_s$  (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato).

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, quale generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi Fig. 2). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la strumentazione DOLANG JEA 24 descritta nelle premesse.

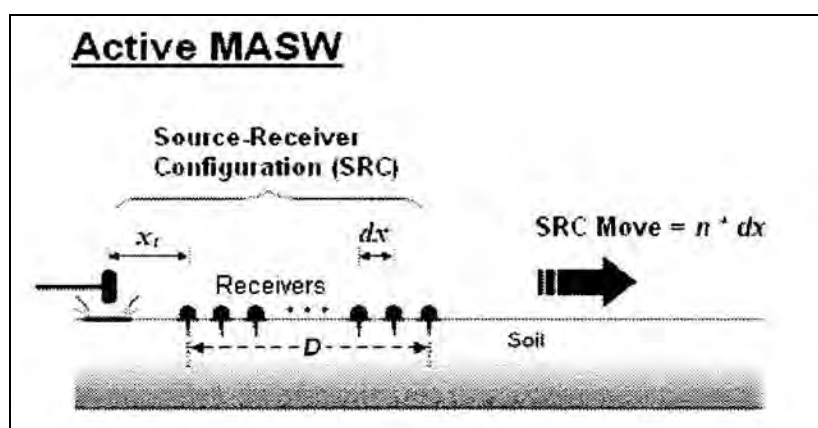


Figura 2 - MASW ATTIVA : stendimento lineare e sorgente attiva

I dati così acquisiti in campagna vengono quindi elaborati utilizzando il software "MASW© by Vitantonio Roma". In particolare mediante il software si procede alla lettura dei dati acquisiti (*common-shot gather*) e al calcolo dello spettro nel dominio frequenza – numero d'onda (spettro f-k). Quindi, dallo spettro f-k è possibile estrarre la curva di dispersione apparente sperimentale (si veda fig. 2 nel rapporto in allegato) mediante una doppia trasformata di Fourier applicata al campo di moto misurato nel dominio spazio - tempo. Sulla curva di dispersione sperimentale viene effettuato il cosiddetto *Picking* (si veda fig. 4 nel rapporto in allegato), cioè la selezione dei punti che, nell'interpretazione dell'utente, appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale di *Rayleigh*. L'identificazione ed il *Picking* della curva di dispersione sono un'operazione di importanza cruciale. I punti sperimentali ottenuti mediante l'operazione di *Picking* effettuata a partire dalla curva di dispersione apparente sperimentale, devono coincidere il più possibile con le curve teoriche numeriche descritte di seguito.

La curva di dispersione apparente numerica (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato) si ottiene in maniera identica alla procedura usata per ottenere la curva di dispersione sperimentale, con l'unica diversità che riguarda la maniera in cui si calcola lo spettro del campo di moto. Mentre nella procedura sperimentale si applica una doppia trasformata di Fourier nella procedura numerica si applica una sola trasformata di Fourier. La curva di dispersione effettiva (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato) si ottiene con un metodo alternativo proposto da Lai e Rix (Lai, 1998).





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

L'ultimo passo da affrontare è l'inversione della curva di dispersione precedentemente costruita. Questa operazione viene effettuata grazie all'utilizzo di una potente tecnica di ottimizzazione basata su algoritmi genetici. Il risultato finale è quello di ottenere il profilo verticale della velocità delle onde di taglio  $V_s$ .

Il grado di incertezza del profilo di  $V_s$  finale dipende dai seguenti fattori:

- ❑ incertezza associata alle misure sperimentali: è rappresentata dall'intervallo di variazione della velocità di fase apparente sperimentale ad una determinata frequenza. Tale range di variazione viene assegnato a ciascun punto sperimentale nella fase di Picking (fig. 4 nel rapporto in allegato);
- ❑ propagazione dell'incertezza nel modello di simulazione numerica;
- ❑ errore relativo o distanza tra curve di dispersione sperimentale e numeriche teoriche (apparente/effettiva). L'errore relativo è un indicatore oggettivo della sovrapposizione tra curva di dispersione sperimentale e teorica numerica.

Generalmente un errore relativo tra curva sperimentale e teorica inferiore al 10% indica il raggiungimento di un buon risultato con un profilo di  $V_s$  valido da un punto di vista progettuale. A parità di errore relativo l'utente può scegliere il profilo di  $V_s$  sulla base della migliore sovrapposizione visiva tra le curve sperimentale e teorica.

L'elaborazione dei dati acquisiti nel sito in questione è riportata in dettaglio nel rapporto d'indagine allegato alla presente relazione.

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 5 ACQUISIZIONE DATI

Come anticipato nelle premesse, l'indagine geofisica condotta nel presente lavoro ha visto l'esecuzione di n° 1 stendimento sismico. Per acquisire i dati è stata impiegata la strumentazione *Dolang JEA 24*.

I parametri di campionamento utilizzati nella presente indagine sono riportate in tabella 1.

Modello sismografo	Risoluzione	n° canali	sorgente	Frequenza geofoni	Tipologia geofoni	Velocità di campionamento	Frequenza di campionamento
JEA 24	24 bit	24	Mazza (10 Kg)	4.5 Hz	verticali	250 microsec.	4000 Hz

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata e parametri di acquisizione (metodo MASW attivo)

Nella sottostante tabella vengono riportate sinteticamente le caratteristiche geometriche del profilo sismico effettuato:

Identificazione	Lunghezza da 1° a 24° geofono ricevitore (m)	Passo intergeofonico (m)	N° Geofoni impiegati (verticali)	Distanza Punto di scoppio-1° geofono ricevitore (m)
<b>Via Parataglio</b>	46.00	2.00	24	2.00-4.00

Tabella 2 – Dati geometrici del profilo effettuato



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 6 RISULTATI

L'analisi del modello sismico ottenuto per il profilo effettuato evidenzia la presenza di **5 sismostrati**. Nella sottostante tabella sono riportate le profondità e ed i valori di Vs dei **sismostrati individuati** (si veda fig. 5 nel relativo rapporto in allegato).

STENDIMENTO SISMICO "VIA PARATAGLIO"		
Sismostrato	Profondità (m)	Vs (m/s)
1	0.00-2.00	202
2	2.00-5.00	116
3	5.00-10.00	179
4	10.00-17.00	195
5	17.00-35.00	210
6	> 35.00	222

Sulla base di quanto riportato in tabella, la velocità media equivalente delle onde di taglio S nei primi 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), **con riferimento alla quota del piano campagna su cui è stato eseguito il profilo, risulta pari a 185 m/s. Pertanto, unicamente in riferimento ai valori riportati in tabella e al valore di  $V_{s30}$  ottenuto dal profilo sismico, è possibile collocare il sottosuolo in classe C.**

La categoria di suolo così determinata dovrà essere valutata e verificata con i dati e le informazioni di carattere lito-stratigrafico ottenute mediante l'esecuzione di opportune indagini geognostiche.

In fase di progettazione il valore di  $V_{s30}$  dovrà essere calcolato da piano di posa delle fondazioni.

La quota raggiunta pari a -35.00 m (sismostrato n° 6 in tabella) dal p.c. indica l'interfaccia in corrispondenza della quale è stata individuata l'ultima variazione di velocità delle onde di taglio S.

Il valore di  $V_{s30}$  ottenuto è da riferirsi alla verticale di terreno posta in corrispondenza del punto mediano dell'allineamento sismico effettuato.

San Lazzaro di Savena (BO), 26/08/2010



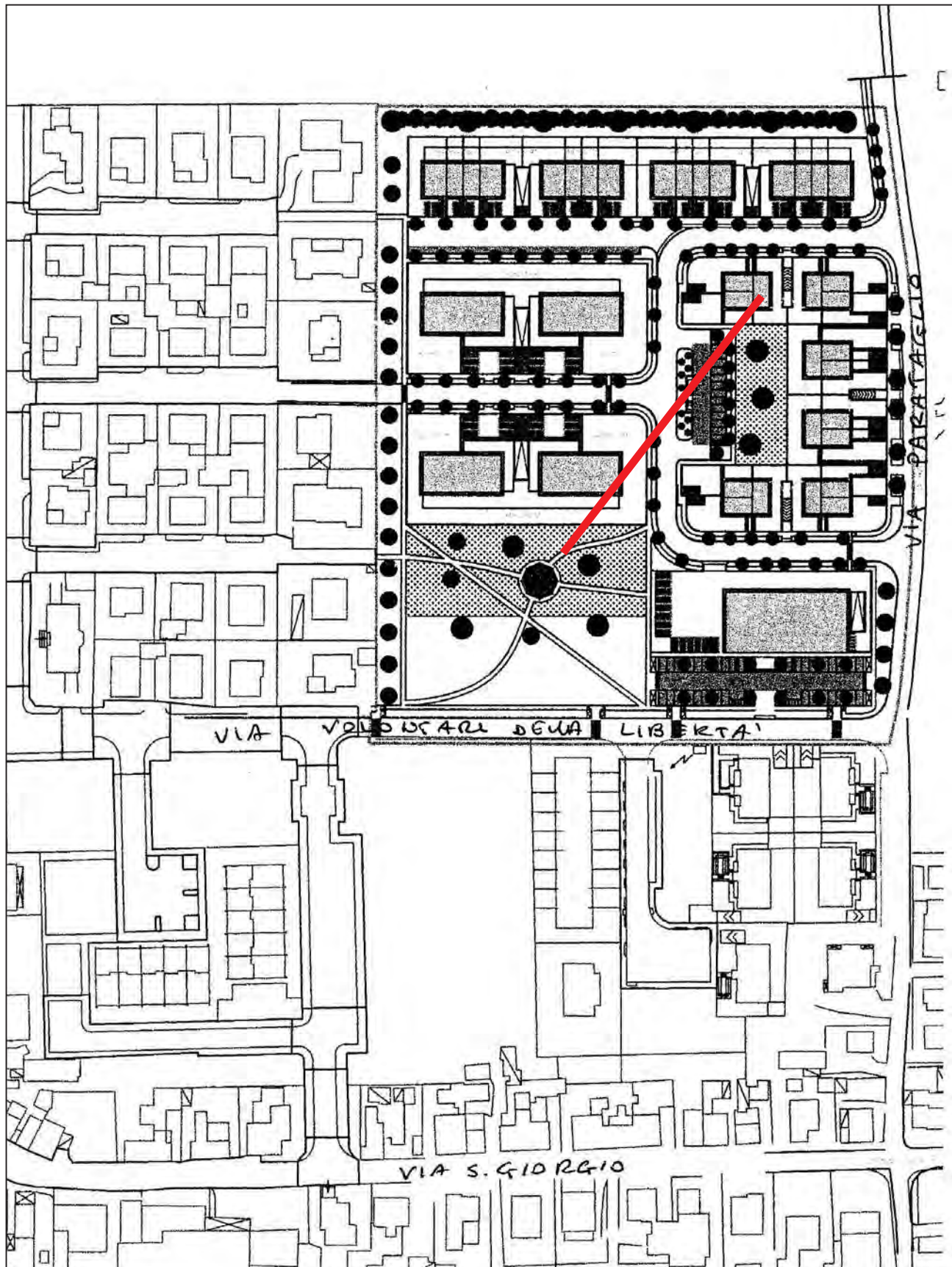


Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via Parataglio. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## **ALLEGATI**

- Tav. 1 – Ubicazione profilo (n° 1)
  
- Rapporto stendimento sismico (n° 10)



  
 Profilo sismico effettuato  
 con tecnica MASW



TAV. 1  
 Ubicazione indagine  
 geofisica

Agosto 2010

Committente:  
 Istituto Diocesano per il  
 sostentamento del clero  
 Diocesi Cesena-Sarsina e altri

Planimetria  
 generale





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

# Rapporto indagine geofisica eseguita mediante tecnica masw attiva

**Autore: I.G.B. SNC**

**Committente: ISTITUTO DIOCESANO PER IL SOSTENTAMENTO  
DEL CLERO – DIOCESI CESENA-SARSINA E ALTRI**

**Sito: SAN GIORGIO DI CESENA (FC) – VIA PARATAGLIO  
P.U.A. AT3-AT5 10/02**

**Data di effettuazione: 24/08/2010**

Software utilizzato nell'elaborazione: "MASW"©  
by Ing. Vitantonio Roma. All rights reserved.

**IGB Snc via della Tecnica 57/A4 - 40068 San Lazzaro di Savena (BO)  
Tel 051 6255377 - Fax 051 4998378 - Cell 349 7846581 - E-mail [igsnc@gmail.com](mailto:igsnc@gmail.com)**



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 1 – Dati Sperimentali (Tecnica attiva)

Numero di ricevitori.....	24
Numero di campioni temporali .....	4096
Passo temporale di acquisizione .....	0.25ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi .....	24
L'intervallo considerato per l'analisi comincia a.....	0ms
L'intervallo considerato per l'analisi termina a .....	4000ms
I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)	

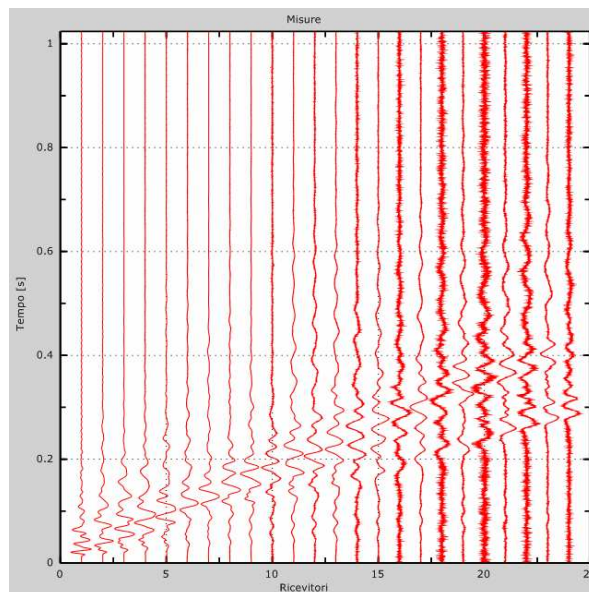


Figura 1: Tracce sperimentali (MASW attiva)

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 2 – Risultati dell'analisi

Frequenza finale ..... 50Hz  
Frequenza iniziale ..... 2Hz

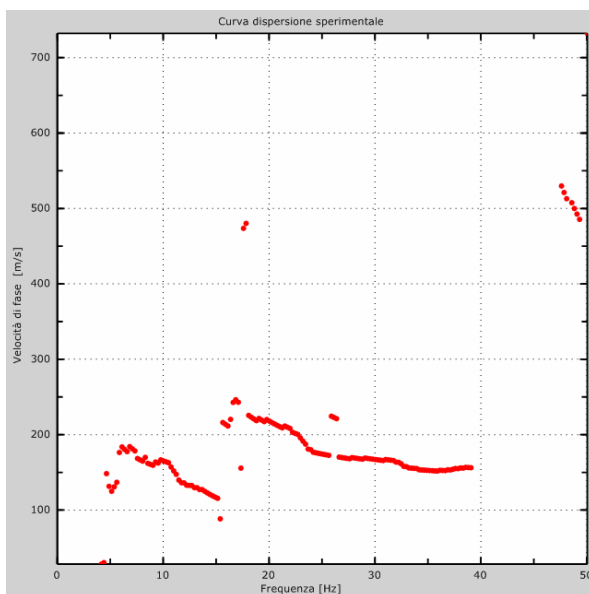


Figura 2: Curva di dispersione apparente sperimentale ottenuta mediante tecnica MASW attiva





