

5 Caratterizzazione dinamica dei terreni di Senigallia e analisi della risposta sismica locale

A cura di:

T. Crespellani¹, J. Facciorusso¹, C. Madiati¹, G. Simoni¹.

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Firenze*

5.1 Caratterizzazione dinamica dei terreni

Come illustrato nel Capitolo 4, per la microzonazione sismica di Senigallia è stata condotta nel 2005 una specifica campagna di indagini geotecniche che ha compreso 12 sondaggi con estrazione di 38 campioni indisturbati, 10 prove CPT, 8 prove Down Hole (DH) e 1 prova Cross Hole (CH). In aggiunta a tali indagini, sono state effettuate dalla Sezione Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile (DIC) dell'Università di Firenze:

- 3 prove DH di controllo;
- prove dinamiche in laboratorio con l'apparecchio di colonna risonante (RC) su 16 campioni indisturbati.

Alle prove dinamiche di laboratorio sono state associate anche prove geotecniche convenzionali per una completa descrizione del comportamento meccanico dei terreni costituenti il deposito anche nel campo delle sollecitazioni statiche.

Poiché uno degli obiettivi della caratterizzazione dei terreni è rappresentato dalla definizione di un modello numerico per l'analisi della risposta sismica locale (par. 5.2), sono stati determinati tutti i parametri geotecnici necessari all'applicazione del codice di calcolo utilizzato.

I risultati delle indagini sperimentali condotte vengono riportati in dettaglio e commentati nei paragrafi seguenti.

5.1.2 Prove effettuate

La localizzazione delle verticali esplorate con sondaggi, prove CPT e prove dinamiche in sito, nel corso della campagna di indagini condotta per la microzonazione sismica di Senigallia, è riportata nella Figura 5.1.

Il quadro complessivo delle prove di laboratorio, eseguite presso il Laboratorio Geotecnico del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze, sui campioni indisturbati estratti dai sondaggi S1, S2, S4, S6, S7, S9, S10, S11, S12, è riassunto nella Tabella 5.1, nella quale, oltre alla profondità della falda e alla denominazione della località in cui è stato effettuato il sondaggio, sono riportate, per ciascun campione, la profondità di prelievo e la formazione geologica di appartenenza.

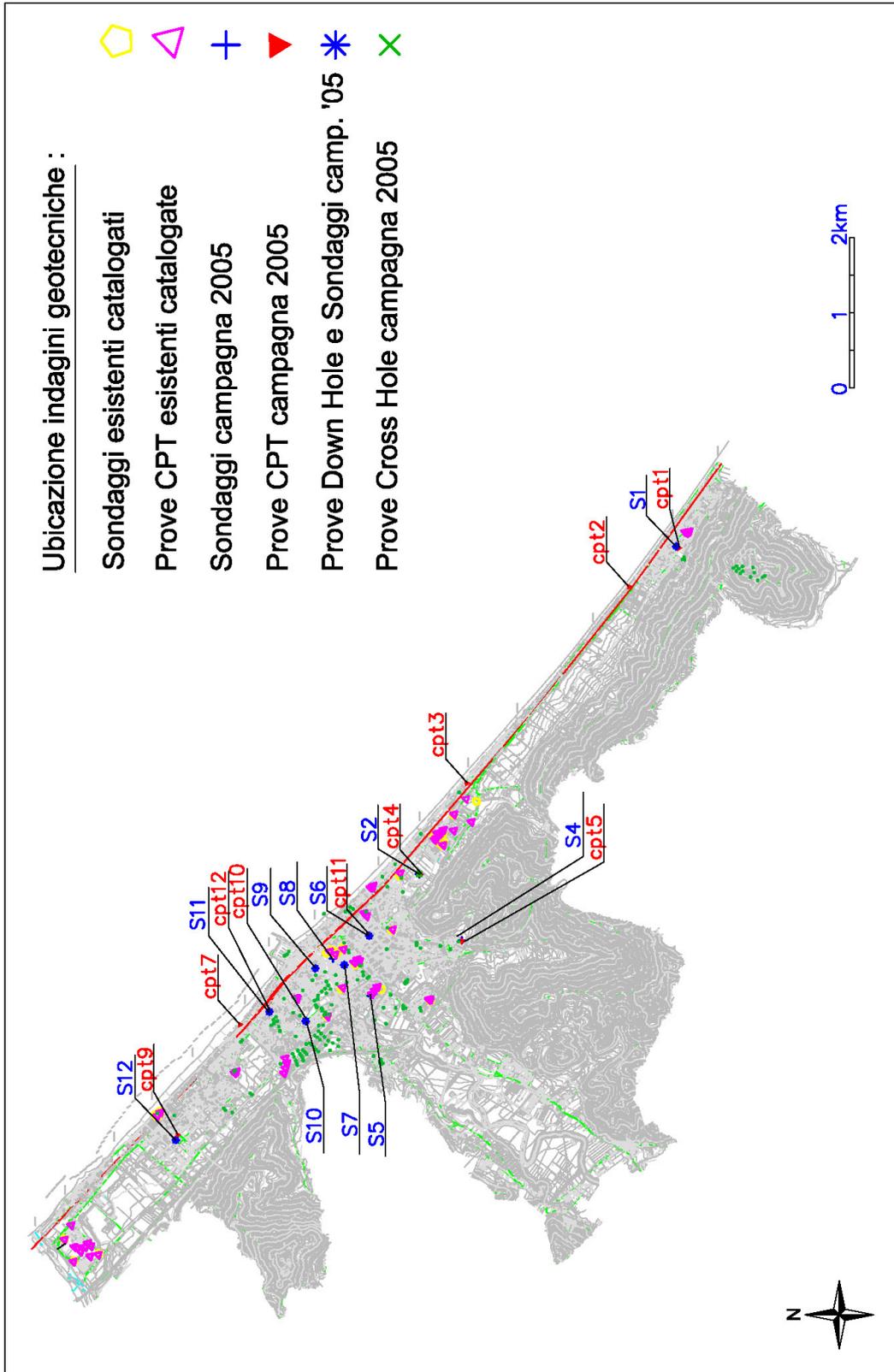


Figura 5.1 - Carta con la localizzazione dei sondaggi, delle prove CPT, delle prove DH e CH.

Nella stessa Tabella 5.1 sono anche indicate le prove geofisiche in foro eseguite nel sondaggio di estrazione dei campioni e le prove CPT effettuate in adiacenza al sondaggio¹.

Come si può osservare nella Tabella 5.1, le tre prove Down Hole di controllo sono state effettuate dal DIC nei sondaggi S2, S6 e S10.

Tabella 5.1 - Località, sondaggi, profondità e origine dei campioni pervenuti al DIC.

Località	Sond.	Camp.	Prof. (m)	Formazione	Falda (m)	Prove di laboratorio	Prove in sito
Marzocca	S1	C3	13.0 – 13.5	Eluvio-colluv.	*	Class., EDO, RC	CPT, DH ¹
Senigallia (Saline)	S2	C1	5.5 – 6.0	Alluvioni	14.5	Class., EDO, RC	SPT, CPT, CH, DH ²
		C2	9.0 – 9.5	Alluvioni		Class., EDO, RC	
		C3	14.5 – 15.0	Alluvioni		Class., RC	
		C4	21.0 – 21.5	Substrato		Class., RC	
Senigallia (Via dei Faggi)	S4	C2	5.0 – 5.5	Alluvioni	1.5	-	CPT (foro non riv.)
		C4	22.0 – 22.3	Substrato		-	
Senigallia (P.le Vittoria)	S6	C1	3.0 – 3.5	Alluvioni	3.0	Class., RC	CPT, DH ¹ , DH ²
		C2	9.0 – 9.5	Alluvioni		Class., EDO, RC	
		C3	25.5 – 26.0	Substrato		Class., RC	
Senigallia (Lamarmora)	S7	C1	9.0 – 9.5	Alluvioni	6.0	Class.	SPT, DH ¹
		C2	15.0 – 15.5	Alluvioni		Class., EDO, RC	
		C3	24.0 – 24.5	Alluvioni		Class., RC	
		C4	29.0 – 29.5	Substrato		-	
Senigallia (Lambertina)	S9	C1	8.5 – 9.0	Alluvioni	3.5	Class., RC, EDO	SPT, DH ¹
		C3	23.5 – 24.0	Substrato		-	
Senigallia (Parco Pace)	S10	C1	2.0 – 2.5	Alluvioni	10.5	Class., EDO, RC	CPT, SPT, DH ¹ , DH ²
		C2	5.5 – 6.0	Alluvioni		Class., EDO, RC	
Senigallia (Via Sanzio)	S11	C1	10.0 – 10.5	Deltizio	1.5	Class., EDO, RC	SPT, CPT, DH ¹
		C2	20.0 – 20.5	Substrato		-	
Cesanella	S12	C1	3.0 – 3.5	Coperture alluv. e marine	1.5	Class., EDO, RC	CPT, DH ¹

Legenda

* falda assente

Class. = Prove di classificazione

EDO = Prova di compressione edometrica

RC = Prova di colonna risonante

DH¹ = Prova down-hole eseguita da altre ditte

DH² = Prova DH eseguita dal DIC

5.1.3 Profili stratigrafici e misure di V_s

Nelle Figure 5.2a, 5.2b, 5.2c, 5.2d, 5.2e, 5.2f, 5.2g, 5.2h sono riportate le stratigrafie semplificate dei sondaggi da cui sono stati estratti i campioni esaminati in laboratorio e i relativi profili della velocità

¹ E' da rilevare però che ai fini della caratterizzazione geotecnica finalizzata alla microzonazione sismica i profili delle prove CPT non sono stati direttamente utilizzati.

delle onde S. Nello stesso grafico sono anche riportati i valori di V_S stimati a partire dai risultati delle prove di colonna risonante, descritti nei successivi paragrafi. Nelle Figure 5.2b, 5.2c e 5.2f sono inoltre riportati i profili di V_S ottenuti dal DIC nei sondaggi S2, S6, S10, utilizzando un'attrezzatura con sistema di ricezione a doppio geofono (Geostuff, mod. BHG-2 a 10Hz) e interpretando le misure con il metodo dell'intervallo. Osservando tali figure, si può notare che nel sondaggio S2 (Località Saline, Figura 5.2b) gli scostamenti massimi tra i due profili di V_S sono localizzati in strati di modesto spessore e quelli più significativi si rilevano in corrispondenza di una fascia di circa 5m, poco al di sotto del passaggio stratigrafico dalla copertura al substrato marnoso; entrambi mostrano un trend generalmente crescente con la profondità, e non evidenziano un aumento significativo dei valori di V_S in corrispondenza del passaggio stratigrafico dalle alluvioni alle marne. Nel sondaggio S6 (Località Piazzale Vittoria, Figura 5.2c), i profili sono complessivamente molto simili, soprattutto nella copertura alluvionale; entrambi segnalano modeste e irregolari variazioni di V_S con la profondità e non mettono in evidenza variazioni di V_S in corrispondenza del passaggio stratigrafico dalla copertura alluvionale al substrato marnoso; entrambi sono in buon accordo anche con la stratigrafia e con i risultati delle prove di laboratorio.

Nel sondaggio S10 (Località Parco della Pace, Figura 5.2f), le maggiori differenze tra i due profili si riscontrano nei primi 4m della copertura alluvionale, costituiti per lo spessore di 1 metro da materiali di riporto e per i successivi 3 metri da limi argillosi. In tale strato, il valore di V_S ottenuto dal campione in laboratorio si colloca in posizione intermedia tra i due profili, ma poiché i valori che si ottengono in laboratorio dovrebbero essere, almeno in via teorica, minori di quelli in sito, si può su tale base dedurre che i valori di V_S ottenuti dal DIC in tale strato siano più realistici. Gli scostamenti tra i due profili di V_S si vanno tuttavia riducendo sensibilmente con la profondità e al di sotto dei 5m sono in ottimo accordo. Anche in questo caso, come nei precedenti sondaggi, entrambi i profili non segnalano bruschi aumenti di velocità in corrispondenza del passaggio dalla copertura al substrato.

Ai fini delle analisi numeriche per la valutazione della risposta sismica locale, dal complesso delle misure di V_S effettuate, si è rilevato che:

il substrato marnoso, incontrato in tutti i sondaggi, non costituisce un vero bedrock sismico e non si può neppure considerare un terreno duro equivalente secondo i criteri usuali, dal momento che i valori di V_S (mediamente intorno a 300-350m/s al tetto del substrato e poi crescenti con la profondità) sono notevolmente inferiori ai valori convenzionali di 700-800m/s assunti di norma come riferimento.

Pertanto, come verrà meglio specificato nel paragrafo 5.2.2, si è ritenuto lecito supporre che:

- il bedrock sismico si trovi ad una profondità di circa 8-12m al di sotto del passaggio stratigrafico tra la copertura e lo strato marnoso pleistocenico;
- la velocità delle onde S per il bedrock sismico (rappresentato dallo strato marnoso inalterato) sia pari a 600m/s;
- nel tratto compreso tra il tetto del substrato marnoso e il bedrock sismico i valori di V_S siano intermedi tra quelli degli strati sovrastanti e del bedrock e progressivamente crescenti con la profondità.