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

### 3 – Curva di dispersione

Tabella 1: Picking della curva di dispersione sperimentale e relativo range di variazione (valori numerici riportati graficamente in fig. 3)

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
3.69869	193.994	164.922	223.065
4.71125	189.633	178.004	201.262
5.54227	186.003	176.653	195.354
6.68818	181.848	174.575	189.12
7.68462	169.9	163.667	176.134
8.53159	163.667	161.069	166.264
9.37856	161.589	156.394	166.783
10.8732	152.758	149.122	156.394
11.77	137.174	133.538	140.81
13.0156	129.382	126.785	131.979
14.2113	122.629	119.512	125.746
20.4532	214.736	211.239	218.234
22.8113	194.916	191.418	198.414
24.1587	178.01	175.387	180.634
28.4538	168.1	166.351	169.849
32.412	160.522	158.773	162.271

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

35.2754	153.526	152.069	154.984
38.8967	155.858	154.401	157.315

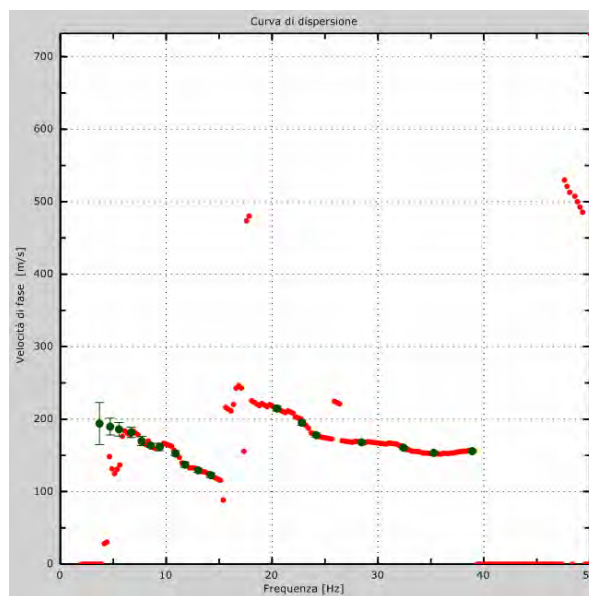


Figura 3: curva di dispersione sperimentale ottenuta mediante tecnica MASW attiva (rappresentazione grafica) e relativo picking. A ciascun punto sperimentale in verde è assegnato un range di variazione della velocità di fase riportato nella tabella precedente.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 5 - Profilo in sito

Numero di strati (escluso semispazio) .....	7
Spaziatura ricevitori [m] .....	2m
Numero ricevitori .....	24
Numero modi .....	5
<b>Strato 1</b>	
h [m] .....	2
z [m] .....	-2
Vs fin.[m/s] .....	202.000
<b>Strato 2</b>	
h [m] .....	3
z [m] .....	-5
Vs fin.[m/s] .....	116.000
<b>Strato 3</b>	
h [m] .....	5
z [m] .....	-10
Vs fin.[m/s] .....	179.000
<b>Strato 4</b>	
h [m] .....	7
z [m] .....	-17
Vs fin.[m/s] .....	195.000
<b>Strato 5</b>	
h [m] .....	7
z [m] .....	-24
Vs fin.[m/s] .....	210.000
<b>Strato 6</b>	
h [m] .....	11
z [m] .....	-35
Vs fin.[m/s] .....	210.000
<b>Strato 7</b>	
h [m] .....	0
z [m] .....	-∞
Vs fin.[m/s] .....	222.000



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

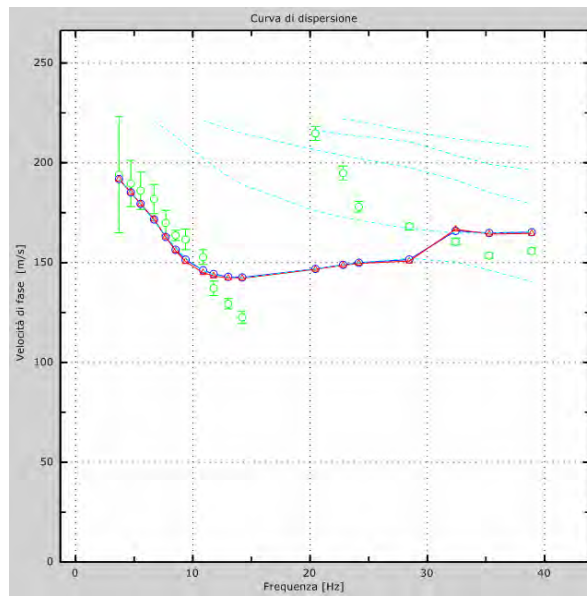


Figura 5: Velocità numeriche – punti sperimentali (Picking - verde), modo fondamentale di Rayleigh (linea azzurra), curva teorica numerica effettiva (linea rossa), curva teorica numerica apparente (linea blu)

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

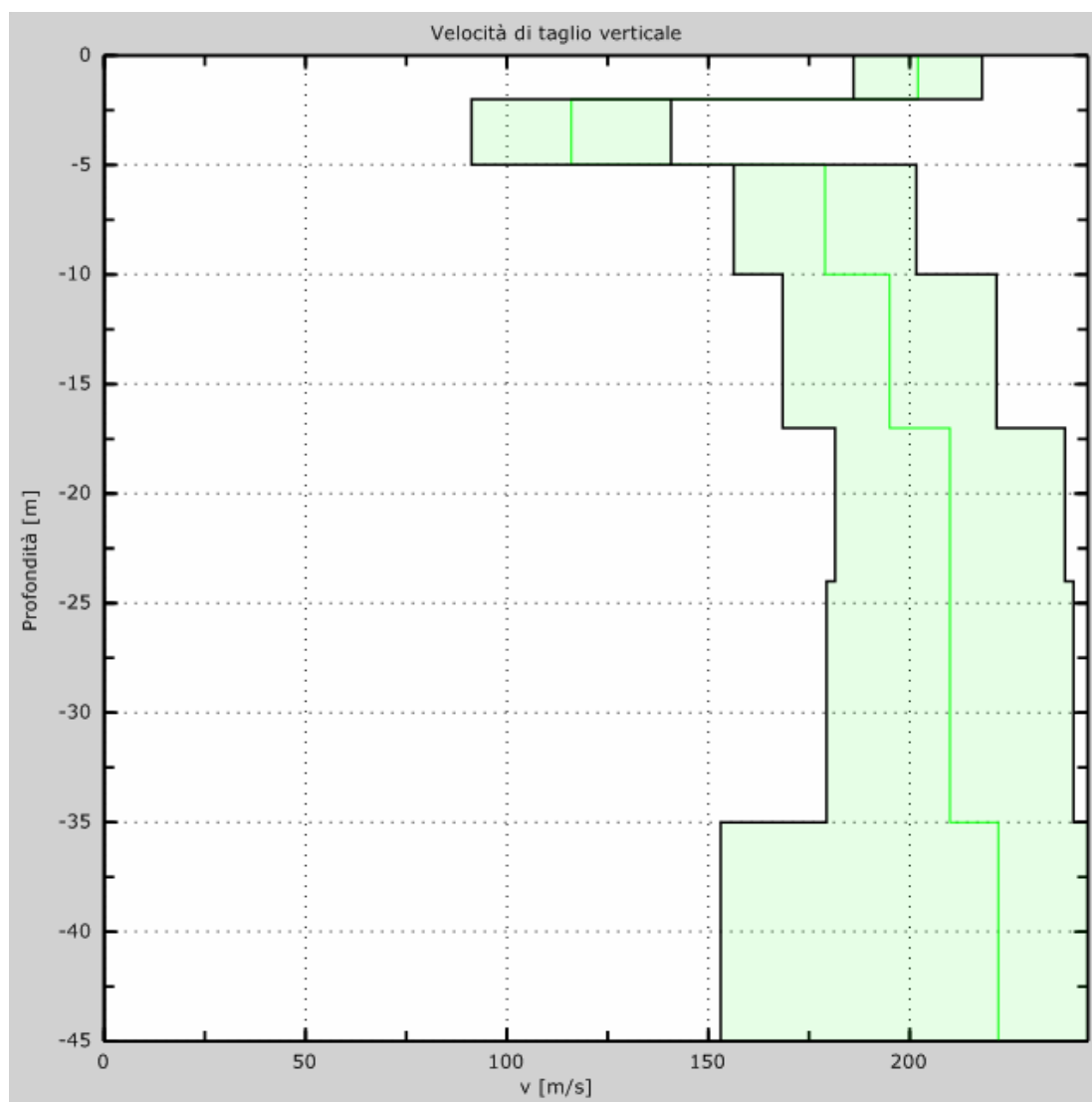


Figura 6: Profilo verticale delle  $V_s$  riferito al punto medio dell'allineamento sismico



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## 6 – Risultati finali

Piano di riferimento z = piano campagna attuale

$V_{s30}$  [m/s].....185

La normativa applicata è il DM 14 gennaio 2008

**Categoria di suolo determinata unicamente sulla base dei risultati della sola prova masw (media ponderata della velocità equivalente di propagazione delle onde S entro i primi 30 m di profondità dal p.c. su cui è stato eseguito lo stendimento sismico) .....C**

La categoria di suolo così determinata dovrà essere comunque valutata e verificata con i dati e le informazioni di carattere lito-stratigrafico ottenute mediante l'esecuzione di opportune indagini geognostiche.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC), via Parataglio. – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## Appendice

### Categorie di suolo

**Tipo 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 3 m.

**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  $V_{s,30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero  $NSPT_{30} > 50$  nei terreni a granagrossa e  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo C:** Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o di 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  $15 < NSPT_{30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo D:** Depositati 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  $NSPT_{30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo E:** Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con  $V_s > 800$  m/s).

**Tipo S1:** Depositati di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s,30}$  inferiori a 100 m/s (ovvero  $10 < cu_{,30} < 20$  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.

**Tipo S2:** Depositati di terreno liquefacibile o argille sensitive o altri profili di terreno non inclusi nei tipi A, B, C, D, E o S1. Attenzione: la nuova norma classifica come S2 una serie di siti che prima erano classificati come B, C, D, E.



# COMUNE DI CESENA

PROVINCIA DI FORLÌ-CESENA

***Determinazione della categoria di suolo di fondazione eseguita sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ) dei terreni costituenti l'area sita in via della Cerca, presso la frazione San Giorgio nel comune di Cesena (FC). P.U.A. AT3-AT5 10/02.***



I.G.B. Snc  
Via della Tecnica 57/A4  
40068 San Lazzaro di Savena (BO)  
Tel 0516255377 – Cell 349 7846581  
Fax 0514998378  
E-mail igbsnc@gmail.com  
P.I. e C.F.: 02689571202



**Committente: Istituto Diocesano per il sostentamento del clero-  
Diocesi Cesena-Sarsina e altri**

Dott. Geol. Stefano Maggi

Agosto 2010



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

<b>SOMMARIO.....</b>	
2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO _____	3
3 PREMESSE _____	4
4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI _____	5
4.1 Metodologia MASW ATTIVA (Multichannel Analysis of Surface Waves) _____	5
4.1.1 Introduzione generale _____	5
4.1.2 Onde superficiali di Rayleigh (onde R) _____	5
4.1.3 Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata _____	6
4.2 Tecnica MASW PASSIVA : procedura e strumentazione utilizzata _____	8
5 ACQUISIZIONE DATI _____	10
6 RISULTATI _____	11



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## 2 IDENTIFICAZIONE DEL DOCUMENTO

- ❑ Il presente documento viene identificato con il numero **67b.2010** rev. n° 1;
- ❑ Le indagini ed il lavoro svolto sono stati coordinati dal Dott. Geol. **Stefano Maggi**;
- ❑ Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. **Stefano Maggi** in data **26/08/2010**;
- ❑ Il documento si compone di n°12 fogli e da n°12 pagine di allegati.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

### **3 PREMESSE**

Su incarico del Dott. Geol. Andrea Magnani, per conto dell'Istituto Diocesano per il Sostentamento del Clero – Diocesi Cesena-Sarsina e Altri, in data 24/08/2010, è stata effettuata un'indagine geofisica mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi), nel territorio del comune di Cesena (FC), in via Della Cerca.

L'indagine è stata eseguita al fine di ottenere la classificazione del tipo di suolo presente nel sito, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio verticali ( $V_s$ ) entro i primi 30 m di profondità, in ottemperanza a quanto riportato nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" (pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n. 30).

La presente indagine geofisica è consistita nell'esecuzione di N. 1 profilo sismico la cui ubicazione è riportata in Tav. 1 in allegato.

L'acquisizione è stata condotta tramite sismografo a 24 canali modello *DOLANG JEA 24* con scarico dei dati direttamente su p.c.

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è "MASW"© by Ing. Vitantonio Roma (All rights reserved).





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 4 DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

### 4.1 Metodologia MASW ATTIVA (*Multichannel Analysis of Surface Waves*)

#### 4.1.1 Introduzione generale

La tecnica MASW venne introdotta per la prima volta nell'ambito della comunità geofisica e geotecnica agli inizi del 1999. La *Multichannel Analysis of Surface Waves* è un metodo sismico mediante il quale è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) in relazione alla profondità ( $V_s$  versus *profondità*), attraverso l'analisi delle onde superficiali tipo Rayleigh (onde  $R$ ). Tale tecnica permette quindi di ottemperare a quanto previsto nel decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni", secondo il quale i terreni, su cui devono essere eseguite opere edili di una certa rilevanza, devono essere classificati sulla base del parametro  $V_{s30}$ . La classificazione prevista per i terreni comprende cinque categorie definite da una simbologia alfanumerica da  $A$  ad  $E$  e successive integrazioni  $S1$  e  $S2$ . A ciascuna di queste categorie corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. Il parametro  $V_{s30}$  rappresenta la media ponderata dei valori di velocità delle onde di taglio

$V_{s30}$  nei primi 30 metri di sottosuolo indagato e viene espressa matematicamente dalla seguente equazione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}}$$

dove  $V_{s30}$  : velocità media ponderata delle onde di taglio "S";  
 $h_i$  : spessore dello strato esimo;  
 $v_i$  : velocità delle onde di taglio "S" nello strato esimo.

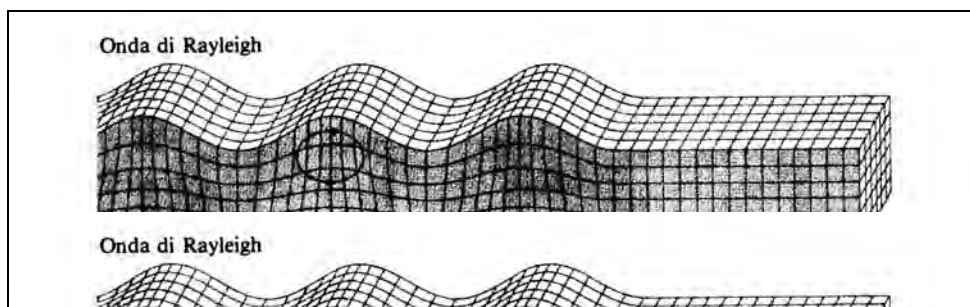
#### 4.1.2 Onde superficiali di Rayleigh (onde $R$ )

Esistono diversi tipi di onde superficiali, oltre alle già citate onde di Rayleigh ( $P+S_v$ ), si conoscono le onde di Love ( $Sh$ ) e le onde di Lamb. Le onde di Rayleigh rappresentano la componente principale delle onde superficiali e sono generate dall'interazione tra onde di compressione (o di volume)  $P$  e onde di taglio verticali  $S_v$  ogniqualevolta si è in presenza di una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Le onde  $R$  si propagano alla superficie libera (vedi Fig. 1) con un moto ellittico retrogrado (moto antiorario) che si inverte alla profondità di  $\lambda/2\pi$  (dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda). L'ampiezza di tale spostamento decresce secondo una legge esponenziale, pertanto diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

L'utilizzo delle onde superficiali di tipo Rayleigh per la costruzione di un profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  è giustificato da una serie di fattori:

- La percentuale di energia convertita in onde  $R$  è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde  $P$  (7%) e onde  $S$  (26%);

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.



**Figura 1 - Modalità di propagazione delle onde R**

- ❑ il metodo d'analisi basato sulle onde *R* non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- ❑ buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;
- ❑ la propagazione delle onde di *Rayleigh*, anche se influenzata dalla  $V_p$  (velocità delle onde di compressione  $P$ ) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della  $V_s$  che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

Tenuto conto dei fattori sopraelencati, l'elemento fondamentale che permette l'impiego di tecniche basate sulle onde superficiali, in questo caso la tecnica *MASW* e le onde *Rayleigh*, è una caratteristica chiamata *dispersione*. La dispersione è una proprietà delle onde superficiali che consiste nella deformazione di un treno d'onde dovuta alla variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza. Per le onde *R* questa variazione si manifesta solo all'interno di un mezzo stratificato. In altre parole, ipotizzando una variazione di densità del terreno in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda  $\lambda$  (e quindi per una certa frequenza  $\nu$ ) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di  $\lambda/2$  (anche se recenti studi hanno posto questo limite a  $\lambda/2.5$ ). Inoltre, la velocità delle onde *R* ( $V_r$ ) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ).

Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di *Rayleigh*, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

#### **4.1.3 Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata**

La procedura *MASW* si può sintetizzare in tre stadi successivi e distinti:

- ❑ acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

- ❑ costruzione della curva di dispersione : grafico velocità di fase  $V_r$  – frequenza  $\nu$ ;
- ❑ inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale della  $V_s$  (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato).

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, quale generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi Fig. 2). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la strumentazione DOLANG JEA 24 descritta nelle premesse.

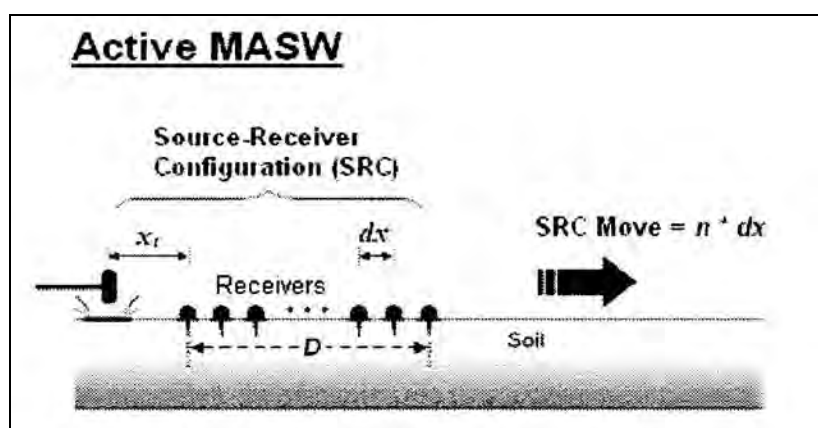


Figura 2 - MASW ATTIVA : stendimento lineare e sorgente attiva

I dati così acquisiti in campagna vengono quindi elaborati utilizzando il software "MASW© by Vitantonio Roma". In particolare mediante il software si procede alla lettura dei dati acquisiti (*common-shot gather*) e al calcolo dello spettro nel dominio frequenza – numero d'onda (spettro f-k). Quindi, dallo spettro f-k è possibile estrarre la curva di dispersione apparente sperimentale (si veda fig. 2 nel rapporto in allegato) mediante una doppia trasformata di Fourier applicata al campo di moto misurato nel dominio spazio - tempo. Sulla curva di dispersione sperimentale viene effettuato il cosiddetto *Picking* (si veda fig. 4 nel rapporto in allegato), cioè la selezione dei punti che, nell'interpretazione dell'utente, appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale di *Rayleigh*. L'identificazione ed il *Picking* della curva di dispersione sono un'operazione di importanza cruciale. I punti sperimentali ottenuti mediante l'operazione di *Picking* effettuata a partire dalla curva di dispersione apparente sperimentale, devono coincidere il più possibile con le curve teoriche numeriche descritte di seguito.

La curva di dispersione apparente numerica (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato) si ottiene in maniera identica alla procedura usata per ottenere la curva di dispersione sperimentale, con l'unica diversità che riguarda la maniera in cui si calcola lo spettro del campo di moto. Mentre nella procedura sperimentale si applica una doppia trasformata di Fourier nella procedura numerica si applica una sola trasformata di Fourier. La curva di dispersione effettiva (si veda fig. 5 nel rapporto in allegato) si ottiene con un metodo alternativo proposto da Lai e Rix (Lai, 1998).



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

L'ultimo passo da affrontare è l'inversione della curva di dispersione precedentemente costruita. Questa operazione viene effettuata grazie all'utilizzo di una potente tecnica di ottimizzazione basata su algoritmi genetici. Il risultato finale è quello di ottenere il profilo verticale della velocità delle onde di taglio  $V_s$ .

Il grado di incertezza del profilo di  $V_s$  finale dipende dai seguenti fattori:

- ❑ incertezza associata alle misure sperimentali: è rappresentata dall'intervallo di variazione della velocità di fase apparente sperimentale ad una determinata frequenza. Tale range di variazione viene assegnato a ciascun punto sperimentale nella fase di Picking (fig. 4 nel rapporto in allegato);
- ❑ propagazione dell'incertezza nel modello di simulazione numerica;
- ❑ errore relativo o distanza tra curve di dispersione sperimentale e numeriche teoriche (apparente/effettiva). L'errore relativo è un indicatore oggettivo della sovrapposizione tra curva di dispersione sperimentale e teorica numerica.

Generalmente un errore relativo tra curva sperimentale e teorica inferiore al 10% indica il raggiungimento di un buon risultato con un profilo di  $V_s$  valido da un punto di vista progettuale. A parità di errore relativo l'utente può scegliere il profilo di  $V_s$  sulla base della migliore sovrapposizione visiva tra le curve sperimentale e teorica.

L'elaborazione dei dati acquisiti nel sito in questione è riportata in dettaglio nel rapporto d'indagine allegato alla presente relazione.

#### **4.2 Tecnica MASW PASSIVA : procedura e strumentazione utilizzata**

A differenza del convenzionale metodo MASW attivo, il quale prevede l'utilizzo di una sorgente sismica attiva (es: mazza battente) e di un profilo lineare di geofoni, la tecnica MASW passiva utilizza onde di superficie generate passivamente dall'ambiente circostante. L'origine di questo cosiddetto "rumore di fondo" è sia di tipo naturale (onde oceaniche di marea, perturbazioni atmosferiche) sia di tipo antropico (traffico veicolare, industrie, ferrovie, etc...). Il metodo MASW passivo si può distinguere in due diverse categorie sulla base della particolare tecnica con cui si esegue l'indagine:

- ❑ metodo *passive remote* (Park et al., 2004; 2005);
- ❑ metodo *passive roadside* (Park & Miller, 2006).

Il metodo *passive remote* prevede la realizzazione di uno stendimento bidimensionale mediante la disposizione dei geofoni secondo una geometria a croce, circolare, quadrata o a triangolo (vedi Fig. 3).



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

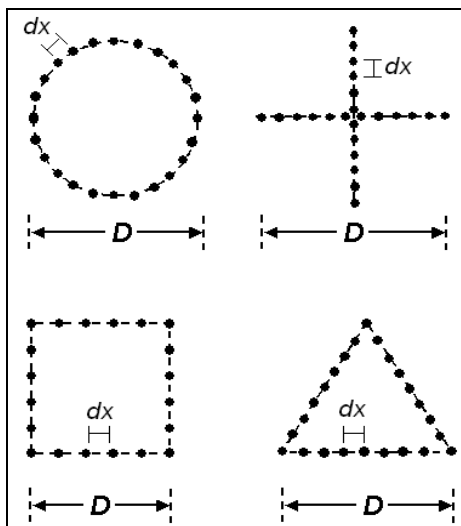


Figura 3 - Possibili configurazioni geometriche nel metodo *passive remote*

Tale metodo è il più accurato per ottenere il profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , tuttavia prevede la necessità di ampi spazi per potere realizzare il profilo prescelto e di conseguenza una mole di lavoro maggiore da svolgere in campagna.

Il metodo *passive roadside* (utilizzato nel presente studio) adotta invece il convenzionale stendimento lineare di geofoni e cerca di sfruttare principalmente le onde di superficie generate dal traffico veicolare locale (vedi Fig. 4). Tale metodologia permette di superare le difficoltà legate all'eventuale indisponibilità di ampi spazi, dove potrebbe non essere possibile realizzare profili secondo il metodo *passive remote*, ma presenta una precisione inferiore di circa il 10% rispetto ad esso.

Anche in questo caso i dati acquisiti sono stati elaborati utilizzando il software "MASW by Vitantonio Roma" opportunamente implementato per l'analisi passiva.

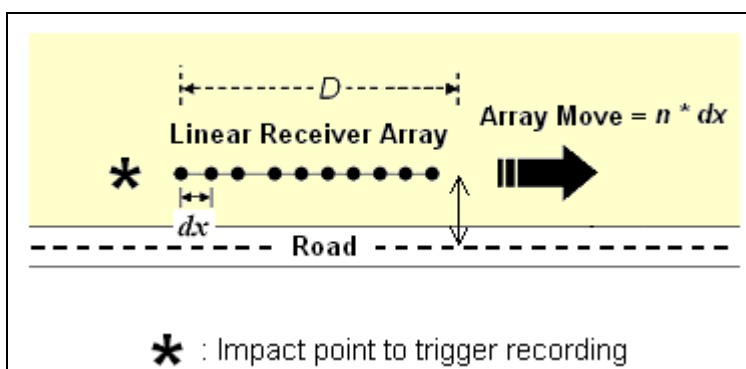


Figura 4 - metodo MASW *passive roadside*

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 5 ACQUISIZIONE DATI

Come anticipato nelle premesse, l'indagine geofisica condotta nel presente lavoro ha visto l'esecuzione di n° 1 stendimento sismico. Per acquisire i dati è stata impiegata la strumentazione *Dolang JEA 24*.

I parametri di campionamento utilizzati nella presente indagine sono riportate in tabella 1.

Modello sismografo	Risoluzione	n° canali	sorgente	Frequenza geofoni	Tipologia geofoni	Velocità di campionamento	Frequenza di campionamento
JEA 24	24 bit	24	Mazza (10 Kg)	4.5 Hz	verticali	250 microsec.	4000 Hz

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata e parametri di acquisizione (metodo MASW attivo)

Modello sismografo	Risoluzione	n° canali	sorgente	Frequenza geofoni	Tipologia geofoni	Velocità di campionamento	Frequenza di campionamento
JEA 24	24 bit	24	Rumore ambientale	4.5 Hz	verticali	8000 microsec.	125 Hz

Tabella 2 - Caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata e parametri di acquisizione (metodo MASW passivo)

Nella sottostante tabella vengono riportate sinteticamente le caratteristiche geometriche del profilo sismico effettuato:

Identificazione	Lunghezza da 1° a 24° geofono ricevitore (m)	Passo intergeofonico (m)	N° Geofoni impiegati (verticali)	Distanza Punto di scoppio-1° geofono ricevitore (m)
<b>Via della Cerca</b>	69.00	3.00	24	3.00-6.00

Tabella 3 – Dati geometrici del profilo effettuato

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 6 RISULTATI

L'analisi del modello sismico ottenuto per il profilo effettuato evidenzia la presenza di **6 sismostrati**. Nella sottostante tabella sono riportate le profondità e ed i valori di Vs dei **sismostrati individuati** (si veda fig. 6 nel relativo rapporto in allegato).

STENDIMENTO SISMICO "VIA DELLA CERCA"		
Sismostrato	Profondità (m)	Vs (m/s)
1	0.00-1.50	277
2	1.50-4.00	133
3	4.00-8.00	144
4	8.00-13.00	178
5	13.00-22.00	196
6	22.00-35.00	277
7	> 35.00	297

Sulla base di quanto riportato in tabella, la velocità media equivalente delle onde di taglio S nei primi 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), **con riferimento alla quota del piano campagna su cui è stato eseguito il profilo, risulta pari a 193 m/s. Pertanto, unicamente in riferimento ai valori riportati in tabella e al valore di  $V_{s30}$  ottenuto dal profilo sismico, è possibile collocare il sottosuolo in classe C.**

La categoria di suolo così determinata dovrà essere valutata e verificata con i dati e le informazioni di carattere lito-stratigrafico ottenute mediante l'esecuzione di opportune indagini geognostiche.

In fase di progettazione il valore di  $V_{s30}$  dovrà essere calcolato da piano di posa delle fondazioni.

La quota raggiunta pari a -35.00 m (sismostrato n° 7 in tabella) dal p.c. indica l'interfaccia in corrispondenza della quale è stata individuata l'ultima variazione di velocità delle onde di taglio S.

Il valore di  $V_{s30}$  ottenuto è da riferirsi alla verticale di terreno posta in corrispondenza del punto mediano dell'allineamento sismico effettuato.