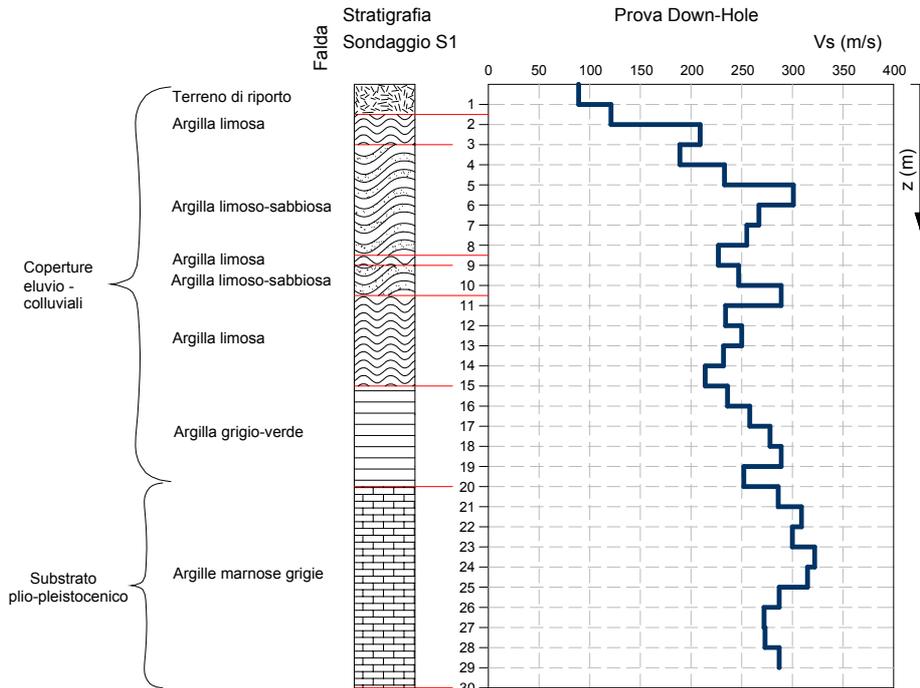


Figura 5.2a - Sondaggio S1 (Località Marzocca): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

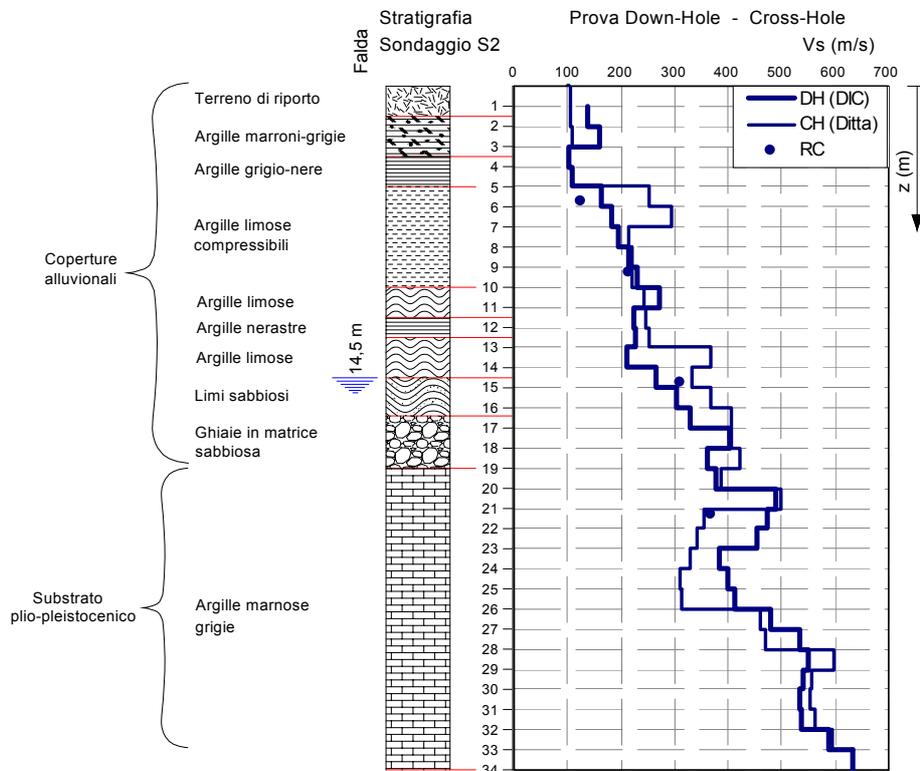


Figura 5.2b - Sondaggio S2 (Località Saline): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

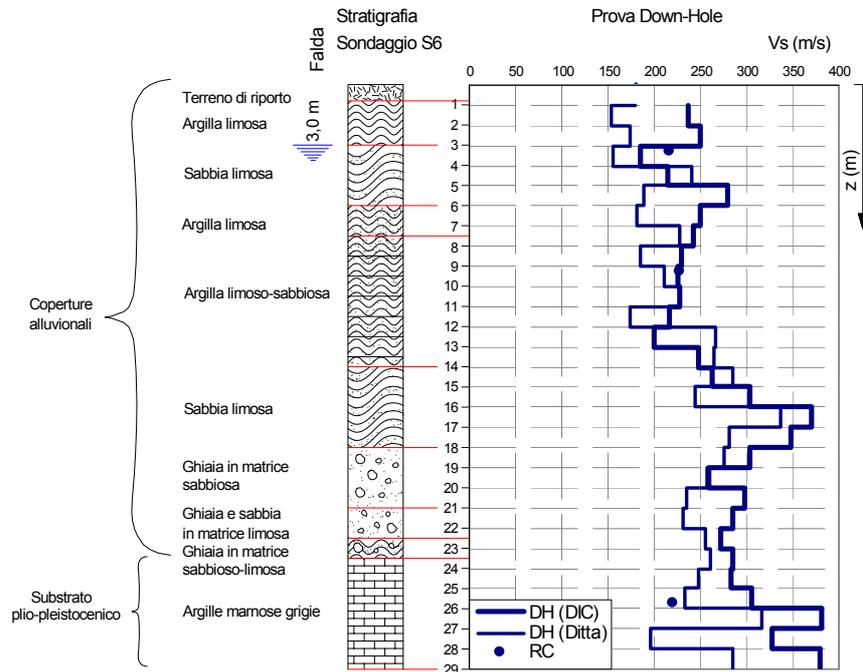


Figura 5.2c - Sondaggio S6 (Località P.le Vittoria): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

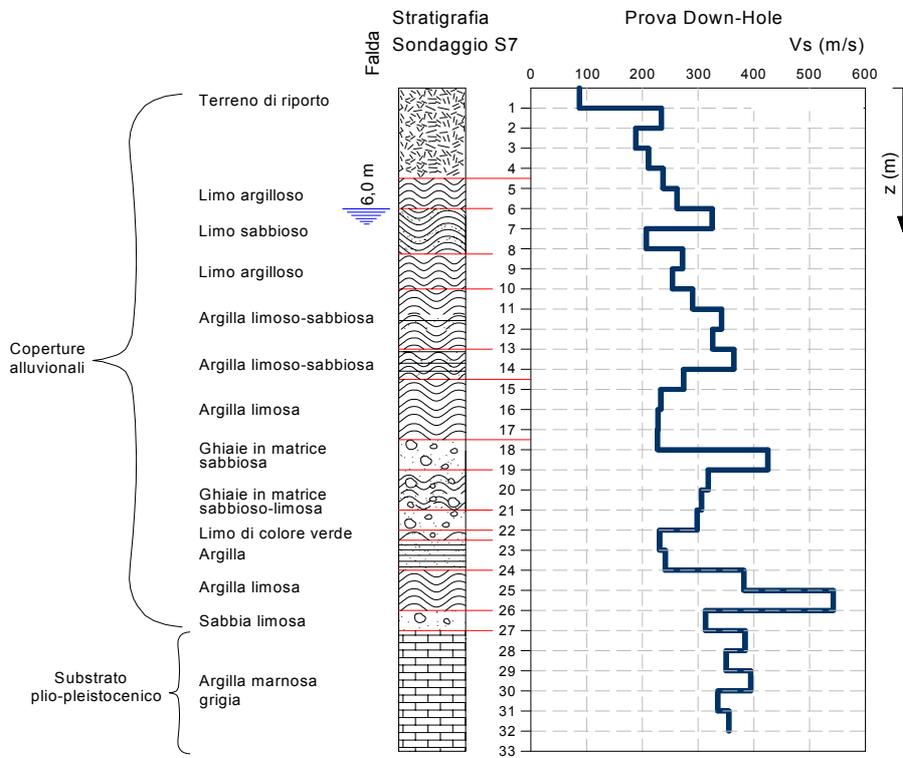


Figura 5.2d - Sondaggio S7 (Località Lamarmora): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

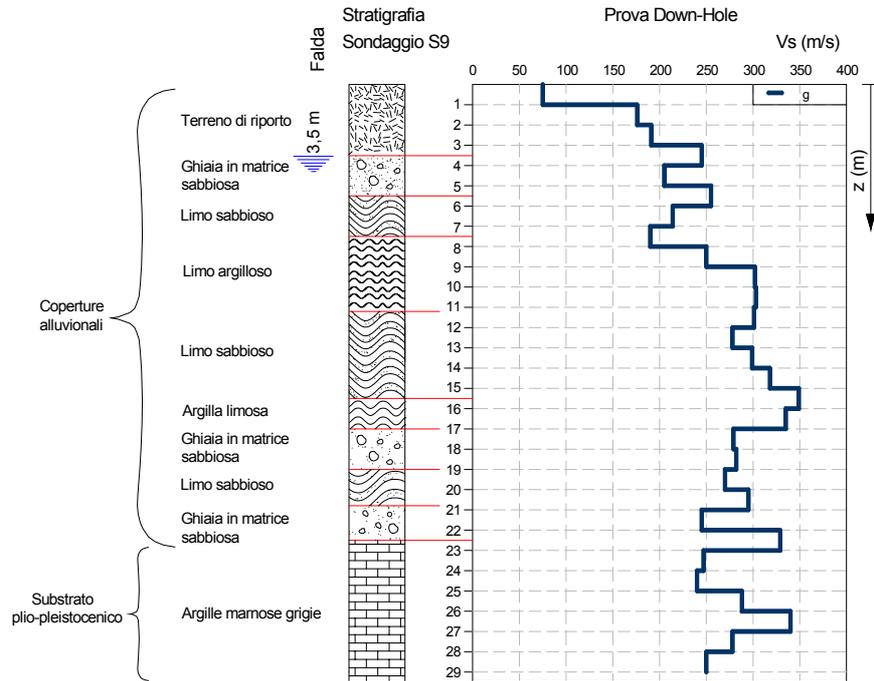


Figura 5.2e - Sondaggio S9 (Località Lambertina): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

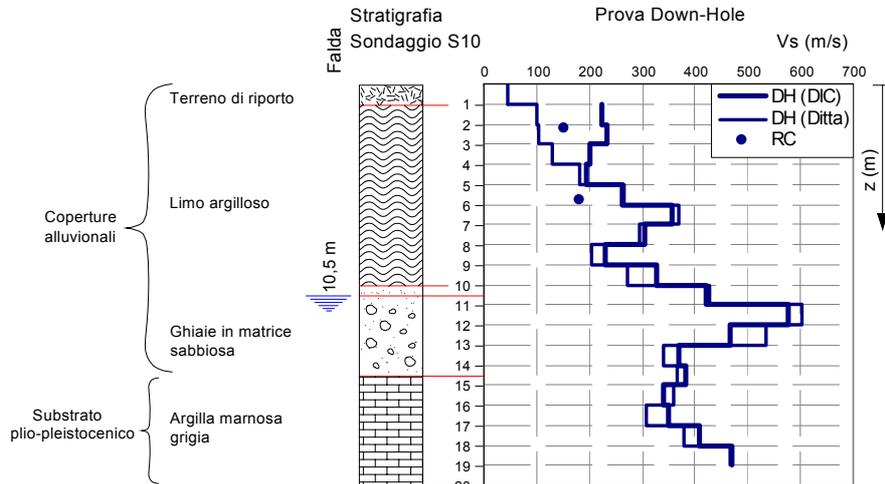


Figura 5.2f - Sondaggio S10 (Località Parco Pace): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

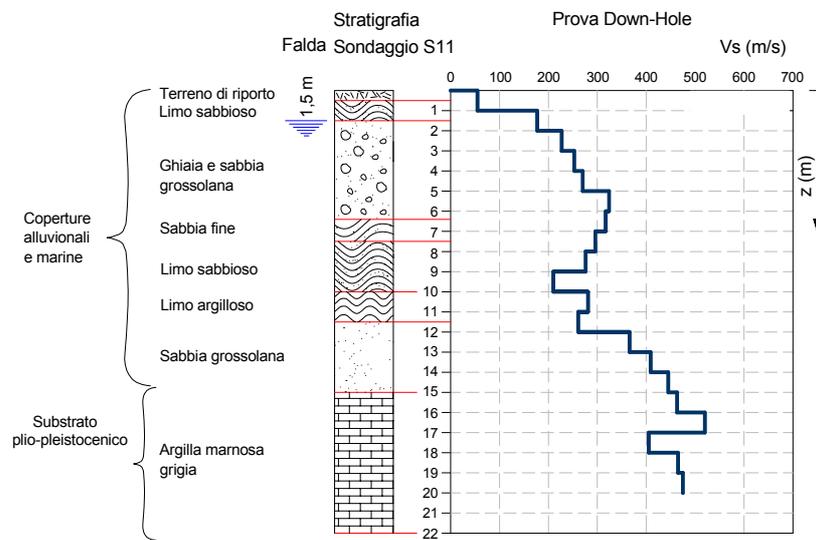


Figura 5.2g - Sondaggio S11 (Località Via Sanzio): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

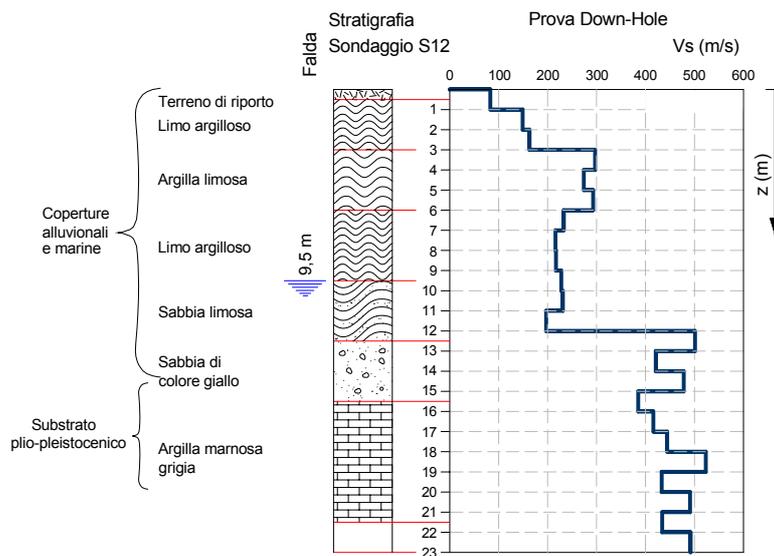


Figura 5.2h - Sondaggio S12 (Località Cesanella): stratigrafia e andamento dei valori della velocità delle onde S con la profondità.