San Lazzaro di Savena (BO), 26/08/2010





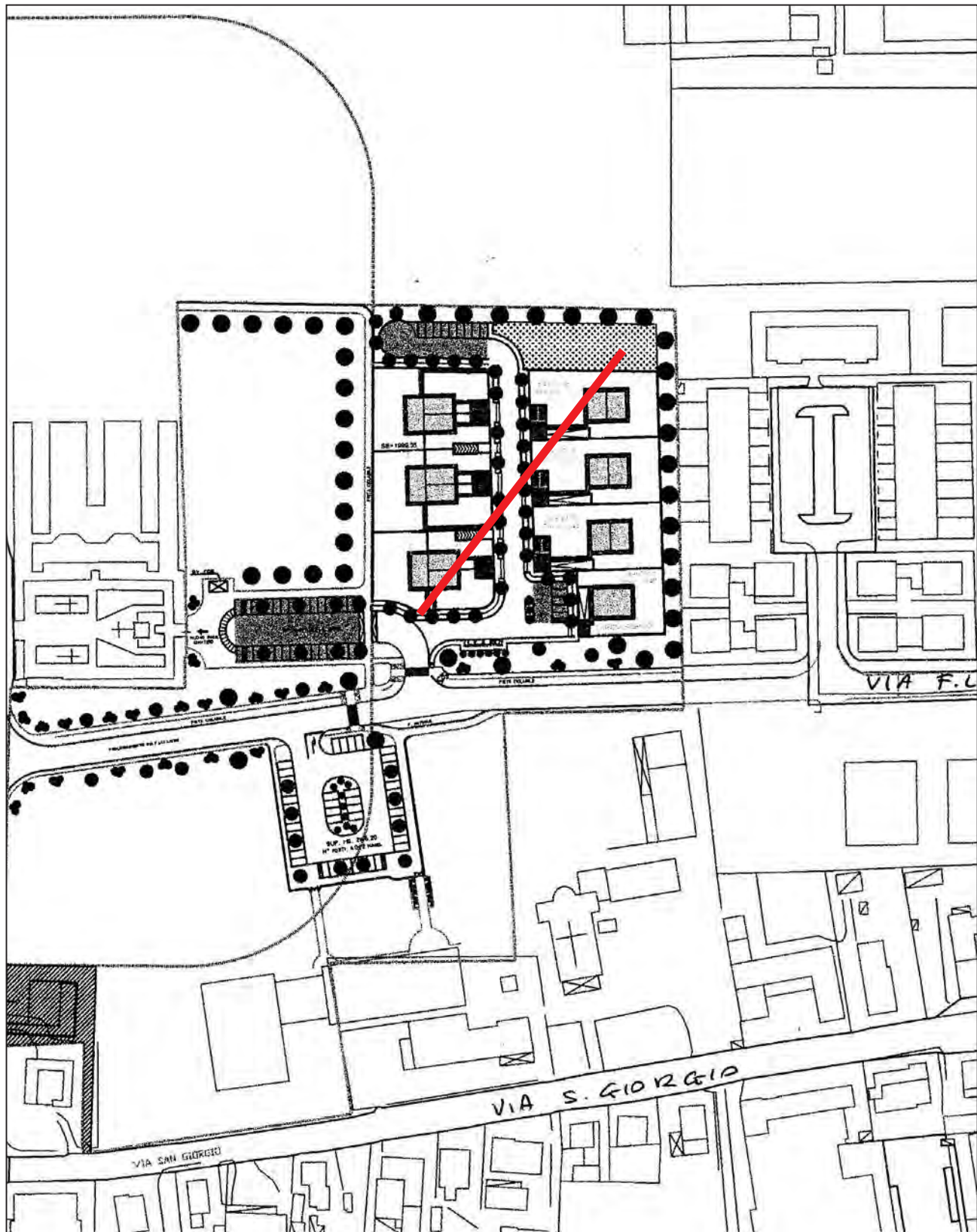
Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione dell'area sita in località San Giorgio di Cesena (FC), in via della Cerca. P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## **ALLEGATI**

- Tav. 1 – Ubicazione profilo (n° 1)
  
- Rapporto stendimento sismico (n° 11)





  
 Profilo sismico effettuato  
 con tecnica MASW



TAV. 1  
 Ubicazione indagine  
 geofisica

Agosto 2010

Committente:  
 Istituto Diocesano per il  
 sostentamento del clero  
 Diocesi Cesena-Sarsina e altri

Planimetria  
 generale



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

# Rapporto indagine geofisica eseguita mediante tecnica masw attiva e passiva (ReMi)

**Autore: I.G.B. SNC**

**Committente: ISTITUTO DIOCESANO PER IL SOSTENTAMENTO  
DEL CLERO – DIOCESI CESENA-SARSINA E ALTRI**

**Sito: SAN GIORGIO DI CESENA (FC) – VIA DELLA CERCA  
P.U.A. AT3-AT5 10/02**

**Data di effettuazione: 24/08/2010**

Software utilizzato nell'elaborazione: "MASW"©  
by Ing. Vitantonio Roma. All rights reserved.

**IGB Snc via della Tecnica 57/A4 - 40068 San Lazzaro di Savena (BO)  
Tel 051 6255377 - Fax 051 4998378 - Cell 349 7846581 - E-mail [igsnc@gmail.com](mailto:igsnc@gmail.com)**



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 1 – Dati Sperimentali (Tecnica attiva)

Numero di ricevitori.....24  
Numero di campioni temporali .....4096  
Passo temporale di acquisizione ..... 0.25ms  
Numero di ricevitori usati per l'analisi ..... 15  
L'intervallo considerato per l'analisi comincia a..... 0ms  
L'intervallo considerato per l'analisi termina a ..... 4000ms  
I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)

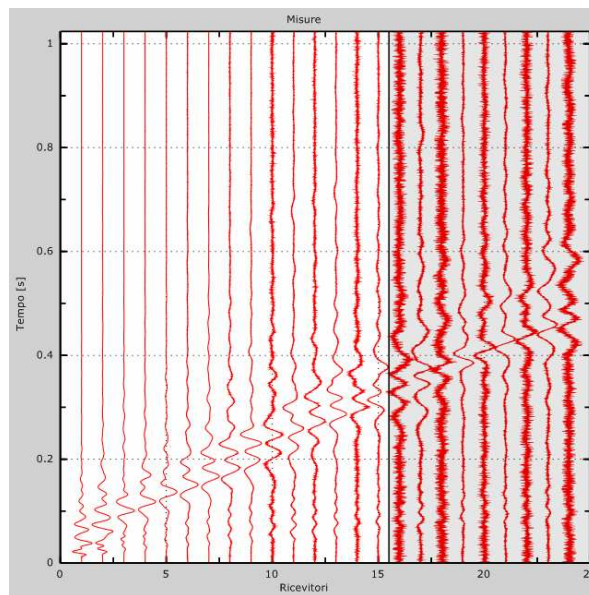


Figura 1: Tracce sperimentali (MASW attiva)



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 2 – Risultati dell'analisi

Frequenza finale ..... 40Hz  
Frequenza iniziale ..... 2Hz

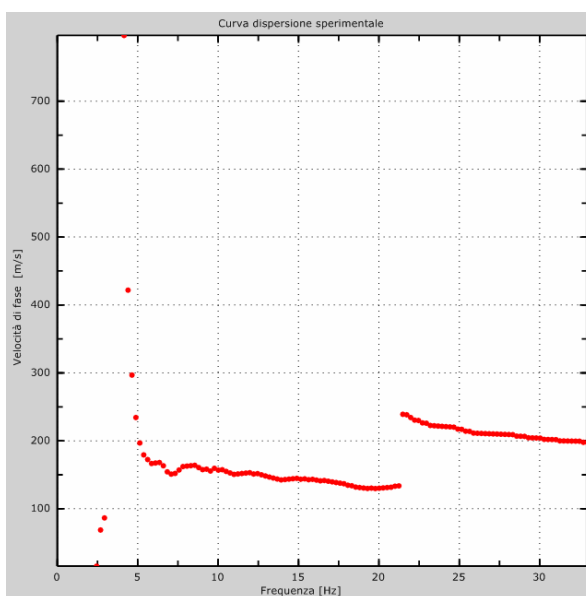


Figura 2: Curva di dispersione apparente sperimentale ottenuta mediante tecnica MASW attiva



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

### 3 - Dati Sperimentali (tecnica passiva)

Numero di ricevitori.....24  
Numero di campioni temporali .....3.26787e-312  
Passo temporale di acquisizione ..... 8ms  
Numero di ricevitori usati per l'analisi .....24  
L'intervallo considerato per l'analisi comincia a..... 10000ms  
L'intervallo considerato per l'analisi termina a ..... 15000ms  
I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)

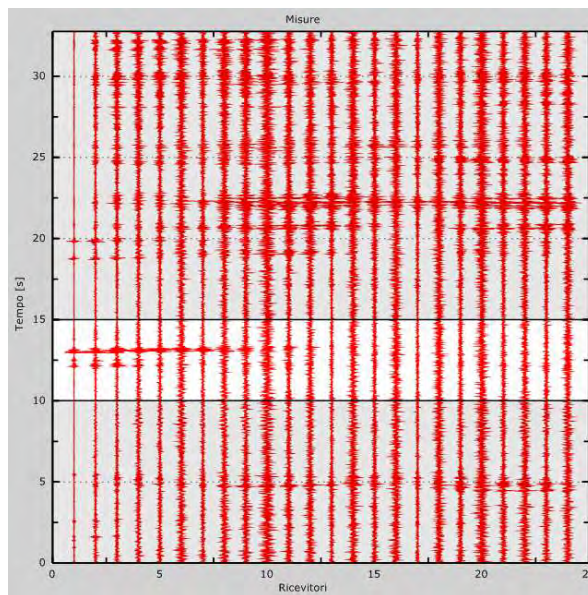


Figura 3: Tracce sperimentali (MASW passiva)





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 4 – Curva di dispersione

Tabella 1: Picking della curva di dispersione sperimentale e relativo range di variazione (valori numerici riportati graficamente in fig. 4)

Freq. [Hz]	V. fase [m/s]	V. fase min [m/s]	V. fase Max [m/s]
3.71115	248.501	213.297	283.705
4.69948	205.11	187.099	223.121
5.52309	176.456	167.45	185.461
6.67614	160.9	155.988	165.813
8.26845	160.082	155.17	164.994
9.91567	155.17	151.076	159.263
11.1236	151.076	148.62	153.532
12.4963	150.257	147.801	152.713
13.7043	142.889	138.796	146.983
15.1319	143.708	140.433	146.983
16.5045	140.433	135.521	145.345
18.3165	133.065	129.79	136.339
20.0735	130.609	126.515	134.702
21.344	133.454	125.927	140.981
23.0385	121.603	111.779	131.427
23.313	223.94	219.847	228.034

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

26.1682	212.478	208.385	216.572
29.4078	204.291	201.835	206.747
32.8669	198.561	196.104	201.017

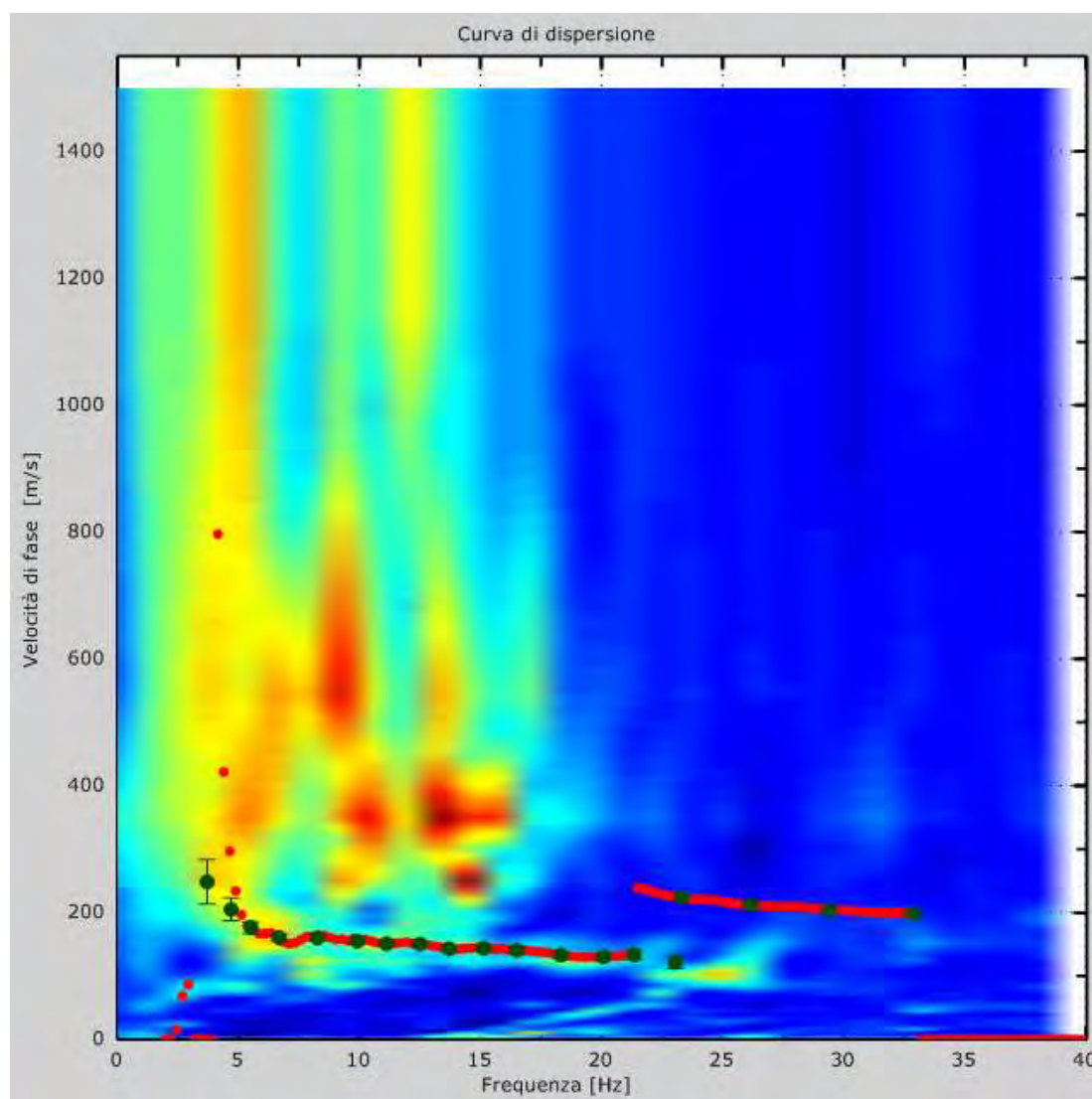


Figura 4: curva di dispersione sperimentale ottenuta mediante tecnica MASW attiva (rappresentazione grafica), spettro (p-f) ottenuto mediante tecnica MASW passiva (ReMi), e relativo picking. A ciascun punto sperimentale in verde è assegnato un range di variazione della velocità di fase riportato nella tabella precedente.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

## 5 - Profilo in sito

Numero di strati (escluso semispazio) .....	7
Spaziatura ricevitori [m] .....	3m
Numero ricevitori .....	24
Numero modi .....	5
<b>Strato 1</b>	
h [m] .....	1.5
z [m] .....	-1.5
Vs fin.[m/s] .....	277.000
<b>Strato 2</b>	
h [m] .....	2.5
z [m] .....	-4
Vs fin.[m/s] .....	133.000
<b>Strato 3</b>	
h [m] .....	4
z [m] .....	-8
Vs fin.[m/s] .....	144.000
<b>Strato 4</b>	
h [m] .....	5
z [m] .....	-13
Vs fin.[m/s] .....	178.000
<b>Strato 5</b>	
h [m] .....	9
z [m] .....	-22
Vs fin.[m/s] .....	196.000
<b>Strato 6</b>	
h [m] .....	13
z [m] .....	-35
Vs fin.[m/s] .....	277.000
<b>Strato 7</b>	
h [m] .....	0
z [m] .....	-∞
Vs fin.[m/s] .....	297.000

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

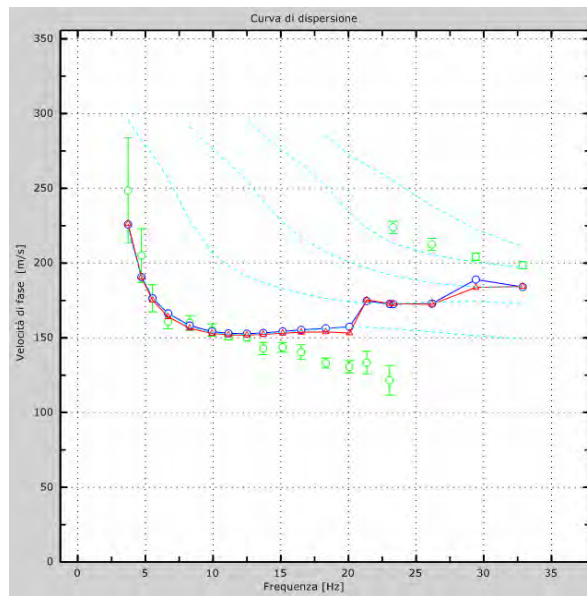


Figura 5: Velocità numeriche – punti sperimentali (Picking - verde), modo fondamentale di Rayleigh (linea azzurra), curva teorica numerica effettiva (linea rossa), curva teorica numerica apparente (linea blu)

Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{S30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

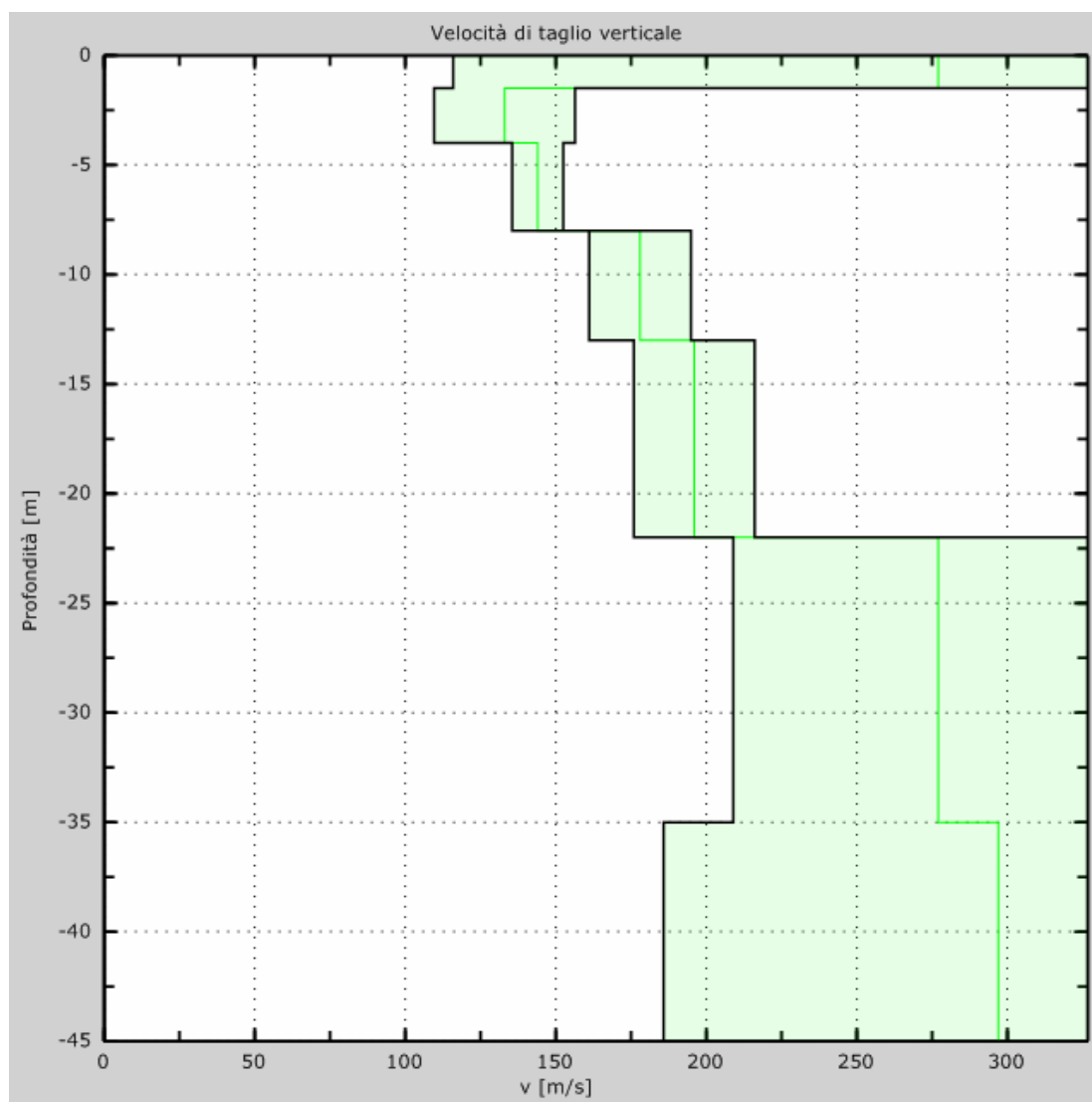


Figura 6: Profilo verticale delle Vs riferito al punto mediano dell'allineamento sismico





Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## 6 – Risultati finali

Piano di riferimento z = piano campagna attuale

$V_{s30}$  [m/s].....193

La normativa applicata è il DM 14 gennaio 2008

**Categoria di suolo determinata unicamente sulla base dei risultati della sola prova masw (media ponderata della velocità equivalente di propagazione delle onde S entro i primi 30 m di profondità dal p.c. su cui è stato eseguito lo stendimento sismico) .....C**

La categoria di suolo così determinata dovrà essere comunque valutata e verificata con i dati e le informazioni di carattere lito-stratigrafico ottenute mediante l'esecuzione di opportune indagini geognostiche.



Indagine geofisica effettuata mediante tecnica MASW attiva e passiva (ReMi) per la determinazione della categoria di suolo di fondazione, sulla base della velocità media equivalente di propagazione delle onde di taglio S entro 30 m di profondità ( $V_{s30}$ ), in località San Giorgio di Cesena (FC) – P.U.A. AT3-AT5 10/02.

---

## Appendice

### Categorie di suolo

**Tipo 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 3 m.

**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  $V_{s,30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero  $NSPT_{30} > 50$  nei terreni a granagrossa e  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo C:** Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o di 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  $15 < NSPT_{30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo D:** Depositati 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  $NSPT_{30} < 15$  nei terreni a grana grossa e  $cu_{30} < 70$  kPa nei terreni a grana fina).

**Tipo E:** Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con  $V_s > 800$  m/s).

**Tipo S1:** Depositati di terreni caratterizzati da valori di  $V_{s,30}$  inferiori a 100 m/s (ovvero  $10 < cu_{,30} < 20$  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.

**Tipo S2:** Depositati di terreno liquefacibile o argille sensitive o altri profili di terreno non inclusi nei tipi A, B, C, D, E o S1. Attenzione: la nuova norma classifica come S2 una serie di siti che prima erano classificati come B, C, D, E.

### Stima della pericolosità sismica del sito in esame

Per definire la pericolosità sismica delle aree in esame, nonostante il comune di Cesena non sia ancora dotato di PSC, ci si è attenuti a quanto disposto nell'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16 comma 1, della L.R. 20/2000 (Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio), in merito a (Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per pianificazione territoriale e urbanistica), si è quindi effettuata una analisi semplificata relativa al secondo livello di approfondimento (punto 4.1)

### Definizione dello spettro di risposta elastico secondo il D.M. 14 gennaio 2008

Nel D.M. 14 gennaio 2008 è previsto uno spettro di risposta elastico dell'accelerazione, per la componente orizzontale del moto, caratterizzato dal seguente andamento:

$$a(g) = a_g S \eta F_0 \left[ \frac{T}{T_b} + \frac{1}{\eta F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_b} \right) \right] \text{ per } 0 \leq T < T_b; \quad a(g) = a_g S \eta F_0 \text{ per } T_b \leq T < T_c$$

$$a(g) = a_g S \eta F_0 \left( \frac{T_c}{T} \right) \text{ per } T_c \leq T < T_d; \quad a(g) = a_g S \eta F_0 \left( \frac{T_c T_d}{T^2} \right) \text{ per } T_d \leq T.$$

La grandezza  $a_g$  esprime l'accelerazione di picco nel bedrock in. Il parametro  $\eta$  è il fattore di

correzione per lo smorzamento viscoso ed è dato da:  $\eta = \left[ \frac{10}{5 + \xi} \right]^{0.5} \geq 0.55$ .

S è una grandezza data dal prodotto:  $S = S_s \cdot S_t$

dove  $S_s$  è il coefficiente di amplificazione stratigrafica e  $S_t$  il coefficiente di amplificazione topografico, ricavabili dalle tabelle che seguono:

Categoria topografica	Caratteristiche della superficie topografica	Ubicazione dell'opera	$S_t$
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ .	-	1,00 (casi in esame)
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ .	Sommità del pendio	1,20
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ .	Cresta del rilievo	1,20
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$ .	Cresta del rilievo	1,40

Categoria sottosuolo	$S_s$
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 F_0 a_g \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 F_0 a_g \leq 1,50$ (casi in esame)
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 F_0 a_g \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 F_0 a_g \leq 1,60$

$F_0$  è l'amplificazione spettrale massima, su bedrock orizzontale e si ricava, da tabella B allegata al D.M.14 gennaio 2008 (allegato B).  $F_0$  nel nostro è pari a **2.493** (via Parataglio) e **2.492** (via Cerca).

$T_c$  è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da  $T_c = C_c T_c^*$ , in cui  $T_c^*$  è un parametro sempre dell'allegato B del D.M. e per i siti in esame sono **0.298 s** (via Parataglio) e **0.299 s** (via Cerca), mentre  $C_c$  deriva dalla categoria del sottosuolo, con la tabella:

Categoria sottosuolo	$C_c$
A	1,00
B	$1,10(T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,05(T_c^*)^{-0,33}$ (valore utilizzato)
D	$1,25(T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,15(T_c^*)^{-0,40}$

Per cui risulta un valore  $T_c = 0.467$  s in entrambe le aree

I parametri  $T_b$  e  $T_d$  sono correlati a  $T_c$  con le seguenti relazioni:  $T_b = \frac{T_c}{3}$ ;  $T_d = 4,0 a_g + 1,6$

Dallo spettro di risposta elastico dell'accelerazione si ricava lo spettro di risposta dello spostamento, applicando, per ogni periodo  $T$ , la relazione:  $u = a(g)g \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2$  dove  $g$  è l'accelerazione di gravità ( $981 \text{ cm/s}^2$ ). Lo spettro di risposta elastico verticale si ottiene con le stesse relazioni viste per quello orizzontale, sostituendo il parametro  $F_0$  con la grandezza  $F_v$ , data da:  $F_v = 1,35 F_0 a_g^{0,5}$ . I parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  sono ricavati dall'allegato B del D.M. in funzione del tempo di ritorno ( $T_r$ ) preso in considerazione. Il parametro  $T_r$  viene ricavato dalla seguente relazione:  $Tr(\text{anni}) = -\frac{V_r}{\ln(1 - P_r)}$ ; in cui  $V_r$  è la vita di riferimento dell'opera e



$P_{Vr}$  la probabilità di superamento legata allo stato limite di calcolo. La vita di riferimento ( $V_r$ ) dell'opera è data da:  $V_r (\text{anni}) = C_u V_n$ , dove  $V_n$  è la vita nominale dell'opera e  $C_u$  un fattore moltiplicativo funzione della classe d'uso della struttura in progetto.

Tabella I

TIPI DI COSTRUZIONE	Vita Nominale $V_N$ (in anni)
Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva	=10
Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza	$\geq 50$
Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	$\geq 100$

Tabella II

<i>Classe I:</i> Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
<i>Classe II:</i> Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso <i>III</i> o in Classe d'uso <i>IV</i> , ferrovie la cui interruzione non porti a situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.
<i>Classe III:</i> Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso <i>IV</i> . Ponti e ferrovie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.
<i>Classe IV:</i> Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n.6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Tabella III

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_u$	0,7	1,0	1,5	2,0

Il parametro  $P_{Vr}$  è invece funzione dello stato limite considerato, secondo la tabella:

Stati Limite	$P_{Vr}$
Stato Limite di Operatività (SLO):	0,81
Stato Limite di Danno (SLD):	0,63
Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):	0,10
Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):	0,05



### *Spettri di risposta elastici per lo stato limite ultimo SLV*

Di seguito si riportano parametri e spettri di risposta elastica e tabelle con parametri sismici relativi alle due aree in esame, ottenuti dal sito “Spettri NTC ver.1.0.2.” del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sito “Spettri NTC ver.1.0.2.”

L’accelerazione sismica massima prevista nei due siti in esame  $a_{\max} = a_g S$  (espressa in  $m/s^2$ ), per lo stato limite ultimo considerato (SLV – stato limite di salvaguardia della vita), con accelerazione di picco per suoli di tipo A, risulta  $a_{\max} = 2.59 m/s^2$  nell’area di via Parataglio e  $a_{\max} = 2.60 m/s^2$  nell’area di via Cerca.

### *ALLEGATI*

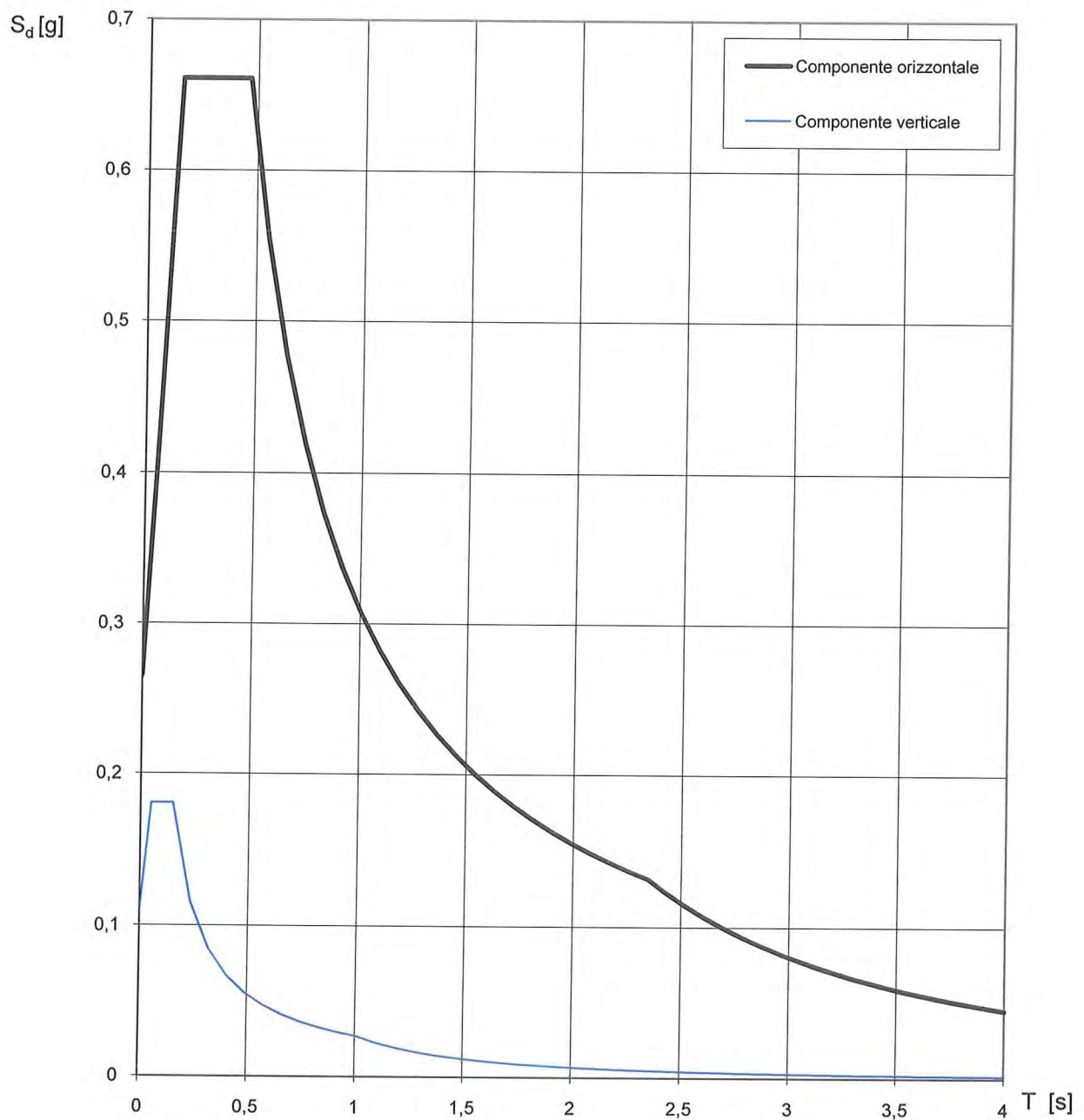
Spettri di risposta (componente orizzontale e verticale) per lo stato limite SLV