5.1.4 Prove di laboratorio

Sulla base delle stratigrafie e delle indicazioni fornite dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma La Sapienza, è stato possibile identificare la formazione geologica di provenienza dei 21 campioni indisturbati di terreno pervenuti al DIC per essere sottoposti alle analisi di laboratorio. Di questi, in particolare, un campione appartiene alle coperture eluvio-colluviali (Località Marzocca), 14 provengono dalle coperture alluvionali (Località Saline, Via dei Faggi, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, Parco Pace, Via Sanzio, Cesanella) e 6 sono stati prelevati nel substrato marnoso (Località Saline, Via dei Faggi, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, V.Sanzio). Soltanto da 16 dei 21 campioni disponibili è stato possibile ricavare provini di buona qualità sui quali effettuare prove di laboratorio.

Nel seguito vengono commentati i risultati delle prove di laboratorio più significativi ai fini della valutazione della risposta sismica locale, distinguendo i campioni in base alla formazione di appartenenza, e precisamente:

- coperture eluvio-colluviali (1 campione)
- depositi alluvionali (13 campioni)
- substrato marnoso (2 campioni).

5.1.5 Coperture eluvio – colluviali

Alle coperture eluvio-colluviali appartiene il campione S1-C3, estratto alla profondità compresa tra 13.00 e 13.50m nel sondaggio S1 effettuato in località Marzocca, in corrispondenza del quale non è stata rilevata la presenza della falda. Il campione è consistente, composto da argilla limosa di colore grigio-nocciola.

In base ai risultati delle prove di classificazione, il materiale appartiene alla classe CH del sistema USCS.

Le principali proprietà fisiche e meccaniche del campione S1-C3 sono riassunte nella Tabella 5.2 e nelle Figure 5.3 e 5.4, nelle quali sono riportati rispettivamente la posizione del punto rappresentativo del campione sulla carta di plasticità e le curve edometriche di carico e scarico.

Nella stessa Tabella 5.2 sono indicati anche i valori del modulo di taglio iniziale G_0 e del rapporto di smorzamento iniziale D_0 .

Tabella 5.2 - Valori delle proprietà indici e dei principali parametri geotecnici dei campioni estratti dai depositi eluvio-colluviali nel sondaggio S1 (Marzocca).

Campione	S1-C3
z [m]	13.00 ÷ 13.50
z _w [m]	assente
γ [kN/m ³]	19.17 (A)
γ _s [kN/m ³]	26.61 (A) 26.61 (RC)
P.P. [kPa]	110-150 >550
w _L [%]	55
w _P [%]	22
I _P [%]	33
w [%]	32.6 (A) 28.5 (B)
I _c *	0.741
e _o	0.841 (EDO)
σ' _{v0} [kPa]	254
S _r ** [%]	98.6
K ₀ ***	0.579
C _c	0.19
C _s	0.09
σ' _p [kPa]	250
OCR	1
USCS	CH
G ₀ [MPa]	84.78
D ₀ [%]	1.8
γ _v [%]	-

* Valore ottenuto utilizzando i valori medi di w

** Stima eseguita con l'espressione $S_r = wG_s/e_0$ (valori medi)

*** Stima eseguita con l'equazione di Massarsch (1979): $K_0 = 0.44 + 0.42I_p/100$

(A) Determinato sulla parte alta del campione

(B) Determinato sulla parte bassa del campione

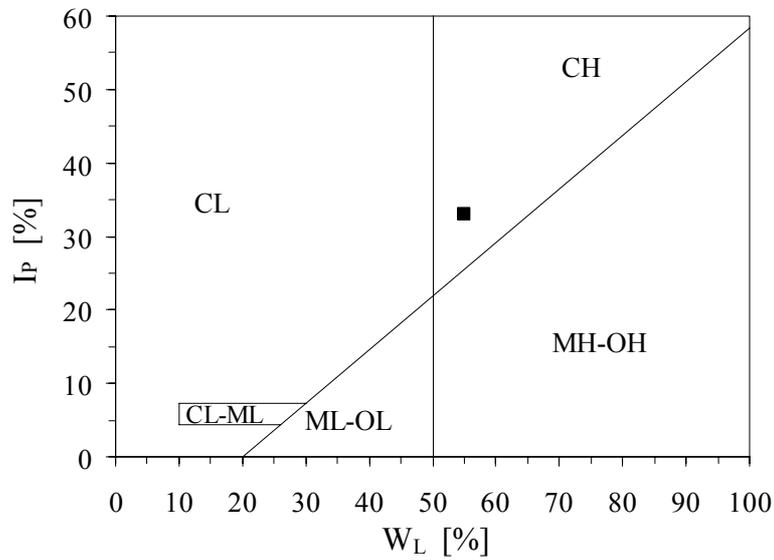


Figura 5.3 - Carta di plasticità del Sistema USCS e punto rappresentativo del campione S1-C3 prelevato nelle coperture eluvio-colluviali (Località Marzocca).

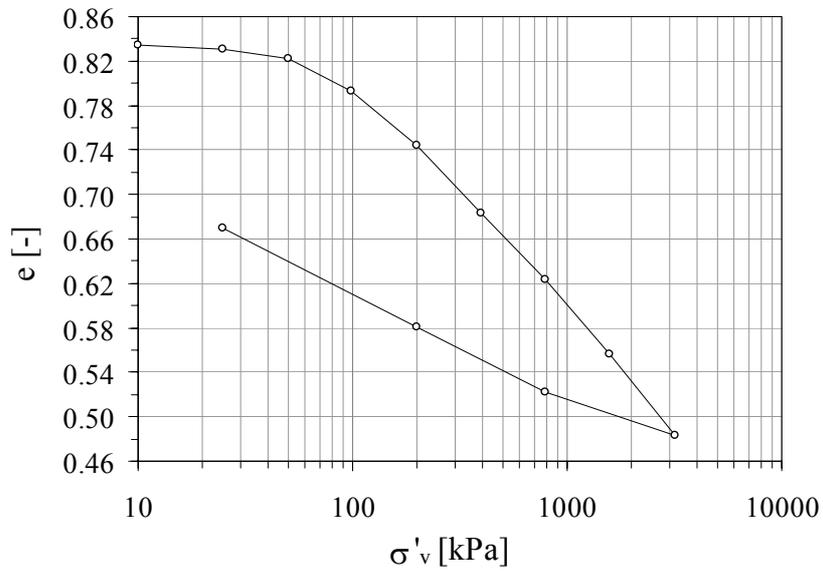


Figura 5.4 - Curva edometrica del campione S1-C3 prelevato nelle coperture eluvio-colluviali (Località Marzocca).

5.1.6 Depositi alluvionali

La maggior parte dei campioni estratti durante le indagini provengono dai depositi alluvionali, che rappresentano la formazione geologica prevalente nel sottosuolo esplorato dell'area in esame. In tale gruppo è stato inserito anche il campione S11-C1, di ambiente deltizio. I campioni sono stati estratti a profondità variabili tra i 2m e i 24m, nei sondaggi S2, S6, S7, S9, S10, S11, S12, nei quali la profondità della falda è stata rilevata a profondità comprese tra 1.5 e 14.5m (Tabella 5.1).

Le proprietà fisiche e meccaniche dei 13 campioni, appartenenti ai depositi alluvionali (e deltizi), sono riassunte nelle Tabelle 5.3a, 5.3b e 5.3c. Nelle Figure 5.5 e 5.6 sono mostrati, rispettivamente, i punti rappresentativi dei campioni esaminati sulla carta di plasticità del Sistema USCS e le curve edometriche di carico e scarico.

Nelle Tabelle 5.3a, 5.3b e 5.3c sono riportati, per tutti i campioni, anche il modulo di taglio iniziale, G_0 , il rapporto di smorzamento, D_0 , e la deformazione di taglio volumetrica, γ_v . Nelle Figure 5.7 e 5.8 sono rappresentate le curve di variazione del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento con l'ampiezza della deformazione di taglio, γ , ottenute con l'apparecchio di colonna risonante.

L'insieme dei risultati ottenuti mostra che le proprietà geotecniche dei campioni appartenenti alle alluvioni recenti sono piuttosto disperse; i terreni sono classificabili come materiali di classe CL, plastici ($15\% < I_p < 40\%$). Sono mediamente poco consistenti, con consistenza da fluido-plastica ($0 < I_c < 0.25$) a plastica ($0.50 < I_c < 0.75$), generalmente normalconsolidati e solo in qualche caso debolmente sovraconsolidati. È da osservare, inoltre, che il campione S2C1 ha caratteristiche marcatamente diverse da quelle degli altri campioni appartenenti alla stessa formazione; esso infatti presenta valori molto più elevati del limite di liquidità, dell'indice di plasticità e dell'indice dei vuoti, che ne determinano una notevole differenza di comportamento anche in termini di modulo di taglio normalizzato e rapporto di smorzamento, a parità di deformazione di taglio (Figure 5.7 e 5.8).

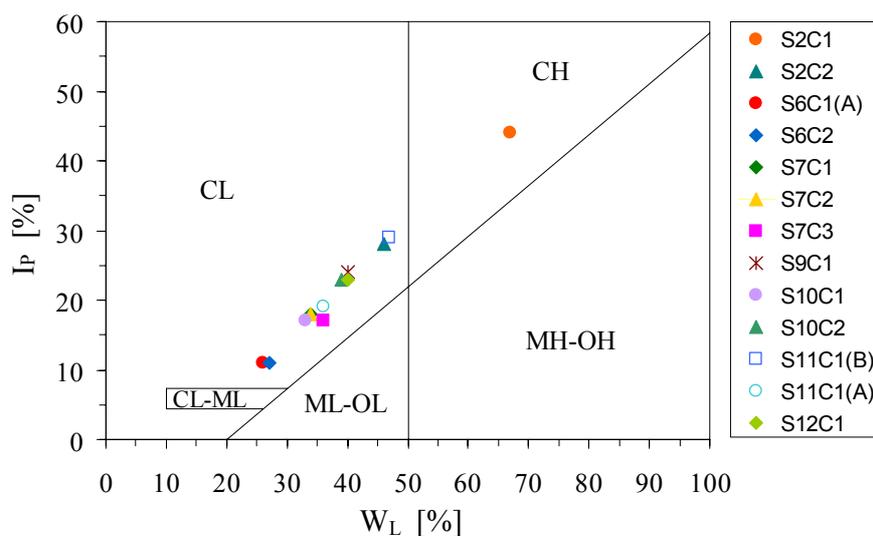


Figura 5.5 - Carta di plasticità del Sistema USCS e punti rappresentativi dei campioni estratti dai depositi alluvionali (Località Saline, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, Parco Pace, Via Sanzio, Cesanella).

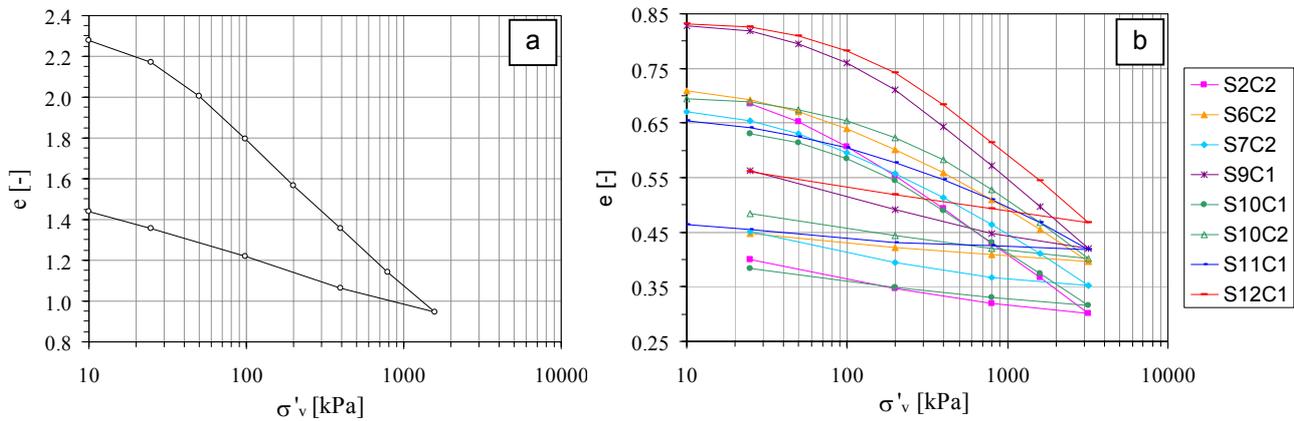


Figura 5.6 - a) Curva edometrica del campione S2-C1 estratto dai depositi alluvionali (Località Saline); b) Curve edometriche dei campioni estratti da depositi alluvionali (Località Saline, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, Parco Pace, Via Sanzio, Cesanella).

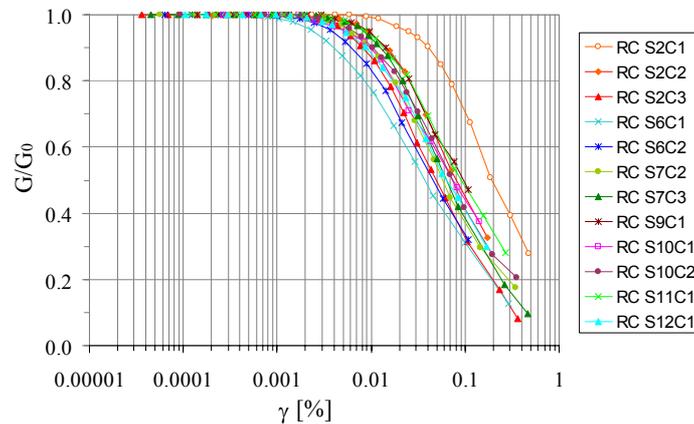


Figura 5.7 - Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G_0 con l'ampiezza della deformazione di taglio γ dei campioni estratti dai depositi alluvionali (Località Saline, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, Parco Pace, Via Sanzio, Cesanella).

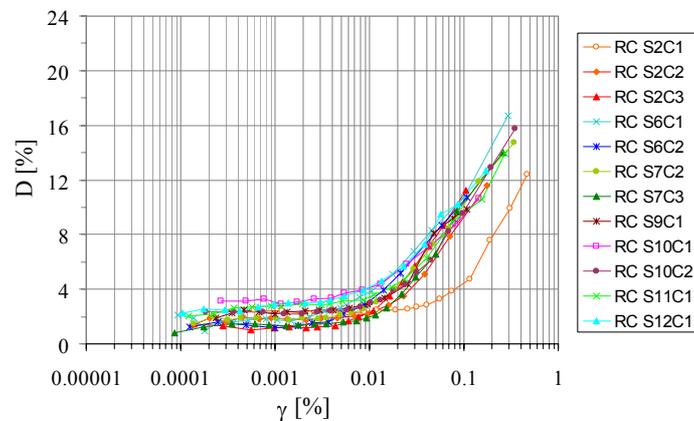


Figura 5.8 - Curve di variazione del rapporto di smorzamento D con l'ampiezza della deformazione di taglio γ dei campioni estratti dai depositi alluvionali (Località Saline, P.le Vittoria, Lamarmora, Lambertina, Parco Pace, Via Sanzio, Cesanella).

Tabella 5.3a - Valori delle proprietà indici e dei principali parametri geotecnici dei campioni estratti dai depositi alluvionali nei sondaggi S2 (Saline) e S6 (P.le Vittoria).

Campione	S2-C1	S2- C2	S2-C3	S6-C1	S6-C2
z [m]	5.5 ÷ 6.0	9.0 ÷ 9.5	14.5 ÷ 15.0	3.0 ÷ 3.5	9.0 ÷ 9.5
z _w [m]	14.5	14.5	14.5	3.0	3.0
γ [kN/m ³]	15.88 (A) 14.61 (B) 15.88 (RC)	19.21 18.98 (RC)	19.80 19.77 (RC)	19.21 (B) 20.11 (RC)	19.39 (A) 19.60 (RC)
γ _s [kN/m ³]	26.07 (A) 26.07 (RC)	26.24 (A) 26.24 (C) (RC)	26.34 (A) 26.33 (RC)	25.88 25.89 (RC)	26.15 26.15 (RC)
P.P. [kPa]	20 (A) 30 ÷ 35 (B)	30 ÷ 40	45	55 ÷ 70 (A)	20 (A) 49 (B)
w _L [%]	67	46	31	26(A)	27
w _p [%]	23	18	17	15(A)	16
I _p [%]	44	28	14	11(A)	11
w [%]	78.8 (A) 64.8 (B) 65.2 (RC)	29.4 (A) 33.4 (B) 31.7 (RC)	31.7 (A) 23.7 (B) 26.5 (RC)	21.7 (A) 22.3 (B)	27.8 (A) 26.4 (B)
I _c *	0.045	0.518	0.421	0.390(A)	0.009
e ₀	2.338 (EDO) 1.627 (RC)	0.746 (EDO) 0.811 (RC)	0.681 (RC)	0.573 (RC)	0.741 (EDO) 0.687 (RC)
σ' _{v0} [kPa]	89	176	291.8	62	118
S _r ** [%]	91.8	≈ 100	99.0	99.9	≈ 100
K ₀ ***	0.625	0.558	0.488	0.486	0.486
C _c	0.70	0.20	-	-	0.186
C _s	0.225	0.044	-	-	0.02
σ' _p [kPa]	35	80	-	-	160
OCR	≈1	≈1	-	-	≈ 1.4
USCS	CH	CL	CL	CL	CL
G ₀ [MPa]	25.5	87.5	195.0	96.1	104.1
D ₀ [%]	2.1	1.4	1.0	0.95	1.2
γ _v [%]	0.08	0.04	0.02	0.012	0.03

* Valore ottenuto utilizzando i valori medi di w

** Stima eseguita con l'espressione $S_r = wG_s/e_0$ (valori medi)

*** Stima eseguita con l'equazione di Massarsch (1979): $K_0 = 0.44 + 0.42I_p/100$

(A) Determinato sulla parte alta del campione

(B) Determinato sulla parte bassa del campione

Tabella 5.3b - Valori delle proprietà indici e dei principali parametri geotecnici dei campioni estratti dai depositi alluvionali nei sondaggi S7 (Lamarmora) e S9 (Lambertina).

Campione	S7-C1	S7- C2	S7-C3	S9-C1
z [m]	9.0 ÷ 9.5	15.0 ÷ 15.5	24.0 ÷ 24.5	8.5 ÷ 9.0
z _w [m]	6.0	6.0	6.0	3.5
γ [kN/m ³]	19.57	19.78 19.82 (RC)	19.87 19.86 (RC)	19.17 19.30 (RC)
γ _s [kN/m ³]	26.26	26.22 26.22 (RC)	26.22 26.22 (RC)	26.37 26.36 (RC)
P.P. [kPa]	70 ÷ 80 (A) 155 ÷ 165 (B)	- (A) 125 ÷ 145 (B)	50 ÷ 90 (A) 295 ÷ 335 (B)	65 ÷ 80(A) 65 ÷ 90 (B)
w _L [%]	34	34	36	40
w _P [%]	16	16	19	16
I _P [%]	18	18	17	24
w [%]	18.4 (A) 20.7 (B)	26.2 (A) 23.7 (B) 25.1(RC)	28.7 (A) 29.7 (B) 29.9(RC)	31.6 (A) 26.1 (B) 29.7(EDO) 28.35(RC)
I _c *	0.555	0.383	0.739	0.455
e _o	-	0.681 (EDO) 0.635 (RC)	0.650 (RC)	0.842 (EDO) 0.762 (RC)
σ' _{v0} [kPa]	148.5	209	299	116
S _r ** [%]	-	100	95.4	97.4
K ₀ ***	0.516	0.516	0.511	0.541
C _c	-	0.18	-	0.260
C _s	-	0.05	-	0.075
σ' _p [kPa]	-	200	-	140
OCR	-	1	-	1.2
USCS	CL	CL	CL	CL
G ₀ [MPa]	-	103.4	147.9	55.1
D ₀ [%]	-	1.75	1.3	2.4
γ _v [%]	-	0.02	0.03	0.04

* Valore ottenuto utilizzando i valori medi di w

** Stima eseguita con l'espressione $S_r = wG_s/e_0$ (valori medi)

*** Stima eseguita con l'equazione di Massarsch (1979): $K_0 = 0.44 + 0.42I_p/100$

(A) Determinato sulla parte alta del campione

(B) Determinato sulla parte bassa del campione

Tabella 5.3c - Valori delle proprietà indici e dei principali parametri geotecnici dei campioni estratti dai depositi alluvionali nei sondaggi S10 (Parco Pace), S11 (Via Sanzio) e S12 (Cesanella).

Campione	S10-C1	S10- C2	S11-C1	S12-C2
z [m]	2.0 ÷ 2.5	5.5 ÷ 6.0	10.0 ÷ 10.5	3.0 ÷ 3.5
z _w [m]	10.5	10.5	1.5	1.5
γ [kN/m ³]	19.60 19.35 (EDO) 19.85 (RC)	19.62 19.35 (EDO) 19.86 (RC)	19.43 (B) 19.19 (RC)	18.77 18.54 (EDO) 18.98 (RC)
γ _s [kN/m ³]	26.33 26.43 (RC)	26.23 26.22(RC)	26.15(A) 26.15 (RC)	26.37 26.37 (RC)
P.P. [kPa]	145 ÷ 165 (A) 85 ÷ 105 (B)	125 ÷ 140 (A) 185 ÷ 215 (B)	25 ÷ 45 (A) 90 ÷ 115 (B)	75 ÷ 100 (A) 135 ÷ 155 (B)
w _L [%]	33	39	36(A) 47(B)	40
w _P [%]	16	16	17(A) 18(B)	17
I _P [%]	17	23	19(A) 29 (B)	23
w [%]	18.4 (A) 20.7 (B) 21.21(EDO) 21.42(RC)	26.2 (A) 23.7 (B) 25.4(EDO) 25.111(RC)	28.7 (A) 29.7 (B) 26.7 (B)(EDO) 29.87(B)(RC)	31.6 (A) 26.1 (B) 29.7 (EDO) 28.35 (RC)
I _c *	0.739	0.807	0.384(A) 0.631(B)	0.483
e ₀	0.648 (EDO) 0.600 (RC)	0.700 (EDO) 0.642 (RC)	0.684 (EDO) (B) 0.769 (RC) (B)	0.845 (EDO) 0.769 (RC)
σ' _{v0} [kPa]	44	113	110	43
S _r ** [%]	88	81	100	96
K ₀ ***	0.511	0.536	0.441 (A) 0.562 (B)	0.537
C _c	0.170	0.210	0.150	0.252
C _s	0.030	0.040	0.015	0.040
σ' _p [kPa]	110	210	160	160
OCR	2.5	1.86	1.4	3.7
USCS	CL	CL	CL	CL
G ₀ [MPa]	46.0	65.6	61.0	67.1
D ₀ [%]	2.9	2.2	2.0	2.3
γ _v [%]	0.025	0.03	0.04	0.03

* Valore ottenuto utilizzando i valori medi di w

** Stima eseguita con l'espressione $S_r = wG_s/e_0$ (valori medi)

*** Stima eseguita con l'equazione di Massarsch (1979): $K_0 = 0.44 + 0.42I_p/100$

(A) Determinato sulla parte alta del campione

(B) Determinato sulla parte bassa del campione

5.1.7 Substrato marnoso

Solo sui due campioni S2-C4 ed S6-C3, prelevati nel substrato marnoso, è stato possibile ricavare provini di buona qualità per effettuare la prova di colonna risonante. I campioni sono costituiti da argilla marnosa di colore grigio, estremamente compatta che dalle prove di classificazione sono risultati rispettivamente appartenenti alle classi CH e CL del sistema USCS. Le principali proprietà misurate in laboratorio sui due campioni provenienti dal substrato marnoso sono riportate nella Tabella 5.4.

Nella Figura 5.9 è mostrata la posizione dei punti rappresentativi dei due campioni sulla carta di plasticità; nelle Figure 5.10 e 5.11 sono rappresentate le curve di variazione del rapporto G/G_0 e del rapporto di smorzamento, D , con l'ampiezza della deformazione di taglio, γ , ottenute da prove di colonna risonante.

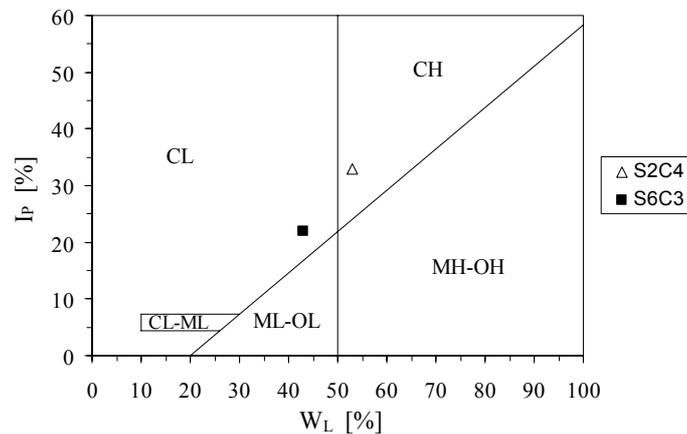


Figura 5.9 - Carta di plasticità del Sistema USCS e punti rappresentativi dei campioni S2-C4 e S6-C3 prelevati nel substrato marnoso (Località Saline e P.le Vittoria).

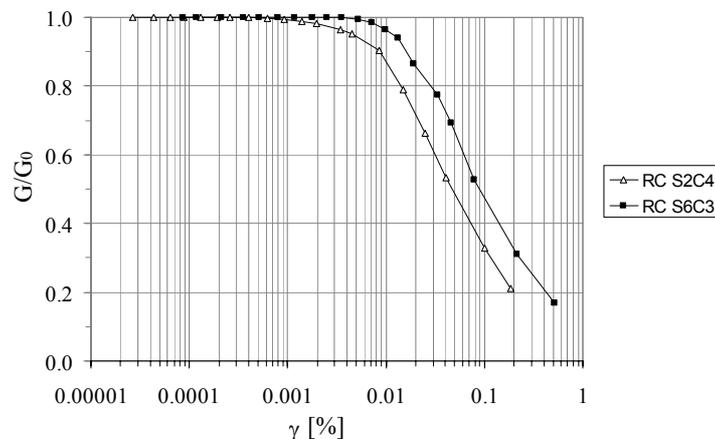


Figura 5.10 - Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G_0 con l'ampiezza della deformazione di taglio γ dei campioni S2-C4 e S6-C3 prelevati nel substrato marnoso (Località Saline e P.le Vittoria).

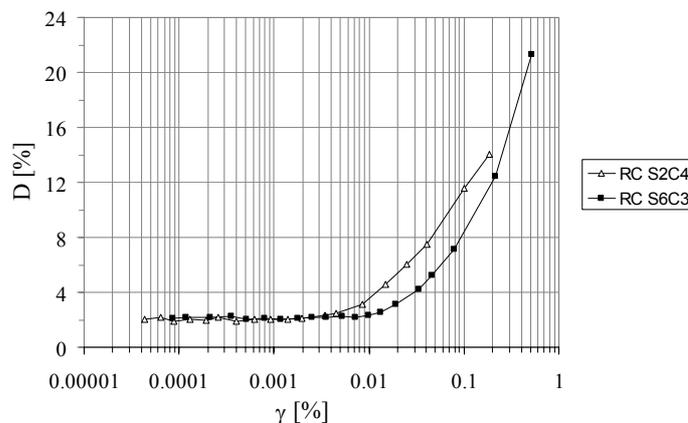


Figura 5.11 - Curve di variazione del rapporto di smorzamento D con l'ampiezza della deformazione di taglio γ dei campioni dei campioni S2-C4 e S6-C3 prelevati nel substrato marnoso (Località Saline e P.le Vittoria).