Tabulati con parametri dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite SLV

Tabulato con parametri dello spettro di risposta verticale per lo stato limite SLV

### *N.B.*

I primi spettri e tabulati sono riferiti all’area di via Parataglio

**Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV**

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

**Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLV**

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0,187 g
$F_o$	2,492
$T_c^*$	0,299 s
$S_S$	1,421
$C_C$	1,565
$S_T$	1,000
$q$	1,000

**Parametri dipendenti**

$S$	1,421
$\eta$	1,000
$T_B$	0,156 s
$T_C$	0,467 s
$T_D$	2,347 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(S + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

**Punti dello spettro di risposta**

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,265
$T_B \leftarrow$	0,156	0,661
$T_C \leftarrow$	0,467	0,661
	0,557	0,555
	0,646	0,478
	0,736	0,420
	0,825	0,374
	0,915	0,338
	1,004	0,308
	1,094	0,282
	1,183	0,261
	1,273	0,243
	1,362	0,227
	1,452	0,213
	1,541	0,200
	1,631	0,189
	1,720	0,180
	1,810	0,171
	1,899	0,163
	1,989	0,155
	2,078	0,149
	2,168	0,142
	2,257	0,137
$T_D \leftarrow$	2,347	0,132
	2,425	0,123
	2,504	0,116
	2,583	0,109
	2,662	0,102
	2,740	0,097
	2,819	0,091
	2,898	0,086
	2,977	0,082
	3,055	0,078
	3,134	0,074
	3,213	0,070
	3,291	0,067
	3,370	0,064
	3,449	0,061
	3,528	0,058
	3,606	0,056
	3,685	0,053
	3,764	0,051
	3,843	0,049
	3,921	0,047
	4,000	0,045

La verifica dell' idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dell



**Parametri e punti dello spettro di risposta verticale per lo stato limite: SLV**

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_{qv}$	0,109 g
$S_S$	1,000
$S_T$	1,000
$q$	1,500
$T_B$	0,050 s
$T_C$	0,150 s
$T_D$	1,000 s

**Parametri dipendenti**

$F_v$	1,454
$S$	1,000
$\eta$	0,667

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_0 \cdot \left(\frac{a_g}{g}\right)^{0,5} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

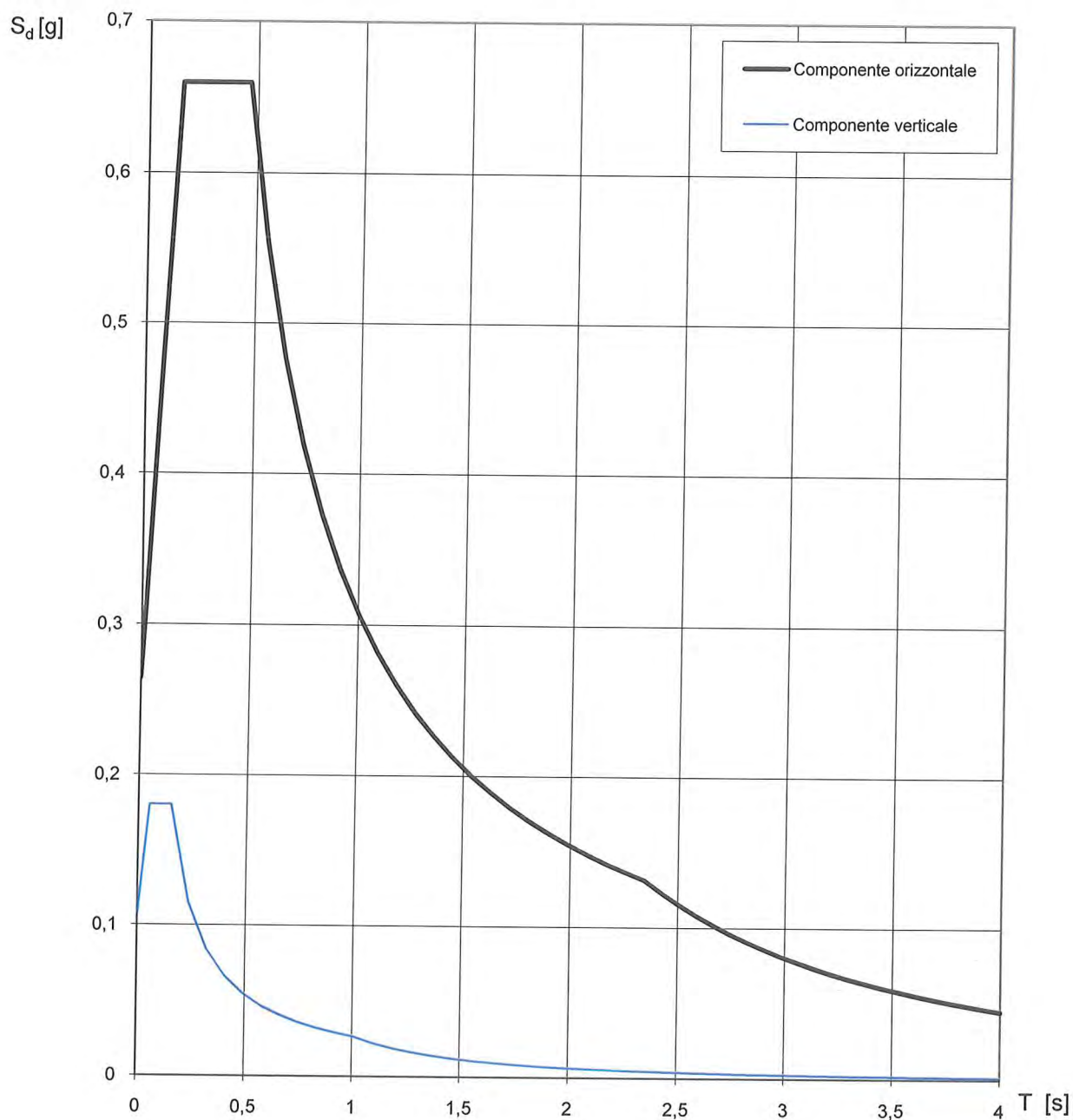
$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

**Punti dello spettro di risposta**

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,109
$T_B \leftarrow$	0,050	0,181
$T_C \leftarrow$	0,150	0,181
	0,235	0,115
	0,320	0,085
	0,405	0,067
	0,490	0,055
	0,575	0,047
	0,660	0,041
	0,745	0,036
	0,830	0,033
	0,915	0,030
$T_D \leftarrow$	1,000	0,027
	1,094	0,023
	1,188	0,019
	1,281	0,017
	1,375	0,014
	1,469	0,013
	1,563	0,011
	1,656	0,010
	1,750	0,009
	1,844	0,008
	1,938	0,007
	2,031	0,007
	2,125	0,006
	2,219	0,006
	2,313	0,005
	2,406	0,005
	2,500	0,004
	2,594	0,004
	2,688	0,004
	2,781	0,004
	2,875	0,003
	2,969	0,003
	3,063	0,003
	3,156	0,003
	3,250	0,003
	3,344	0,002
	3,438	0,002
	3,531	0,002
	3,625	0,002
	3,719	0,002
	3,813	0,002
	3,906	0,002
	4,000	0,002

La verifica dell' idoneità del programma, l' utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell' utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall' utilizzo dello stesso.

**Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV**

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.



**Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLV****Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0,186 g
$F_o$	2,493
$T_c^*$	0,298 s
$S_s$	1,422
$C_c$	1,565
$S_T$	1,000
$q$	1,000

**Parametri dipendenti**

$S$	1,422
$\eta$	1,000
$T_B$	0,156 s
$T_C$	0,467 s
$T_D$	2,345 s

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_s \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5+\xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_c \cdot T_c^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto  $S_d(T)$  per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico  $S_e(T)$  sostituendo  $\eta$  con  $1/q$ , dove  $q$  è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

**Punti dello spettro di risposta**

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,265
$T_B \leftarrow$	0,156	0,660
$T_C \leftarrow$	0,467	0,660
	0,556	0,554
	0,646	0,477
	0,735	0,419
	0,825	0,374
	0,914	0,337
	1,004	0,307
	1,093	0,282
	1,182	0,261
	1,272	0,242
	1,361	0,226
	1,451	0,212
	1,540	0,200
	1,629	0,189
	1,719	0,179
	1,808	0,170
	1,898	0,162
	1,987	0,155
	2,076	0,148
	2,166	0,142
	2,255	0,137
$T_D \leftarrow$	2,345	0,131
	2,424	0,123
	2,502	0,115
	2,581	0,108
	2,660	0,102
	2,739	0,096
	2,818	0,091
	2,896	0,086
	2,975	0,082
	3,054	0,077
	3,133	0,074
	3,212	0,070
	3,291	0,067
	3,369	0,064
	3,448	0,061
	3,527	0,058
	3,606	0,056
	3,685	0,053
	3,764	0,051
	3,842	0,049
	3,921	0,047
	4,000	0,045

La verifica dell' idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dell

**Parametri e punti dello spettro di risposta verticale per lo stato limite: SLV**

**Parametri indipendenti**

STATO LIMITE	SLV
$a_{qv}$	0,108 g
$S_S$	1,000
$S_T$	1,000
$q$	1,500
$T_B$	0,050 s
$T_C$	0,150 s
$T_D$	1,000 s

**Parametri dipendenti**

$F_v$	1,452
$S$	1,000
$\eta$	0,667

**Espressioni dei parametri dipendenti**

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 §. 3.2.3.5})$$

$$F_v = 1,35 \cdot F_o \cdot \left( \frac{a_g}{g} \right)^{0,5} \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.11})$$

**Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.10)**

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_v \cdot \left( \frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

**Punti dello spettro di risposta**

	T [s]	Se [g]
	0,000	0,108
$T_B \leftarrow$	0,050	0,180
$T_C \leftarrow$	0,150	0,180
	0,235	0,115
	0,320	0,084
	0,405	0,067
	0,490	0,055
	0,575	0,047
	0,660	0,041
	0,745	0,036
	0,830	0,033
	0,915	0,030
$T_D \leftarrow$	1,000	0,027
	1,094	0,023
	1,188	0,019
	1,281	0,016
	1,375	0,014
	1,469	0,013
	1,563	0,011
	1,656	0,010
	1,750	0,009
	1,844	0,008
	1,938	0,007
	2,031	0,007
	2,125	0,006
	2,219	0,005
	2,313	0,005
	2,406	0,005
	2,500	0,004
	2,594	0,004
	2,688	0,004
	2,781	0,003
	2,875	0,003
	2,969	0,003
	3,063	0,003
	3,156	0,003
	3,250	0,003
	3,344	0,002
	3,438	0,002
	3,531	0,002
	3,625	0,002
	3,719	0,002
	3,813	0,002
	3,906	0,002
	4,000	0,002

La verifica dell' idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

### Fattori di amplificazione sismica (punto 4.1.1.)

Per quanto attiene ai fattori di amplificazione sismica F.A. , utilizzando le tabelle regionali al punto (A2.1.2 – pianura padana e costa adriatica), in base ai valori di  $V_{S30}$  ottenuti dalle due prove MASW, per una zona di *pianura 2* di cui fanno parte le due aree in esame, si ottengono i seguenti valori di amplificazione:

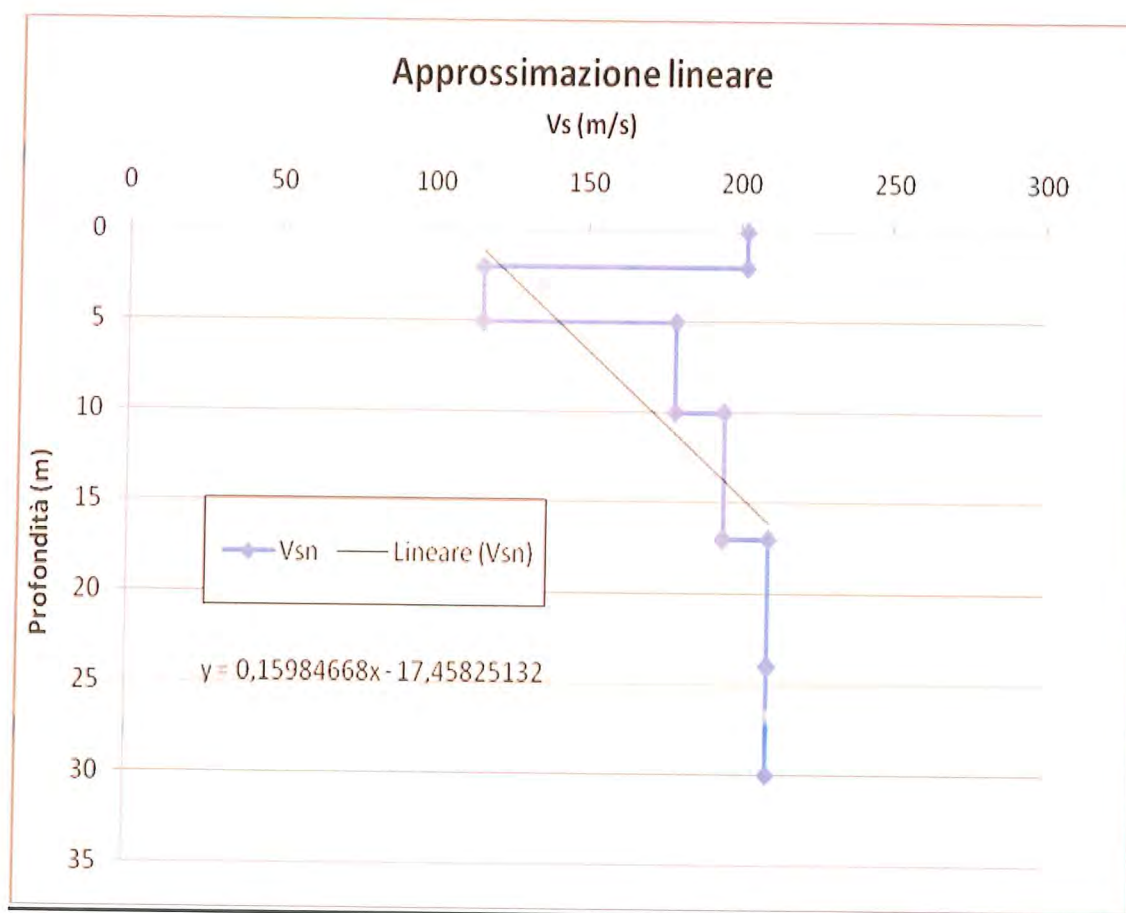
$$F.A. (P.G.A.) = 1.5$$

$$F.A. \text{ Intensità Spettrale} - 0.1s < T_0 < 0.5s = 1.8$$

$$F.A. \text{ Intensità spettrale} - 0.5s < T_0 < 1.0s = 2.5$$

### Definizione della profondità del bedrock sismico (punto 4.1.2)

Per definire la profondità del bedrock sismico si è estrapolato il profilo  $V_s$  fino ai valori di 800 m/s, utilizzando una retta di regressione e ottenendo una profondità di **m-122** dal p.c. attuale (vedere grafico sottoriportato):





## VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE IN CASO DI SISMA

### Introduzione

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi.