Tabella 5.4 - Valori delle proprietà indici e dei principali parametri geotecnici dei campioni estratti dal substrato marnoso nei sondaggi S2 (Saline) e S6 (P.le Vittoria).

Campione	S2-C4	S6-C3
z [m]	21.0 ÷ 21.5	25.5 ÷ 26.0
z _w [m]	14.5	3.0
γ[kN/m ³]	21.08 21.08 (RC)	19.97 19.97 (RC)
γ _s [kN/m ³]	26.16 26.16 (RC)	26.43 26.43 (RC)
P.P. [kPa]	> 600	> 600 > 600
w _L [%]	43	53
w _P [%]	21	20
I _p [%]	22	33
w [%]	23.4 (A) 19.7 (B)	25.2 (A) 25.1 (B) 23.02 (RC)
I _c *	0.975	0.845
e _o	-	-
σ' _{v0} [kPa]	302.95	287
S _r ** [%]	-	-
K ₀ ***	0.532	0.579
C _c	-	-
C _s	-	-
σ' _p [kPa]	-	-
OCR	-	-
USCS	CL	CH
G ₀ [MPa]	291.9	98.4
D ₀ [%]	1.71	2.1
γ _v [%]	-	-

* Valore ottenuto utilizzando i valori medi di w

** Stima eseguita con l'espressione $S_r = wG_s/e_0$ (valori medi)

*** Stima eseguita con l'equazione di Massarsch (1979):

$$K_0 = 0.44 + 0.42I_p/100$$

(A) Determinato sulla parte alta del campione

(B) Determinato sulla parte bassa del campione

5.2 Analisi numeriche della risposta sismica locale

I possibili fenomeni di amplificazione locale nei diversi siti del territorio comunale di Senigallia sono stati valutati, oltre che sulla base di misure del rumore ambientale e di microtrempi, come descritto nel Capitolo 6, anche mediante l'applicazione di modelli numerici.

Le analisi sono state eseguite utilizzando il codice PROSHAKE, una versione per Windows del programma SHAKE (Schnabel et al., 1972), che impiega un modello monodimensionale lineare equivalente ed effettua l'analisi della risposta sismica locale (RSL) in termini di pressioni totali.

Lo studio è stato finalizzato, in particolare, al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- a) valutare la RSL nelle diverse verticali per differenti moti sismici di ingresso al sito, corrispondenti sia a moti *reali* sia a moti *sintetici*;
- b) verificare la conformità degli spettri di risposta ottenuti in superficie in corrispondenza delle verticali analizzate con quelli proposti dall'Eurocodice 8 per le classi di terreno corrispondenti;
- c) accertare l'influenza della posizione del bedrock sismico sulla risposta in superficie;
- d) confrontare, in termini di fattore di amplificazione, le risposte ottenute nelle diverse verticali per valutare la possibilità di individuare zone a diversa pericolosità locale.

Le analisi sono state effettuate in corrispondenza dei sondaggi S1, S2, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, impiegando per la modellazione i dati stratigrafici, i profili della velocità delle onde S e le proprietà dinamiche, determinati sperimentalmente e descritti nei precedenti paragrafi.

Come input sismico sono stati adottati complessivamente otto accelerogrammi, di cui cinque artificiali, ottenuti su roccia affiorante mediante la modellazione della struttura geologica e sismogenetica profonda (Capitolo 7), e tre registrazioni accelerometriche di terremoti reali registrati, su roccia affiorante, in stazioni vicine all'area in esame. Gli accelerogrammi di input sono stati scelti con i criteri descritti più in dettaglio nel paragrafo 5.2.1.

I risultati ottenuti sono stati elaborati nel dominio delle frequenze, determinando l'andamento degli spettri di risposta elastici in superficie e su roccia affiorante. Per valutare gli effetti di sito mediante un unico parametro sintetico, in corrispondenza delle 11 verticali indagate e per ciascuno degli 8 input sismici utilizzati, è stata calcolato il fattore di amplificazione, F_a , definito come rapporto tra i valori dell'intensità di Housner (integrale della funzione di pseudovelocità nell'intervallo di periodo 0.1÷2.5s) calcolati rispettivamente alla superficie del deposito e su roccia affiorante.

Per la modellazione sono stati adottati criteri 'omogenei', sia per il posizionamento del bedrock sismico, sia per la definizione del modello stratigrafico, sia per l'assegnazione delle proprietà in campo dinamico ai terreni non direttamente sottoposti a prove dinamiche. Tali criteri sono di seguito descritti.

5.2.1 Moti sismici di input

Come già anticipato nel paragrafo precedente, sono stati assunti come moti di input su roccia affiorante otto accelerogrammi, dei quali tre sono registrazioni di terremoti reali e cinque sono accelerogrammi sintetici.

Gli accelerogrammi reali sono stati selezionati su un totale di 10 registrazioni disponibili (5 eventi nelle due componenti NS ed EW) relative alla sequenza sismica di Ancona del 1972, ritenuta sufficientemente rappresentativa delle caratteristiche di sismicità del comune di Senigallia. Il criterio di scelta è stato fissato analizzando gli spettri di Fourier, in modo tale da ottenere tre accelerogrammi con caratteristiche abbastanza diverse tra loro, e precisamente: uno con massima ampiezza spettrale e valori di ampiezza elevati per gran parte del campo di frequenze presenti, gli altri due con ampiezze spettrali elevate rispettivamente in campi di frequenza bassi (fino a circa 12Hz) e alti (maggiori di 12Hz).

Gli accelerogrammi reali scelti per l'analisi della RSL, identificati mediante le sigle M500013NS, M500013EW, M500009EW, e i corrispondenti spettri di Fourier sono riportati rispettivamente nelle Figure 5.12 e 5.13.

Gli accelerogrammi sintetici, contraddistinti dalle sigle IG1EW, IG2NS, IG2EW, IG5NS, IG5EW, sono stati generati nell'ambito del presente studio attraverso un modello di sorgente messo a punto da Priolo et al. (Cap. 7). Essi rappresentano i moti sismici ottenuti su bedrock affiorante per 5 possibili meccanismi di rottura di faglia per il terremoto di Senigallia del 1930 ($M = 5.9$). Di questi, tutti con contenuti in frequenza molto simili tra loro, sono stati selezionati quelli con picco di accelerazione massima più prossimo a quello atteso per il sito. L'andamento degli accelerogrammi sintetici scelti è riportato nella Figura 5.12; nella Figura 5.13 sono mostrati i relativi spettri di Fourier.

Tutti gli accelerogrammi utilizzati nelle analisi sono stati scalati al valore di 0.2g, che corrisponde al valore di PGA atteso a Senigallia su roccia affiorante con un periodo di ritorno di 475 anni, in accordo con la classificazione sismica del territorio nazionale fissata dall'Ordinanza della Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274, sulla base della mappa prodotta nel 1998 dal Gruppo di Lavoro istituito dal Servizio Sismico Nazionale su indicazione della Commissione Grandi Rischi del Dipartimento della Protezione Civile.

Le principali caratteristiche degli otto accelerogrammi assunti come input per le analisi della risposta sismica locale sono riportate nella Tabella 5.5. Come si può osservare, i valori del fattore di scala applicato per ottenere un valore di PGA pari a 0.2g sono modesti e variano tra 0.71 e 1.67 per gli accelerogrammi sintetici e tra 0.87 e 1.82 per gli eventi reali; i valori dell'intensità di Arias, I_a , sono compresi in un ampio intervallo (da 3 a 30 cm/s); il periodo fondamentale è alto (intorno a 2.5s) per gli accelerogrammi sintetici e basso (intorno a 0.1s) per le registrazioni reali; i tempi di durata sono tutti piuttosto brevi, in accordo con le caratteristiche di sismicità della zona.

5.2.2 Posizione del bedrock e definizione dei profili di V_s

Come già evidenziato nel paragrafo 5.1.3, durante l'esecuzione delle prove Down Hole e Cross Hole in tutte le verticali indagate non è mai stato incontrato il bedrock sismico (ovvero uno strato con velocità di propagazione delle onde di taglio, $V_s > 800\text{m/s}$) e i valori maggiori di V_s sono stati misurati in corrispondenza del sondaggio S2, nella formazione marnosa costituente il substrato geologico, il cui tetto è stato rilevato ad una profondità di circa 19m dal p.c. (Figura 5.2b).

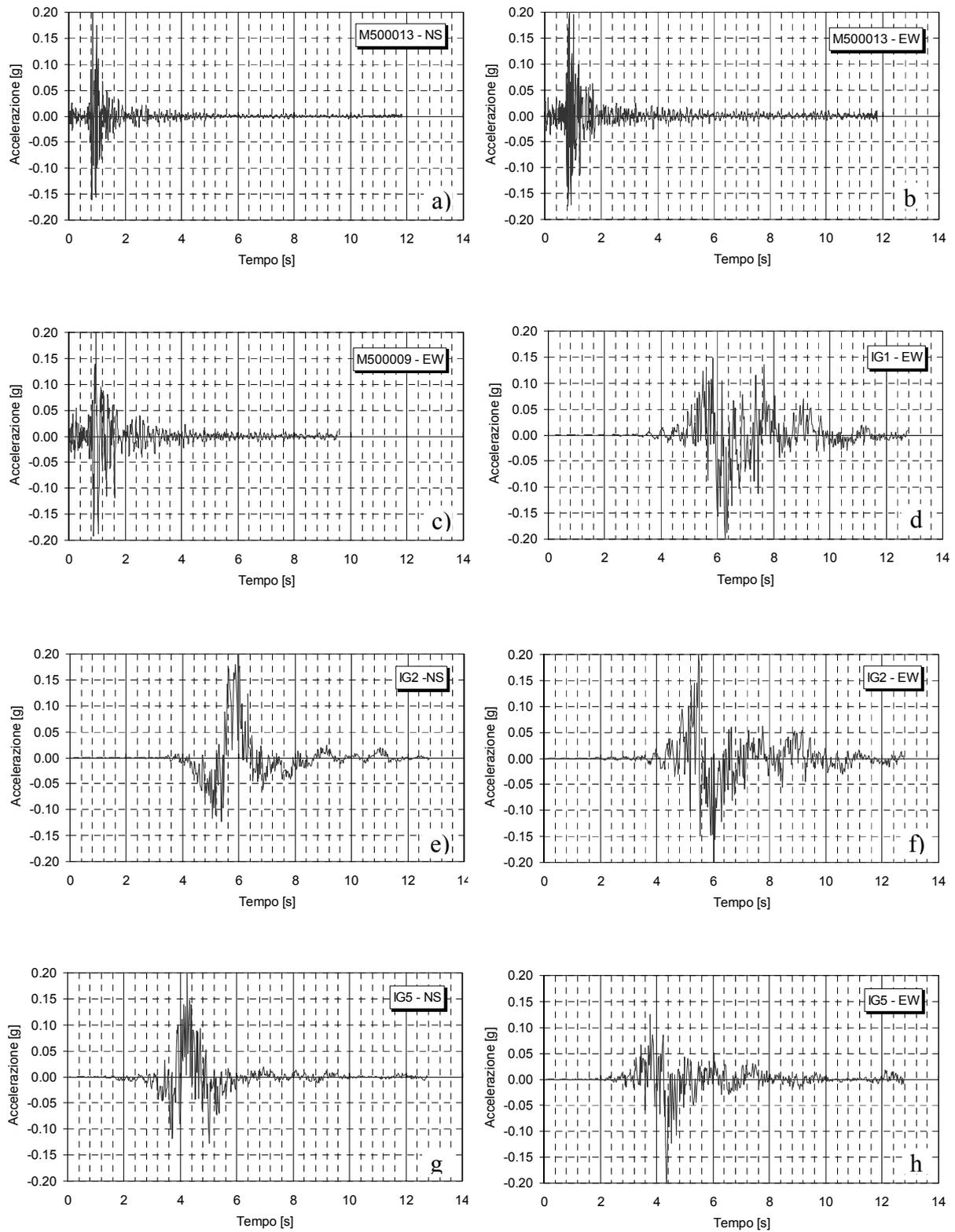


Figura 5.12 - Accelerogrammi reali (a, b, c) e sintetici (d, e, f, g, h) impiegati nelle analisi della RSL.

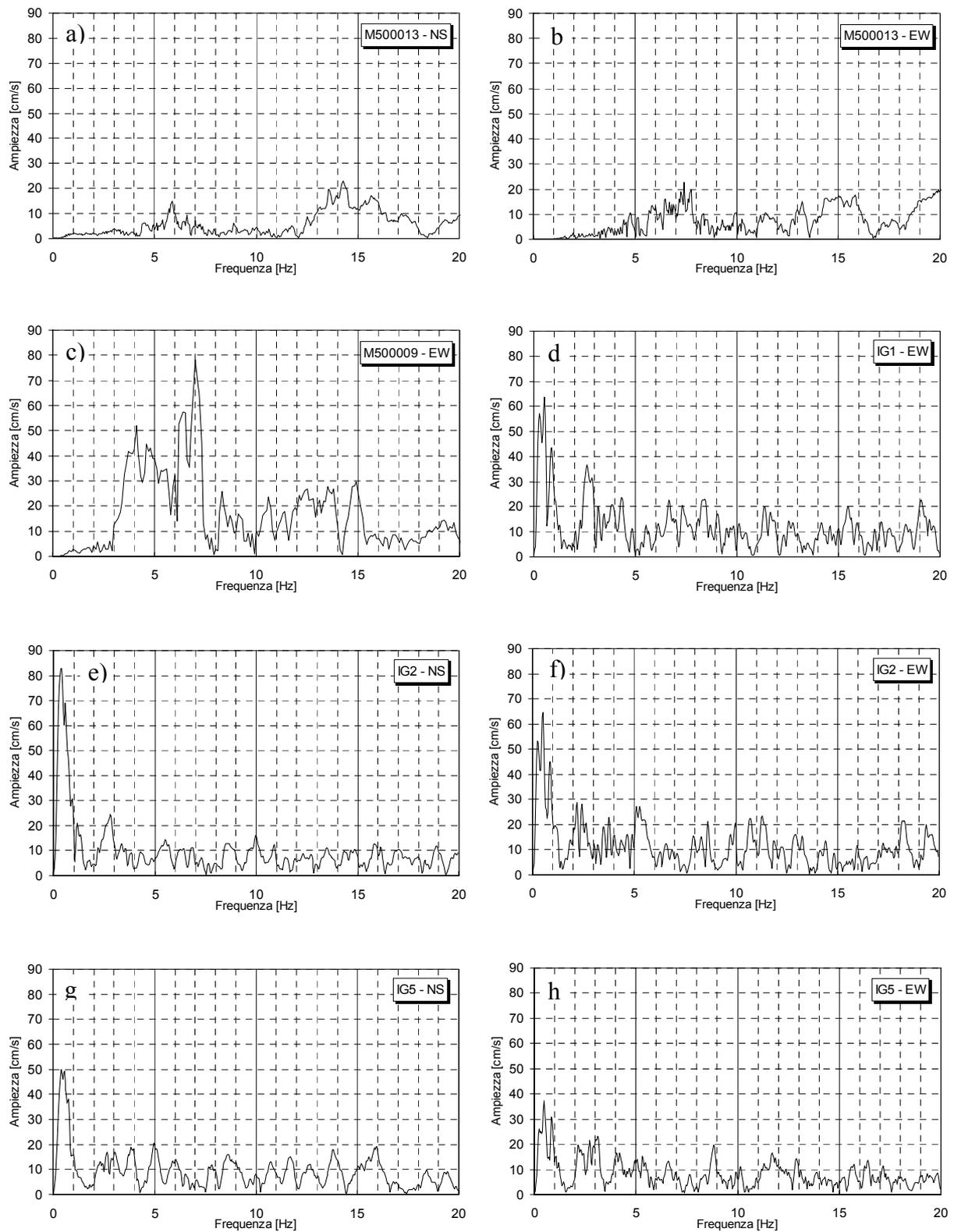


Figura 5.13 - Spettri di Fourier degli Accelerogrammi reali (a, b, c) e sintetici (d, e, f, g, h) impiegati nelle analisi della RSL.

Tabella 5.5 - Principali caratteristiche degli otto accelerogrammi selezionati per le analisi della risposta sismica locale (successivamente scalati al valore PGA = 0.2g).

	PGA [g]	Ia [cm/s]	Td [s]	Durata [s]	Dur. Trifunac [s]
IG1EW	0.12	9.40	1.97	12.78	3.65
IG2EW	0.12	7.92	1.97	12.78	4.05
IG2NS	0.16	15.27	2.56	12.78	2.38
IG5EW	0.18	9.08	2.13	12.78	3.50
IG5NS	0.28	29.40	2.56	12.78	1.75
M500009EW	0.23	12.46	0.14	9.53	1.84
M500013EW	0.11	2.39	0.13	11.81	3.10
M500013NS	0.22	11.16	0.07	11.81	1.49

Nello stesso sondaggio S2, al di sotto di tale profondità, per uno spessore di circa 13m, è stata riscontrata la presenza di uno strato di materiale alterato caratterizzato da valori di V_s mediamente intorno a 400m/s per i primi 7m di spessore, progressivamente crescenti nei successivi 6m, fino a raggiungere il valore di 600m/s misurato per i successivi 2m di profondità, ovvero fino al fondo del foro di sondaggio. Tale valore di V_s (o di poco superiore) è stato confermato anche dai risultati di una prova Down Hole eseguita in tempi successivi in un foro a distruzione spinto fino alla profondità di 60m (v. DVD allegato)².

In base a quanto osservato nel sondaggio S2, si è stabilito di attribuire il valore $V_s=600\text{m/s}$ alla velocità di propagazione delle onde di taglio all'interno del substrato marnoso intatto (anche in accordo con quanto ipotizzato nel Cap. 7 per il modello di sorgente) e di assumere questo strato come bedrock sismico nei modelli di analisi della risposta sismica locale. Poiché in nessuno degli altri sondaggi è stato misurato un analogo valore di V_s nel substrato marnoso, che in tutti i casi è stato raggiunto e attraversato per alcuni metri, è stato necessario stabilire dei criteri univoci per la definizione del bedrock in corrispondenza delle altre verticali analizzate. In particolare, la ricostruzione stratigrafica e le misure di V_s effettuate hanno evidenziato la presenza di tre differenti situazioni possibili (Figure 5.2a, 5.2b, 5.2c, 5.2d, 5.2e, 5.2f, 5.2g, 5.2h), così riassumibili:

- tutto lo spessore indagato dello strato marnoso alterato è caratterizzato da valori della velocità delle onde S piuttosto bassi (mediamente pari a 350m/s);
- già a partire dal tetto dello strato marnoso e fino a fondo foro si osservano valori di V_s maggiori di 450m/s;
- lo strato marnoso alterato è caratterizzato da valori di V_s più bassi in prossimità del tetto e crescenti con la profondità fino a fondo foro.

In relazione alle condizioni presenti in ciascuna verticale, per stabilire la posizione del bedrock, ai fini della modellazione, sono stati adottati i seguenti criteri:

² È da osservare che le marcate riduzioni locali nei valori di V_s misurati negli ultimi 10-12m di profondità appaiono poco realistiche

- nei casi a) e c) la profondità del bedrock è stata assunta pari a 12m dal tetto del substrato marnoso;
- nel caso b) la profondità del bedrock è stata ipotizzata coincidente con il fondo foro e comunque distante non meno di 6m dal tetto delle marne.

Nella Tabella 5.6 è indicata la posizione del bedrock assunta nella modellazione delle singole verticali in accordo con i criteri sopra descritti.

Tabella 5.6 - Profondità del bedrock assunta nelle analisi della risposta sismica locale in corrispondenza delle 11 verticali esaminate.

	S1	S2	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Profondità del bedrock [m]	33	32	29	23	37	38	36	35	25	25	24

Per quanto riguarda la definizione dei valori di V_S in corrispondenza delle verticali analizzate, sono stati assegnati, se disponibili, i profili di V_S misurati sperimentalmente dal piano campagna fino alla profondità del tetto delle marne. Laddove sono state effettuate dal DIC le misure di controllo, sono stati adoperati tali valori. Nei tre sondaggi S4, S5 e S8 dove non sono state eseguite prove dinamiche in foro, i valori di V_S sono stati assegnati sulla base della descrizione stratigrafica e dei valori di V_S misurati sugli stessi litotipi in corrispondenza degli altri sondaggi. Al di sotto del tetto delle marne, nello strato di alterazione, con riferimento ai tre possibili casi precedentemente descritti, l'andamento di V_S è stato definito in accordo con i seguenti criteri:

- nel caso a) si è assunto, a partire dal tetto del substrato marnoso e per i primi 6m, o comunque fino a fondo foro, un valore di V_S pari alla media dei valori misurati; per profondità superiori, fino a 12m dal tetto del substrato marnoso, dove è stata ipotizzata la presenza di materiale intatto, corrispondente al bedrock, si è assunto un valore di V_S progressivamente crescente (con un incremento medio non superiore a circa 100m/s ogni 3 metri di profondità);
- nel caso b) si è assunto un valore di V_S pari alla media dei valori sperimentali, a partire dal tetto delle marne e per uno spessore minimo di 6m, o comunque fino a fondo foro, dove è stata ipotizzata la presenza di materiale intatto, corrispondente al bedrock;
- nel caso c) si è assunto un valore di V_S pari alla media dei valori misurati, a partire dal tetto delle marne e per tutto lo spessore indagato; per profondità superiori, fino a 12m dal tetto del substrato marnoso, dove è stata ipotizzata la presenza di materiale intatto (bedrock), si è assunto un valore di V_S progressivamente crescente (con un incremento medio non superiore a circa 100m/s ogni 3 metri di profondità).

Al bedrock, in tutte le verticali analizzate, è stato assegnato un valore di V_S pari a 600m/s.

Ai fini di accertare l'influenza della posizione del bedrock sismico sulla risposta in superficie, per alcune verticali, caratterizzate da valori modesti di V_S (<500m/s) per tutta la profondità esplorata, è stata effettuata anche un'analisi della RSL localizzando, sulla base di considerazioni geologiche, il

bedrock sismico a 150m di profondità, e ipotizzando una velocità delle onde di taglio lungo la verticale progressivamente crescente dal valore misurato in prossimità del fondo foro fino ai 600m/s attribuiti al bedrock. In particolare, sono state escluse da tali analisi la verticale S2, caratterizzata da una velocità delle onde di taglio pari a 600 m/s o superiori già a partire dai 30m di profondità e per la quale dunque le ipotesi suddette risultavano in palese contrasto con le evidenze sperimentali, e le verticali S11 e S12, per le quali, essendo i valori di V_S a fondo foro pari a circa 500m/s e quindi alquanto modesto il valore del gradiente nel caso di un ipotetico bedrock a 150m di profondità, con $V_S=600\text{m/s}$, le suddette analisi non sono state ritenute particolarmente significative.

A titolo di esempio, nella Figura 5.14 sono riportati, per la verticale corrispondente al sondaggio S6, gli andamenti di V_S misurati con la prova Down Hole e quelli assunti nella modellazione, nell'ipotesi di bedrock superficiale (Figura 5.14a) e profondo (Figura 5.14b).

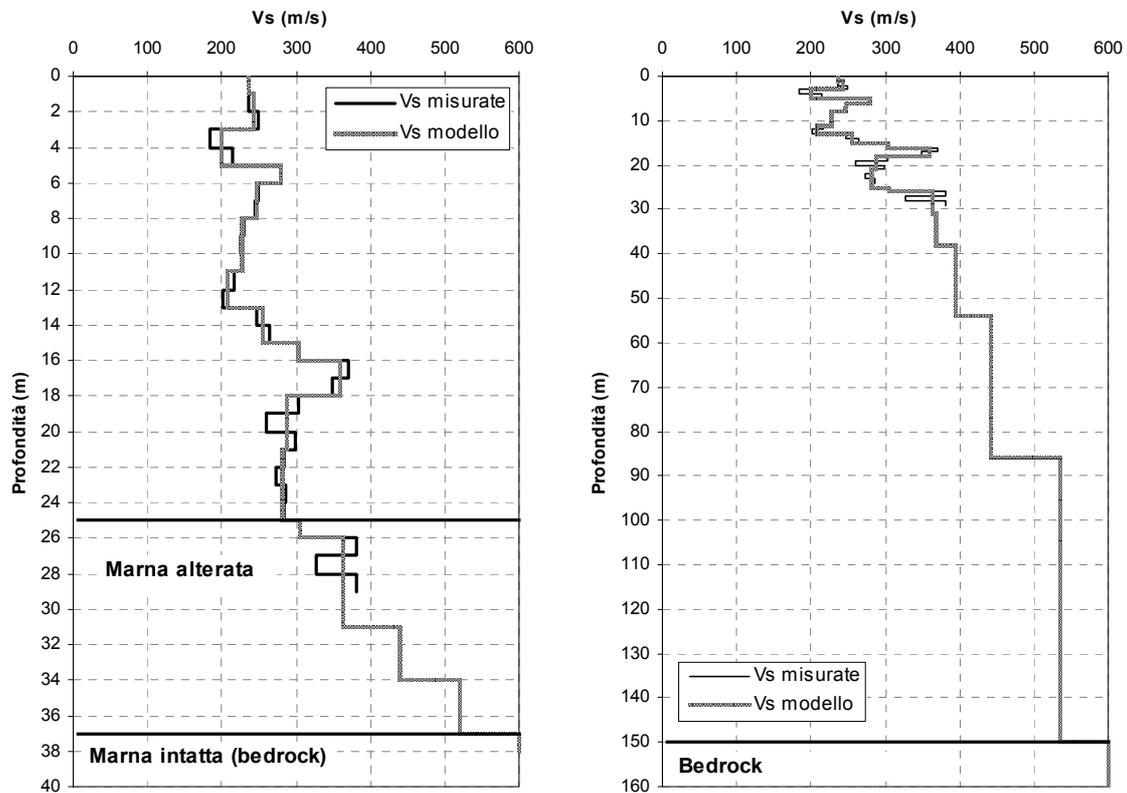


Figura 5.14 - Andamenti di V_S da prova Down Hole e assunti nella modellazione in corrispondenza del sondaggio S6, nell'ipotesi di bedrock superficiale (a) e profondo (b).

5.2.3 Curve $G(\gamma)/G_0$ e $D(\gamma)$

Per i terreni a grana fine e per il substrato marnoso sono state utilizzate le curve sperimentali ottenute nel Laboratorio Geotecnico dell'Università di Firenze (Figure 5.7 e 5.10 rispettivamente)

Per le sabbie si è fatto riferimento alle curve proposte da Vucetic e Dobry (1991) (Figura 5.15), relative a materiali con indice di plasticità uguale a zero.