Se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:  $\tau = c + (\sigma_{v0} - u) \tan \varphi$

$c$  = coesione del terreno

$\sigma_{v0}$  = pressione litostatica totale agente alla profondità d'indagine

$u$  = pressione interstiziale dell'acqua

$\varphi$  = angolo di resistenza al taglio del terreno,

È evidente che la grandezza  $\langle \tau \rangle$  si può annullare solo nel caso in cui siano

verificate le condizioni: a)  $c = 0$ ; b)  $(\sigma_{v0} - u) = 0$ ;

(il caso  $\varphi = 0$  non ha importanza pratica, perché può verificarsi solo in terreni coesivi in condizioni non drenate, dove però la condizione  $\langle c=0 \rangle$  non può ovviamente verificarsi).

La condizione a) vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreni coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica.

La condizione b) si verifica, quando la pressione interstiziale uguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità dalla colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie ( $\sigma_{v0} = u$ ). In definitiva il fenomeno della liquefazione si può manifestare preferibilmente in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda, in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua.

### Fattori che predispongono alla liquefazione

Di seguito si descrivono, nel dettaglio, i fattori principali che predispongono un terreno alla liquefazione, prima di passare ad illustrare i metodi di calcolo della suscettibilità.

1) Fattori geologici-geotecnici. Poiché ai terreni incoerenti sono associati generalmente valori del coefficiente di permeabilità relativamente elevati, l'applicazione di sovraccarichi graduali (per es. dovuti alla costruzione di un fabbricato) non conduce a significativi incrementi di  $\langle u \rangle$ . In questi casi infatti non si generano gradienti di pressione fra la zona sollecitata e quella indisturbata tali da produrre rapidi flussi idrici fra le due zone. I vuoti dello scheletro solido sono quasi sempre sufficientemente larghi da non ostacolare questo flusso. Nel caso viceversa di sollecitazioni intense sottoposte ad incrementi rapidi, come si verifica durante un evento sismico, i gradienti di pressione che si generano possono essere tali da produrre elevati flussi

idrici dall'interno verso l'esterno. Se il fenomeno si manifesta in depositi incoerenti a granulometria relativamente fine (per es. sabbie fini), la larghezza limitata dei vuoti dello scheletro tenderà ad ostacolare il flusso idrico, con il conseguente sviluppo di elevate pressioni neutre. Oltre alla granulometria, altri fattori condizionano la suscettibilità di un deposito sciolto al fenomeno della liquefazione. I principali sono la profondità del livello potenzialmente liquefacibile ed il suo grado di addensamento. Con l'aumentare della profondità del deposito diminuisce la probabilità di liquefazione dello stesso durante l'evento sismico. È evidente infatti che con l'aumentare della profondità siano richiesti valori di  $\langle u \rangle$  sempre più elevati per annullare la pressione litostatica crescente. Inoltre con la profondità tende a diminuire anche l'intensità delle sollecitazioni indotte dal sisma. L'influenza della pressione litostatica permette di spiegare il fenomeno della migrazione della liquefazione dai depositi più superficiali a quelli più profondi. I livelli meno profondi sono quelli che per primi subiscono la liquefazione, che è facilitata dalla minore pressione litostatica. Gli strati più profondi, che inizialmente non subiscono il fenomeno, nel momento in cui il deposito superiore va in liquefazione risentono di un calo del peso della colonna di terreno sovrastante, evento che aumenta la probabilità che anch'essi subiscano la liquefazione. Fondamentale è anche il grado di addensamento del terreno, esprimibile attraverso il parametro densità relativa ( $D_r\%$ ). I terreni molto addensati, se sollecitati, subiscono un aumento di volume (fenomeno di dilatanza) con conseguente diminuzione della  $D_r\%$ , che tende a portarsi verso un valore critico, variante in funzione principalmente della granulometria del deposito. L'aumento di volume ha come conseguenza, nei depositi saturi, un richiamo dell'acqua dall'esterno verso l'interno, con creazione di una  $u$  di segno negativo e si ha un aumento del termine ( $\sigma_{v0} - u$ ). L'esatto contrario avviene in terreni poco addensati, dove una sollecitazione tende a produrre una diminuzione di volume, con conseguente flusso idrico verso l'esterno e la generazione di una  $\langle u \rangle$  disegno positivo (diminuisce il valore di ( $\sigma_{v0} - u$ )).

In conclusione si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti che presentano le seguenti caratteristiche:

- granulometricamente sono sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile generalmente dallo 0 al 25%;
- si trovano sotto falda;
- sono da poco a mediamente addensati.
- si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori ai 15 metri)

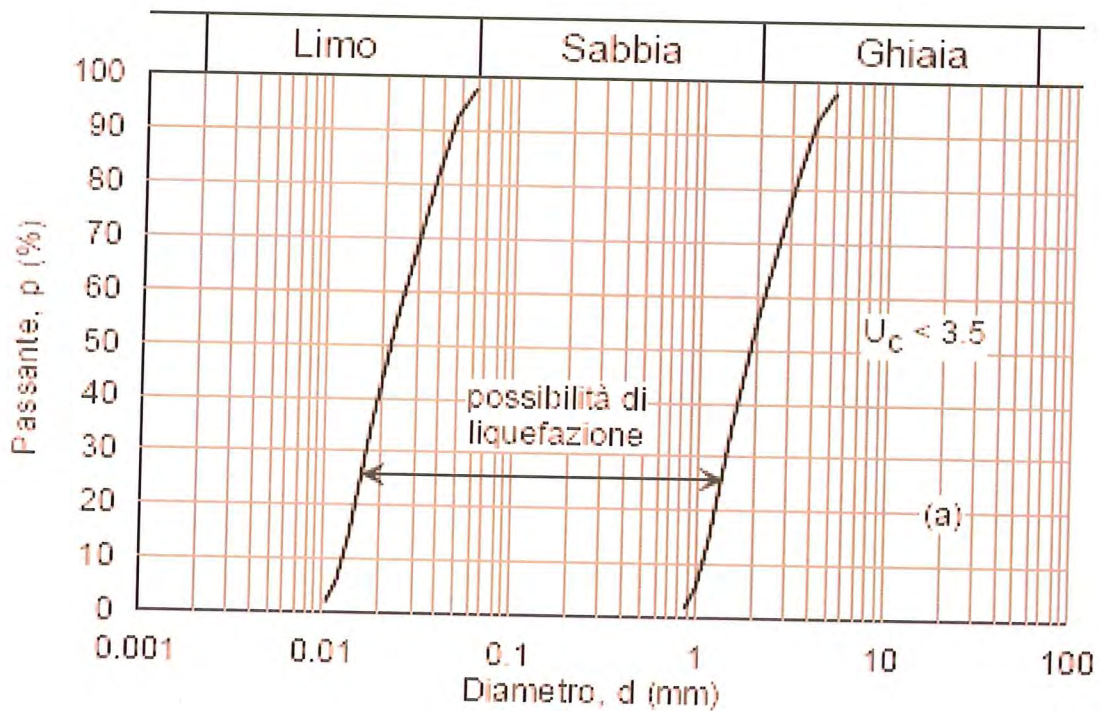


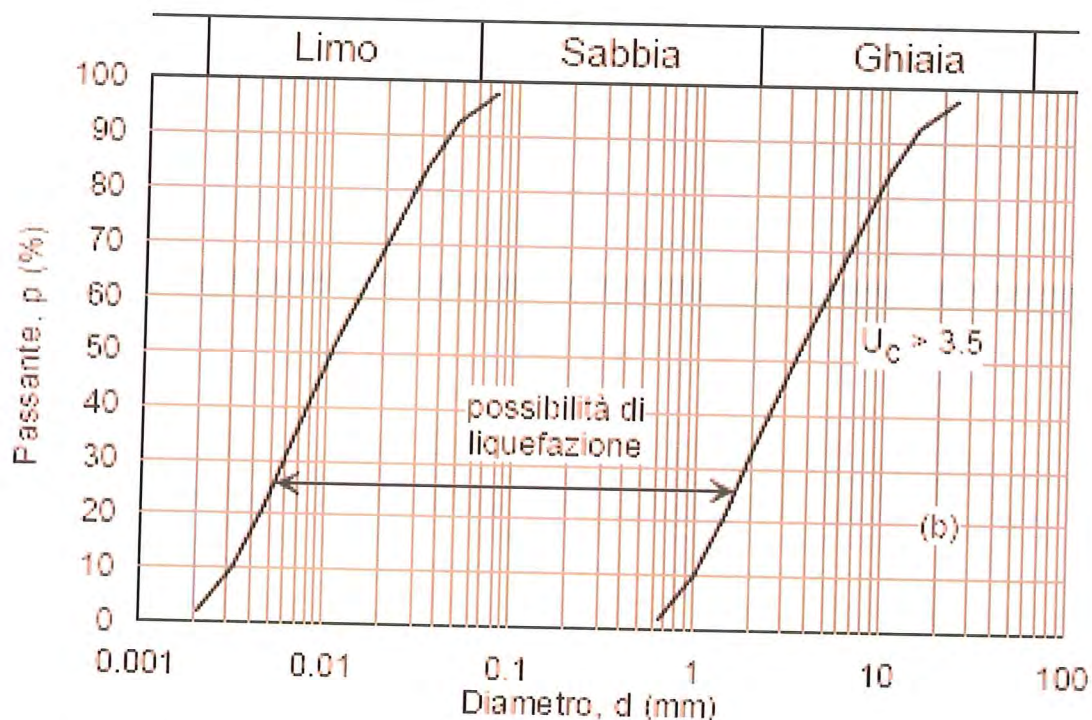
In sostanza le attuali normative (DM14/01/08) indicano che il fenomeno della liquefazione non è da prevedersi se si verifica almeno una delle seguenti condizioni :

- 1) Eventi sismici attesi di magnitudo inferiore a 5
- 2) Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field (campo libero) inferiore a 0.10 g. Accelerazione massima minore di 0.15 g e terreni con:
  - I) Frazione di fine (FC) superiore al 20%, con indice di plasticità  $P_I > 10$
  - II)  $FC > 35\%$  e resistenza  $(N_1)_{60} > 20$ .
  - III)  $FC < 5\%$  e resistenza  $(N_1)_{60} > 25$ .
- 4) Profondità media della falda idrica inferiore a 15 metri dal p.c.
- 5) Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate dai fusi di liquefazione indicati nei grafici riportati nella pagina successiva (il primo grafico è relativo a terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  e il secondo relativo ai terreni con  $U_c > 3.5$ ), dove  $U = D_{60}/D_{10}$

$D_{60}$  = diametro delle particelle corrispondenti ad un passante pari al 60%

$D_{10}$  = diametro delle particelle corrispondenti ad un passante pari al 10%





### Verifica del rischio di liquefazione dei terreni nell'area in esame.

Per la verifica si sono utilizzati metodi cosiddetti semplificati che richiedono venga definito un sisma di progetto, attraverso l'introduzione dell'accelerazione sismica orizzontale massima in superficie e della magnitudo di riferimento.

I dati del sisma di progetto sono quelli riportati nelle pagine precedenti ( $a_{\max} = 2.580 \text{ m/s}^2$ ) (possono essere ricavati attraverso l'analisi probabilistica dei dati del Catalogo Sismico

Mentre la magnitudo di riferimento è stata stimata dall'accelerazione al bedrock nel sito con la relazione consigliata dal G.N.D.T.:

$$M = \frac{\text{Log}_{10} a_{g\text{bedrock}} + 2,544}{0,363} \text{ da cui risulta, nel sito, una magnitudo di riferimento } M = 7.72$$

Tutti i metodi semplificati permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso un coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilabile nello strato (R) e lo sforzo tagliante indotto dal sisma (T). Cioè in pratica si avrà:

$$F_s = \frac{R}{T}. \text{ Un deposito dovrà essere considerato suscettibile di liquefazione, se il coefficiente di}$$

sicurezza sarà minore di 1. La grandezza T dipende dai parametri del sisma di progetto (accelerazione sismica e magnitudo di progetto). R è funzione delle caratteristiche meccaniche dello strato, principalmente del suo stato di addensamento ed è pertanto stata ricavata attraverso correlazioni con i risultati della prova penetrometrica statica realizzata.

La grandezza T si ottiene dalla relazione:

$$T = 0.65 \frac{a_{\max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} r_d \frac{1}{MSF}; \text{ dove:}$$

$a_{\max}$  = accelerazione sismica massima;

$g$  = accelerazione di gravità = 980.7 cm/s<sup>2</sup>;

$\sigma_{v0}$  = pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.;

$\sigma_{v0}'$  = pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.;

$MSF$  = coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma,

ricavabile con la relazione  $MSF = \left(\frac{M}{7.5}\right)^{-3.3}$  se  $M \leq 7.5$  o con la

formula  $MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$  se  $M > 7.5$

#### Valutazione delle resistenza al taglio mobilitata $R$

Per la penetrometria statica (CPT) la resistenza al taglio mobilitata si ottiene utilizzando il metodo di Robertson & Wride. La procedura di calcolo si basa sulle due seguenti equazioni:

$$R = 0.883 \left[ \frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right] + 0.05 \text{ per } (q_{c1n})_{cs} < 50; \quad R = 93 \left[ \frac{(q_{c1n})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 \text{ per } 50 \leq (q_{c1n})_{cs} < 160.$$

La grandezza  $(q_{c1n})_{cs}$  rappresenta la resistenza alla punta normalizzata e corretta per tenere conto della percentuale di fine presente. Il calcolo di  $(q_{c1n})_{cs}$  avviene attraverso i seguenti passaggi. Si calcola la resistenza alla punta e l'attrito laterale normalizzati con le relazioni:

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \text{ e } F = 100 \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}}, \text{ dove:}$$

$q_c$  (kg/cm<sup>2</sup>) = resistenza alla punta misurata;

$f_s$  (kg/cm<sup>2</sup>) = attrito laterale specifico misurato;

$\sigma_{v0}$  (kg/cm<sup>2</sup>) = pressione verticale totale;

$\sigma_{v0}'$  (kg/cm<sup>2</sup>) = pressione verticale efficace.

Si calcola l'indice di tipo dello strato sabbioso con la formula:

$$I_c = \sqrt{(\log_{10} F + 1.22)^2 + (\log_{10} Q - 3.47)^2}$$

Si applica una correzione che tenga conto dell'approfondimento della prova:

$$q_{c1n} = C_Q q_c \text{ dove } C_Q = \left( \frac{1}{\sigma_{v0}'} \right)^n; \text{ L'esponente } n \text{ viene valutato come segue:}$$



se  $I_c > 2.6$  allora  $n=1$ ; se  $I_c \leq 2.6$  si calcola un primo valore di  $q_{c1n}$ , utilizzando  $n=0.5$ ; quindi si

ricalcola  $I_c$  con la relazione:  $I_c = \sqrt{(\text{Log}_{10} F + 1.22)^2 + (\text{Log}_{10} q_{c1n} - 3.47)^2}$

se il nuovo valore di  $I_c$  è ancora minore di 2.6 si conferma il valore  $n=0.5$ , altrimenti si ricalcola  $q_{c1n}$ , utilizzando  $n=0.75$ ; se  $q_{c1n} > 2q_c$  si pone  $q_{c1n} = 2q_c$ .