Per gli strati ghiaiosi si è fatto riferimento alle seguenti relazioni di Rollins (1998):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{\left[1 + 20\gamma(1 + 10^{-10\gamma})\right]}$$

$$D = 0.8 + 18(1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75}$$

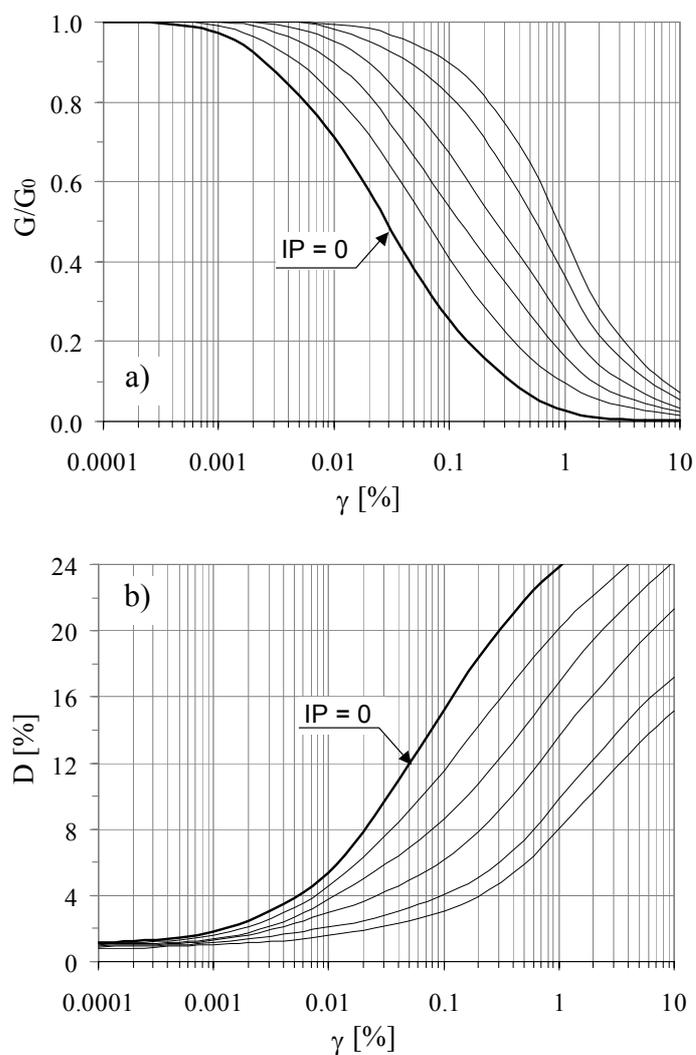


Figura 5.15 - Curve di $G(\gamma)/G_0$ (a) e $D(\gamma)$ (b) proposte da Vucetic e Dobry (1993).

5.2.4 Risultati della modellazione

Per raggiungere gli obiettivi specificati nel paragrafo 5.2 sono state eseguite analisi di RSL in diverse condizioni e sotto diverse ipotesi. I risultati più significativi ai fini della previsione del moto sismico in superficie in corrispondenza dei diversi siti analizzati e, più in generale, della microzonazione sismica di Senigallia, sono riportati nel seguito in termini di spettri di risposta in accelerazione e di fattore di amplificazione, F_a , già definito nel paragrafo 5.2.

Assumendo come moto sismico di input su roccia affiorante gli 8 accelerogrammi descritti nel par. 5.2.1., sono stati ottenuti, per le 11 verticali esplorate, gli spettri elastici riportati nelle Figure da 5.16 a 5.26. A tali spettri sono stati sovrapposti gli spettri medi e gli spettri di risposta elastici indicati nell'Eurocodice 8 (Tipo 1 e Tipo 2) per le corrispondenti classi di terreno, identificate in accordo con i criteri definiti nello stesso Eurocodice 8.

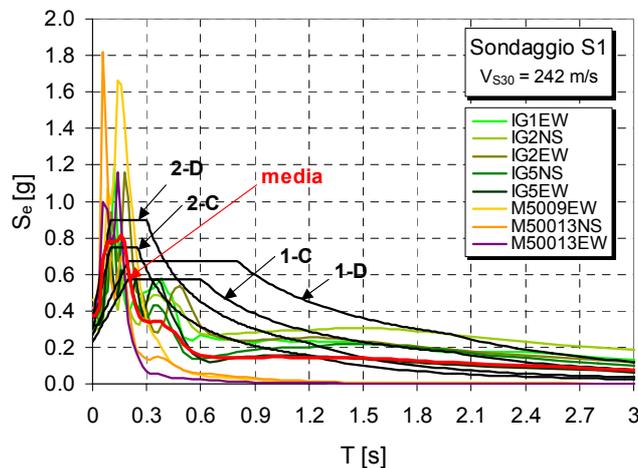


Figura 5.16 - Verticale S1: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

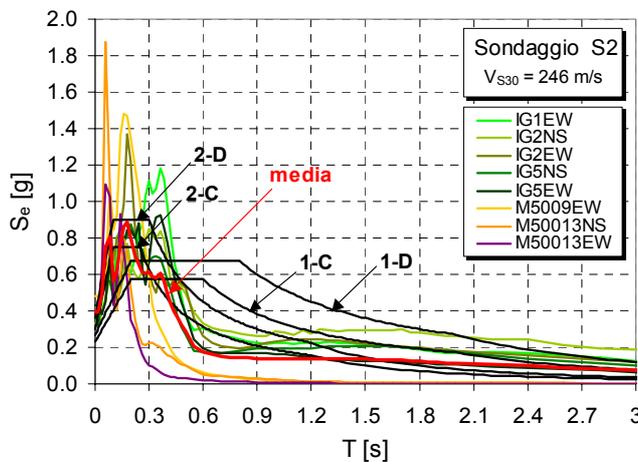


Figura 5.17 - Verticale S2: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

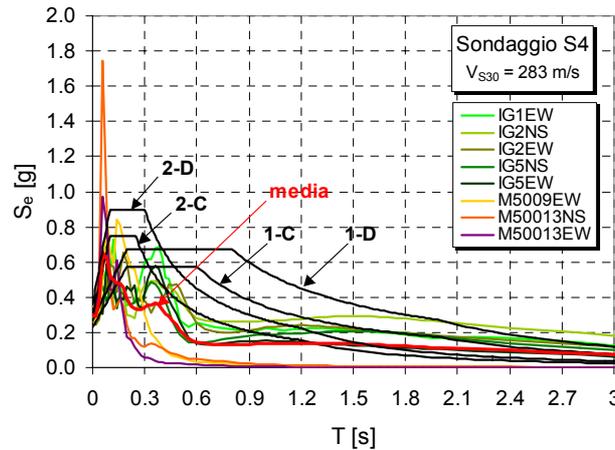


Figura 5.18 - Verticale S4: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

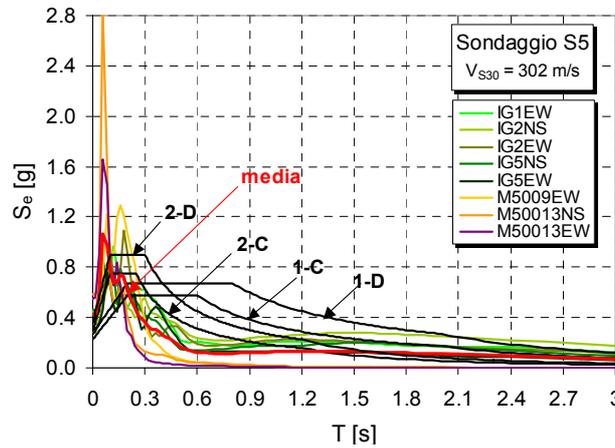


Figura 5.19 - Verticale S5: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

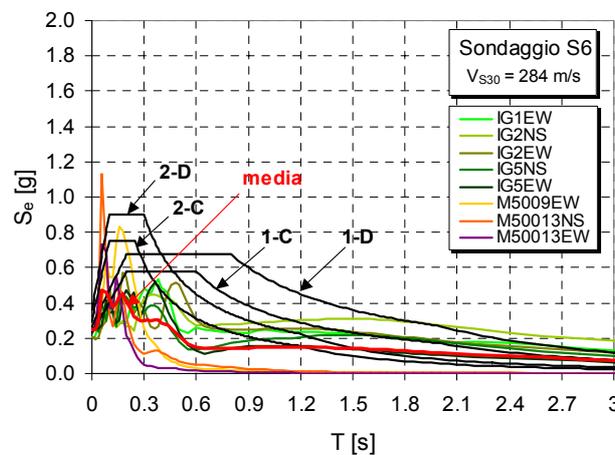


Figura 5.20 - Verticale S6: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

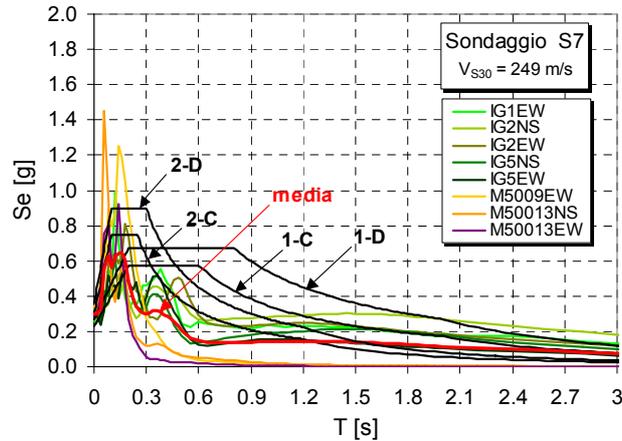


Figura 5.21 - Verticale S7: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

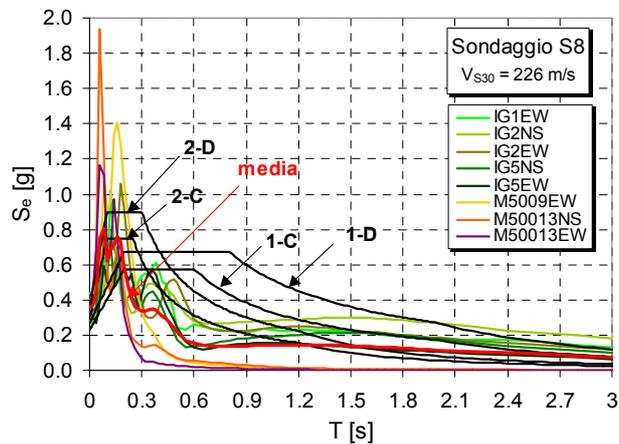


Figura 5.22 - Verticale S8: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

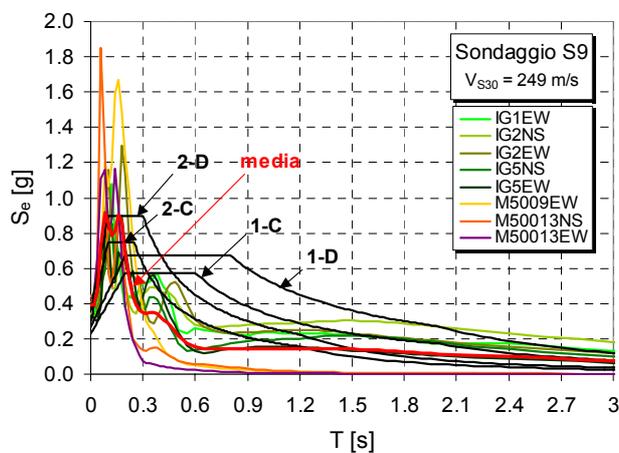


Figura 5.23 - Verticale S9: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

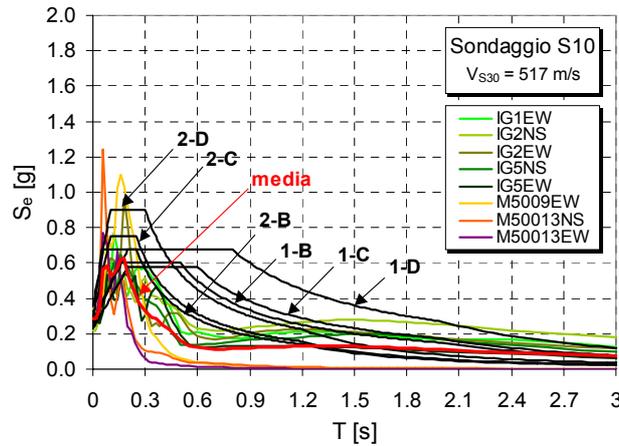


Figura 5.24 - Verticale S10: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

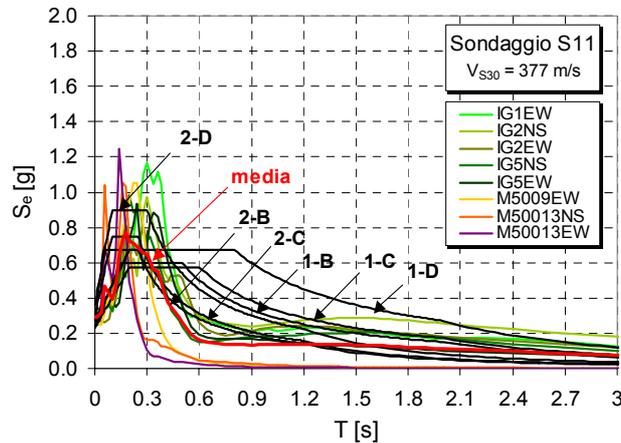


Figura 5.25 - Verticale S11: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

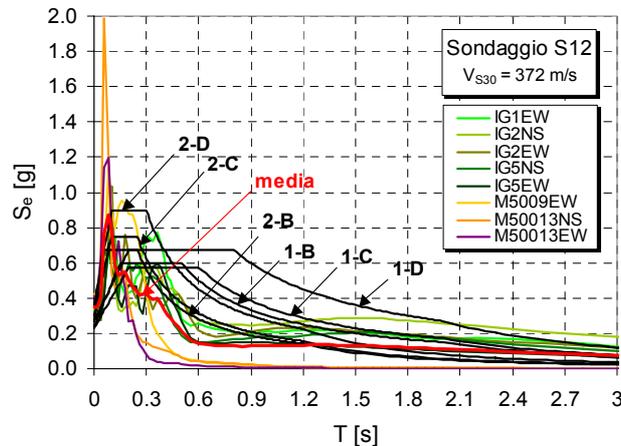


Figura 5.26 - Verticale S12: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio; confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

Data la generale scarsa corrispondenza tra gli spettri del sito e quelli proposti dall'Eurocodice 8, e la non convincente procedura di assegnazione della categoria di suolo sulla base delle velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri (V_{S30}) indicata nell'EC8, agli spettri elastici ottenuti dalle analisi della risposta sismica locale per gli 11 profili esaminati sono stati adattati anche gli spettri proposti dall'EC8 per categorie di sottosuolo meno favorevoli a quelle in cui il sito ricade (Figure da 5.16 a 5.26).

Non essendo stato evidenziato dalle prove in sito un vero e proprio bedrock, in corrispondenza di alcune verticali e per stessi gli otto accelerogrammi di input sono state effettuate anche analisi della risposta sismica locale ipotizzando una condizione estrema, seppure non particolarmente plausibile, con collocazione del bedrock a 150m di profondità. Nella Figura 5.27 sono mostrati i risultati ottenuti in termini di spettri di risposta elastici in corrispondenza del profilo S6.

Per ciascuna verticale e per tutti gli input sismici analizzati, nell'ipotesi di bedrock superficiale e profondo, è stato infine valutato il fattore di amplificazione, F_a (Figure 5.28 e 5.29).

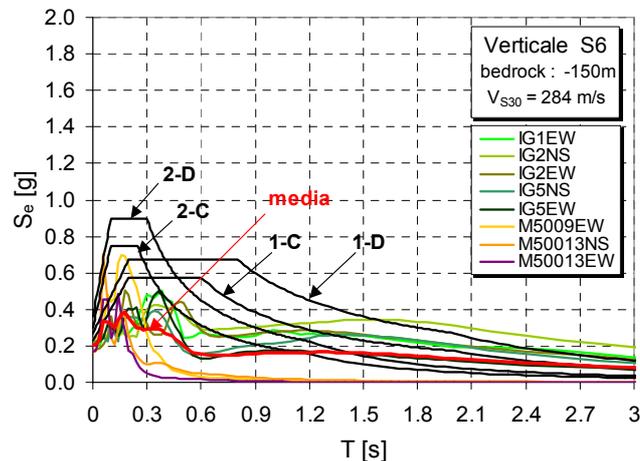


Figura 5.27 - Verticale S6: spettri di risposta elastici (al 5% dello smorzamento critico) relativi agli 8 accelerogrammi di input e spettro medio nell'ipotesi di bedrock profondo (-150m da p.c.); confronto con gli spettri proposti dall'EC8 per diverse classi di sottosuolo.

I risultati ottenuti si possono così commentare.

- a) *Moto di input* – Dal confronto tra gli spettri ottenuti per i cinque accelerogrammi sintetici e per i tre moti sismici reali (Figure da 5.16 a 5.26), risulta che le risposte ai moti sintetici sono caratterizzate, nei bassi periodi ($T=0.1\div 0.4s$), da valori di accelerazione generalmente più bassi di quelli che si ottengono assumendo come input gli accelerogrammi reali, e che viceversa, per periodi più alti, i valori dell'accelerazione sono molto più elevati di quelli relativi ai terremoti reali. Questo risultato si spiega osservando che gli accelerogrammi sintetici si riferiscono a 5 possibili situazioni di rottura di faglia di un terremoto di scenario in corrispondenza del sito di Senigallia avente magnitudo pari a $M=5.9$. Rappresentano perciò i moti sismici corrispondenti ad un terremoto massimo credibile, mentre gli accelerogrammi reali si riferiscono ad eventi di magnitudo minore ($M=5.1$ e $M=5.4$), con epicentro localizzato a circa 27 km dalla stazione di registrazione. Comunque, potendo ritenere che in un raggio di circa 40km dall'epicentro non

avvengano modificazioni significative nel periodo fondamentale del moto sismico (Seed et al., 1969), anche i moti sismici rappresentati dai tre accelerogrammi reali impiegati nelle analisi rientrano tra quelli possibili a Senigallia.

- b) *Conformità agli spettri dell'Eurocodice 8* – Come si può osservare nelle Figure da 5.16 a 5.26 gli spettri dell'EC8 tendono a sottostimare i picchi di amplificazione ai bassi periodi ($T= 0.1-0.4s$). Per valori alti del periodo tendono, invece, a sovrastimare le azioni sismiche indotte dai terremoti reali e sottostimare leggermente le risposte ai terremoti sintetici. Data la scarsa rispondenza degli spettri di Tipo 1 dell'EC8 agli spettri ottenuti per il sito, si è inteso verificare se tale discordanza non fosse da attribuire alle modalità di classificazione del terreno in esame alle diverse categorie di sottosuolo previste dall'EC8 sulla base di V_{S30} . In effetti, la velocità dei primi strati di terreno ha un forte peso sulla RSL e laddove i primi strati hanno caratteristiche molto scadenti, adottando il criterio di assegnazione basato sul valore di V_S nei primi 30m si possono sottostimare gli effetti amplificativi. Nelle Figure da 5.16 a 5.26 si osserva infatti che agli spettri ottenuti nel sito si adattano meglio gli spettri suggeriti per categorie di sottosuolo meno favorevoli a quelle in cui il sito ricade. Come si può notare in molti casi gli spettri suggeriti dall'EC8 per la categoria di suolo D sembrano adattarsi meglio agli spettri del sito rispetto a quelli suggeriti per la categoria C o B. In generale, inoltre, si può notare che gli spettri di Tipo 2 si conformano meglio agli spettri del sito rispetto a quelli di Tipo 1.
- c) *Posizione del bedrock* – Oltre alle analisi effettuate localizzando il bedrock sismico alle profondità riportate nella Tabella 5.6, determinate in accordo con criteri esposti nel paragrafo 5.2, sulla base di considerazioni di tipo geologico e sismologico (non convalidate tuttavia da riscontri sperimentali) sono state condotte, in corrispondenza di alcune verticali, ulteriori analisi di RSL assumendo che il bedrock sismico si trovi a una profondità di 150m dal piano campagna e che i valori di V_S aumentino regolarmente con la profondità fino a raggiungere il valore di 600m/s a -150m. I risultati ottenuti per la verticale S6, riportati a titolo di esempio nella Figura 5.27, mostrano che le differenze negli spettri di risposta, rispetto al caso di bedrock più superficiale (come ragionevolmente assunto sulla base dell'andamento di V_S), riguardano essenzialmente l'entità di alcuni picchi di accelerazione per periodi molto bassi ($T < 0.15s$), e che invece, per $T > 0.1s$, non si modificano praticamente né il valore medio delle ordinate spettrali, né l'ampiezza del pianerottolo. Risultati analoghi sono stati ricavati in tutte le verticali analizzate.
- d) *Fattore di amplificazione* - Per valutare la risposta dei vari siti in termini sintetici, per ogni verticale esplorata e per gli otto input utilizzati è stato calcolato il rapporto di intensità spettrale, F_a (paragrafo 5.2). I risultati ottenuti nel caso di bedrock più superficiale sono riportati nella Figura 5.28, nella quale, in ascissa, le verticali sono ordinate in base al valore medio di F_a , decrescente. Tale valore è compreso tra 1.66 in corrispondenza della verticale S2 e 1.25 in corrispondenza della S10. Come si può osservare, il fattore di amplificazione è strettamente dipendente dagli accelerogrammi di input e in ciascuna verticale i valori più alti corrispondono ai tre terremoti reali mentre con quelli sintetici tale rapporto non supera il valore di 1.3. I risultati in termini di rapporto di intensità spettrale, F_a , relativi alla condizione limite in cui il bedrock è stato assunto alla profondità di 150m di dal piano campagna sono mostrati nella Figura

5.29, dove le verticali esaminate, riportate in ascissa, sono ordinate in base al valore medio di F_a , decrescente. In questo caso, i valori medi di F_a variano tra 1.60 in corrispondenza della verticale S9 e 1.19 in corrispondenza della S10.

Il confronto tra le Figure 5.28 e 5.29 evidenzia che nel caso di bedrock sismico profondo il fattore di amplificazione è molto meno dipendente dagli accelerogrammi di input rispetto al caso di bedrock superficiale e che in entrambi i casi i valori maggiori di F_a corrispondono ai tre eventi reali.

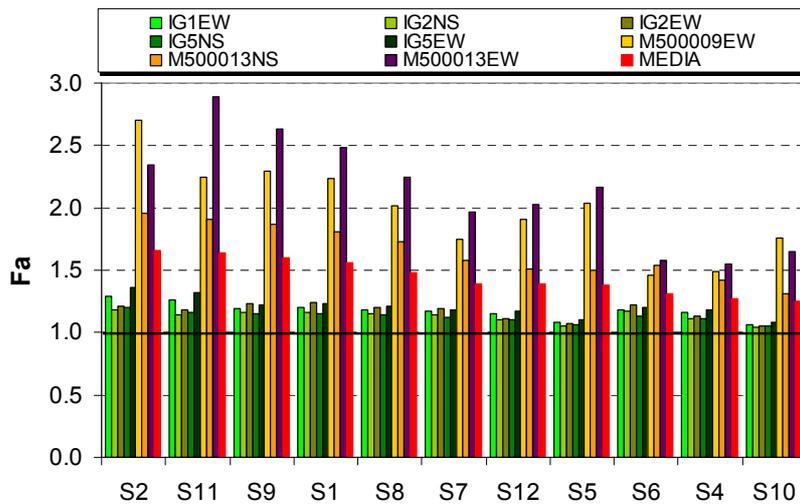


Figura 5.28 - Rapporto di intensità spettrale per le 11 verticali esaminate, nell'ipotesi di bedrock superficiale.

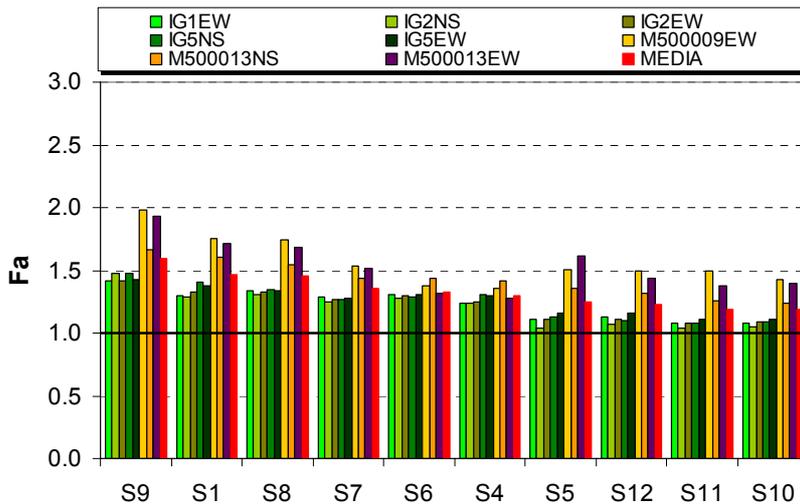


Figura 5.29 - Rapporto di intensità spettrale per le 11 verticali esaminate, nell'ipotesi di bedrock profondo.

5.3 Conclusioni

I principali risultati relativi agli aspetti geotecnici dello studio finalizzato alla microzonazione sismica di Senigallia, comprendenti la caratterizzazione dei terreni da prove dinamiche in sito e in laboratorio effettuate in corrispondenza di 11 verticali nell'ambito di una specifica campagna di indagini geotecniche condotta nel 2005 e le analisi della risposta sismica locale condotte mediante l'applicazione di modelli numerici, si possono così riassumere:

- a) Per quanto riguarda le prove dinamiche in sito e in laboratorio:
 - esiste un buon accordo tra i risultati delle prove Down Hole effettuate in sito con procedure di prova differenti;
 - i valori di V_s stimati a partire dai valori di G_0 ottenuti in laboratorio sono molto prossimi a quelli misurati in sito;
 - i depositi alluvionali (che costituiscono una delle formazioni più diffuse nell'area) hanno proprietà dinamiche molto disperse;
 - esistono delle incertezze sulla profondità del substrato sismico che non possono essere eliminate se non con indagini mirate e spinte a notevole profondità.
- b) Per quanto riguarda le analisi di risposta sismica locale:
 - gli spettri di Tipo 1 proposti dall'Eurocodice 8 per le corrispondenti categorie di sottosuolo valutate sulla base del parametro V_{S30} tendono in genere a sottostimare le risposte del sito per bassi periodi ($T=0.1-0.4s$) e a sovrastimarle per periodi superiori a $0.4s$, soprattutto con riferimento ai terremoti reali; nel complesso, gli spettri di Tipo 2 dell'EC8 si adattano meglio degli spettri di Tipo 1 agli spettri ottenuti per il sito, specie per periodi superiori a $0.4s$;
 - nella maggior parte dei casi gli spettri dell'EC8 per la classe D si adattano meglio agli spettri ottenuti per il sito di quelli della classe attribuita in base ai criteri indicati nell'EC8 per la classificazione del sottosuolo.

Bibliografia

D.M. LL.PP. 14/09/2005. Norme tecniche per le costruzioni. Suppl. Ord. n. 159 della G.U. n. 222 del 23.09.2005

OPCM n. 3274 (20/3/03). Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n.105 dell'8/5/03

(pr)EN 1998-1 (2003). General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium

Vucetic, M. e Dobry, R. (1991). Effects of the soil plasticity on cyclic response. Journal of the Geotech. Engineering Division, ASCE, 117 (1)

Rollins, K. M. , Evans, M. D., Dihel, N. B. e Daily III, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. Journal of Geotech. And Geoenv. Engineering, ASCE, 124 (5)

Schnabel, P. B., Lysmer, J. e Seed, H. B. (1972). A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, California

Seed, H.B., Idriss, I.M., Kiefer, F.W. (1969). Characteristics of rock motions during earthquakes. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 95 (SM5)

Simbologia adottata

C_c : indice di compressione

C_s : indice di rigonfiamento

D_0 : rapporto di smorzamento iniziale

D : rapporto di smorzamento

D_{max} : rapporto di smorzamento massimo

e : indice dei vuoti

e_0 : indice dei vuoti iniziale

G : modulo di taglio

G_0 : modulo di taglio iniziale

K_0 : coefficiente di spinta a riposo

I_c : indice di consistenza

I_p : indice di plasticità

OCR: grado di sovraconsolidazione

P.P.: Pocket penetrometer

S_r : grado di saturazione

w : contenuto naturale d'acqua

w_L : limite di liquidità

w_p : limite di plasticità

z : profondità media di prelievo del campione

z_w : profondità della falda

γ : peso dell'unità di volume totale

γ : ampiezza della deformazione di taglio

γ_s : peso specifico dei grani

γ_v : deformazione di taglio volumetrica

σ'_c : tensione efficace di consolidazione

σ'_{v0} : tensione verticale efficace in sito

σ'_p : pressione di consolidazione in sito

σ'_0 : pressione efficace di confinamento in sito

ρ : densità