Si introduce la correzione dovuta alla presenza di fine nel livello sabbioso:

$(q_{c1n})_{cs} = K_c q_{c1n}$ , dove  $K_c$  è uguale a 1, se  $I_c \leq 1.64$ , ed è fornito dalla relazione:

$$K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$$

Viene considerato non liquefacibile un deposito in cui risulti  $FS > 1.25$

### Verifica alla liquefazione dei terreni in esame

Come evidenziato nelle tabelle “Liquefazione” allegate ai parametri geotecnici, in cui sono riportati i valori  $F_L$  degli strati incoerenti, ottenuti con un programma di calcolo automatico basato sul metodo di Robertson & Wride, l’unico livello incoerente presente nelle due aree in esame è stato rilevato nella prova CPT n°4 a profondità compresa fra m-10.20 e m-11.60 e presenta un valore  $F_L = 2.841$  quindi nettamente superiore al valore al disotto del quale è ipotizzabile la liquefazione dei terreni di fondazione in caso di sisma ( $F_L \leq 1.25$ ).

### VALUTAZIONE CAPACITA' PORTANTE DEI TERRENI DI FONDAZIONE

Si è proceduto a valutare la portanza dei terreni di fondazione in base a quanto disposto dal testo unico DM 14/01/2008 e cioè sulla base della verifica agli stati limite.

### Verifica agli stati limite ultimi (SLU)

Per ogni stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione  $E_d < R_d$ , dove  $E_d$  è il valore di progetto dell’azione e  $R_d$  è il valore di progetto della resistenza. La verifica di questa condizione deve essere fatta impiegando combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni ( $A_1$  e  $A_2$ ), per i parametri geotecnici ( $M_1$  e  $M_2$ ) e per le resistenze ( $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ). I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell’ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi.

Nel primo approccio progettuale (Approccio n.1) sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti, la prima più severa nei confronti del dimensionamento strutturale, la seconda più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico.

Nel secondo approccio progettuale (Approccio n.2) è prevista una unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche. Nella presente valutazione relativa al dimensionamento delle fondazioni è stata scelta la seconda combinazione dell'approccio n.1, cioè quella più severa nei confronti del dimensionamento geotecnico: Combinazione 2 ( $A_2+M_2+R_2$ ).

Per la scelta dei coefficienti parziali si sono utilizzate le tabelle presenti nel DM08 e si sono considerati terreni pianeggianti in condizioni non drenate (verifica a breve termine) e fondazioni continue con piano di posa orizzontale e carichi permanenti assiali.

I coefficienti parziali risultano:

Coefficiente parziale per l'azione o per l'effetto delle azioni

Carichi	Effetto	Coefficiente parziale	$A_2(\text{GEO})$
permanenti	favorevole	$\gamma_{g1}$	1.0

Coefficiente parziale per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza utilizzata	Coefficiente parziale	$M_2$
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.4

Coefficienti parziali per capacità portante

Verifica	Coefficiente parziale	$R_2$
Capacità portante	$\gamma_R$	1.8

**Valutazione capacità portante in base ai dati penetrometrici**

Per quanto riguarda le fondazioni da realizzare, si è ipotizzato un piano di posa a m-3.00 dal piano di campagna attuale (fabbricati con scantinato). Si sono ipotizzate platee di fondazione costituite da piastre rigide con lati di base da m 5.00 x m 5.00 (B x L) e per il calcolo delle pressioni di progetto ( $q_d$ ) si è operato con un approccio di tipo semiprobabilistico sulla base degli *stati limite ultimi (SLU)*, utilizzando la formula di Brinch-Hansen per terreni coesivi (la zona del cono di influenza delle fondazioni si trova in terreni argillosi e argillosi-limosi), considerando i fattori di forma e di profondità delle fondazioni ( $s_c$  e  $d_c$ ) per un piano di posa orizzontale, terreno orizzontale e carichi verticali centrati:  $q_d = [c_{up}N_c(1+s_c'+d_c') + qN_q]/\gamma_R$  dove:

$c_{ud}$  = coesione non drenata di progetto

$N_c$  = coefficiente di coesione che per  $\phi$  uguale a zero gradi vale 5.14

$N_q$  = coefficiente di portata che per  $\phi$  uguale a zero gradi vale 1.00



$q = \gamma D$  - pressione litostatica totale a livello del piano di posa delle fondazione a m-3.00 e falda idrica a m-1.00 è pari a **0.36 kg/cm<sup>2</sup>**, (D = incastro)

$s_c' = 0.2(B/L)$  - fattore di forma della fondazione (B = larghezza, L = lunghezza fondazione)

$d_c' = 0.4k$  con  $k = D/B$  per  $(D/B) \leq 1$  fattore di profondità

Nel calcolo si sono utilizzati i parametri geotecnici elaborati dai valori di  $q_c$  e  $f_s$  relativi alle penetrometrie meno favorevoli. La coesione non drenata di progetto ( $c_{ud}$ ) è data da  $c_{uk}/\gamma_{cu}$  con  $\gamma_{cu} = 1.4$  e  $c_{uk}$ , valore caratteristico della coesione, al quale è associata una probabilità di non superamento del 5%, è dato  $c_{uk} = c_{um}(1+\chi V_{cu})$  dove:

$c_{um}$  = valore medio della coesione non drenata per lo strato influenzato dalle tensioni generate dalle fondazioni, con spessore  $H = 0.5B \tan(45^\circ + \phi/2)$  (Meyerhof 1953)

$\chi$  = parametro dipendente dalla legge di distribuzione della probabilità di non superamento che nel nostro caso risulta pari a  $\chi = -1.645$

$V_{cu}$  = coefficiente di variazione di  $c_u$ , definito come il rapporto fra lo scarto quadratico medio e la media dei valori di ( $c_{um}$ )

#### **Carico di progetto (area di via Parataglio)**

La valutazione è stata fatta relativamente ai terreni rilevati nella penetrometria n°1, cioè quella meno favorevole, per lo strato che si trova compreso fra m-3.00 e m-5.50 di profondità, strato con coesione non drenata media  $c_{um} = 0.87 \text{ kg/cm}^2$  da cui deriva una coesione caratteristica  $c_{uk} = 0.62 \text{ kg/cm}^2$  e una coesione non drenata di progetto  $c_{ud} = 0.44 \text{ kg/cm}^2$ , da cui si ottiene un carico di progetto  $q_d = 2.01 \text{ kg/cm}^2$ .

#### **Carico di progetto (area di via Cerca)**

La valutazione è stata fatta relativamente ai terreni rilevati nella penetrometria n°4, cioè quella meno favorevole, per lo strato che si trova compreso fra m-3.00 e m-5.50 di profondità, strato con coesione non drenata media  $c_{um} = 0.99 \text{ kg/cm}^2$  da cui deriva una coesione caratteristica  $c_{uk} = 0.67 \text{ kg/cm}^2$  e una coesione non drenata di progetto  $c_{ud} = 0.48 \text{ kg/cm}^2$ , da cui si ottiene un carico di progetto  $q_d = 2.19 \text{ kg/cm}^2$ .

Si tratta peraltro in entrambe le aree di carichi di progetto elevati che porterebbero a cedimenti dei terreni difficilmente assimilabili, si consiglia pertanto di considerare un carico di progetto di valore non superiore a **1.00 kg/cm<sup>2</sup>**.

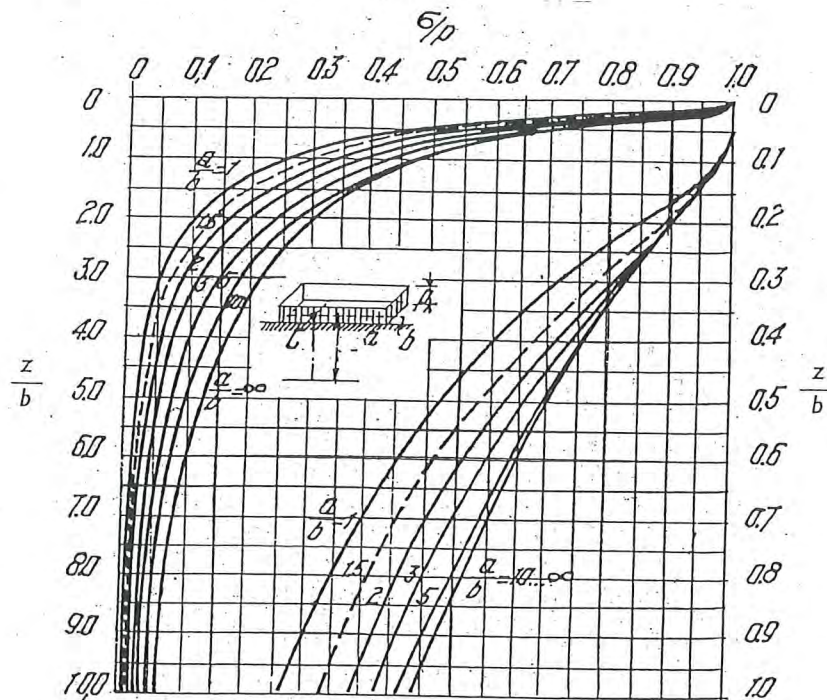
#### **Cedimenti dei terreni di fondazione**

Per il carico di progetto consigliato (1.00 kg/cm<sup>2</sup>) quindi per sovraccarichi effettivi sul piano di posa, al netto del carico esercitato dal terreno asportato (m 3.00 di terreno con falda idrica a

m-1.00 equivalgono a circa  $0.36 \text{ kg/cm}^2$ ), pari a  $0.64 \text{ kg/cm}^2$ , si sono valutati i possibili cedimenti del terreno di fondazione relativamente ai punti sondati con le tre penetrometrie. Il calcolo dei cedimenti è stato fatto sulla base dei seguenti assunti ;

Consolidazione monodimensionale (schema edometrico)

Tensioni verticali nel sottosuolo secondo la teoria della elasticità, per il calcolo è stato utilizzato il diagramma di Jelinek sotto riportato.



- Grafico di Jelinek per la determinazione delle pressioni verticali nel sottosuolo, sulla verticale di un punto caratteristico, prodotte da una superficie di carico infinitamente rigida.

Valutazione dei cedimenti nell'ambito della profondità  $H_c$  del banco comprimibile, il cui spessore equivale allo strato di terreno alla base del quale la sovrappressione residua risulta inferiore a 15% del carico litostatico.

Modulo edometrico  $M_o = \alpha R_p$  con  $\alpha$  valutato in base alla litologia.

Il calcolo dei cedimenti è stato condotto per strati successivi omogenei valutando per ciascuno strato la tensione verticale  $\sigma_v$  (al centro della superficie di carico) e il valore del modulo edometrico  $M_o$  (ottenuto dalla elaborazione dei dati penetrometrici), in base alla espressione:

$$\text{cedimento } S = n \sum (h \cdot \sigma_v / M_o)$$

La valutazione dei cedimenti è stata fatta per le prove CPT n°1 e n°4), le meno favorevoli.



**Cedimento (S) per piastra rigida da m 5.00 x 5.00 con sovraccarico netto pari a 0.64 kg/cm<sup>2</sup>**

**Penetrometria n°1**

Profondità strato	Spessore strato(m)	Tensione( $\sigma_v$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo edometrico. (kg/cm <sup>2</sup> )	Cedimento strato (cm)
Da m-3.00 a m-4.60	1.60	0.56	85.51	1.05
Da m-4.60 a m-5.60	1.00	0.37	66.86	0.55
Da m-5.60 a m-6.40	0.80	0.29	98.23	0.24
Da m-6.40 a m-7.00	0.60	0.24	122.40	0.12
Da m-7.00 a m-8.00	1.00	0.19	156.45	0.12
Da m-8.00 a m-8.60	0.60	0.15	112.84	0.08

**Cedimento cm 2.16**

**Penetrometria n°4**

Profondità strato	Spessore strato(m)	Tensione( $\sigma_v$ ) (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo edometrico. (kg/cm <sup>2</sup> )	Cedimento strato (cm)
Da m-3.00 a m-4.60	1.60	0.56	97.39	0.92
Da m-4.60 a m-5.40	0.80	0.38	73.80	0.41
Da m-5.40 a m-6.60	1.20	0.29	99.49	0.35
Da m-6.60 a m-7.00	0.40	0.23	110.15	0.08
Da m-7.00 a m-7.80	0.80	0.20	134.23	0.12
Da m-7.80 a m-8.60	0.80	0.15	125.86	0.10

**Cedimento cm 1.98**

E' evidente che con i carichi consigliati si avranno cedimenti assoluti assimilabili. I valori massimi di cedimenti consigliabili, secondo Skempton e McDonald (1955) sono:

Assoluti : per travi continue, plinti :  $S_{max}$  - cm 5.0 (in sabbie) - cm 7.5 (in argille)

per platea rigida :  $S_{max}$  - cm 3.5-6.0 (in sabbie) – cm 3.5-10.0 (in argille)

Massimo cedimento differenziale : Argille cm 4.5 – Sabbie cm 3.00

**CONCLUSIONI**

La realizzazione di quanto previsto in progetto non comporta variazioni significative dell'ambiente fisico circostante, si avranno movimentazioni di terreno relativamente modeste.

I terreni presentano caratteristiche meccaniche tali da permettere la realizzazione di fondazioni superficiali, si esprime pertanto parere geologico favorevole alla realizzazione di quanto richiesto. In ottemperanza con la Circ.Reg. 1288 dell'11/02/83, si rinvia alla fase di progetto esecutivo il definitivo approfondimento geologico (D.M. 11/03/88).

Cesena Dicembre 2009

Magnani dott. Andrea



Oggetto:

Piano Urbanistico Attuativo di iniziativa privata (10.2 AT3 – AT5) in San Giorgio di Cesena

In merito a quanto richiesto da:

### Provincia di Forlì-Cesena

Servizio Ambiente e Pianificazione Territoriale  
Urbanistica – Valutazione Previsionale

E cioè:

#### Integrazioni alla Relazione Geologica:

In merito al progetto di espansione del comparto scolastico, con realizzazione di una nuova palestra e di annesso spogliatoio, non vengono forniti dettagli, né di tipo geologico, né urbanistico.

Pur comprendendo che l'espansione del complesso sia "obbligata" nella direzione scelta, per essere accorpata agli edifici esistenti, e quindi non ritenendo strettamente necessaria un'analisi di risposta sismica approfondita, vista anche la stratigrafia presente nell'area, bisogna rilevare che le successive fasi di attuazione dell'opera, non passeranno più da questo Servizio per l'espressione del proprio parere di competenza. Si ritiene, quindi, che la scelta debba essere suffragata da una prima indagine conoscitiva (anche da prove d'archivio), che confermi la mancanza di problematiche particolari per il successivo sviluppo del progetto, in modo da acquisire un parere pienamente conformato.

Si fa presente che le penetrometrie e la prova MASW realizzate per la parte Nord del P.U.A. in oggetto sono contigue all'area in cui è prevista la realizzazione della palestra scolastica e pertanto si ritiene che per tale area siano valide tutte le considerazioni di carattere geologico e sismico presentate nella relazione geologica inerente l'intero comparto.

Cesena febbraio 2013

Magnani dott. Andrea

