



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

Sezione Geotecnica  
Via di S. Marta, 3 - I 50139 FIRENZE

CONVENZIONE TRA LA REGIONE DELL' UMBRIA E IL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE PER L'ESECUZIONE DI UNO "STUDIO GEOTECNICO FINALIZZATO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI NELL'AMBITO DEL PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA ZONAZIONE TERRITORIALE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE – AREA CAMPIONE ALTA VAL TIBERINA UMBRA"

**STUDIO GEOTECNICO  
FINALIZZATO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI  
IN UN' AREA CAMPIONE DELL'ALTA VAL TIBERINA UMBRA**

**RELAZIONE FINALE**

**Responsabile:** Prof. T. Crespellani

**Collaboratori:**

Ing. C. Madiati

Ing. G. Simoni

Maggio 2001

# INDICE

## **1. INTRODUZIONE**

## **2. Simbologia adottata**

## **3. Localizzazione delle verticali esplorate e passaggi stratigrafici**

### **4. Alluvioni Recenti**

- 4.1. Proprietà meccaniche da prove statiche
- 4.2. Proprietà meccaniche da prove dinamiche
- 4.3. Sintesi delle proprietà geotecniche

### **5. Alluvioni Terrazzate**

- 5.1. Proprietà meccaniche da prove statiche
- 5.2. Proprietà meccaniche da prove dinamiche
- 5.3. Sintesi delle proprietà geotecniche

### **6. Sintema di Fighille**

- 6.1. Proprietà meccaniche da prove statiche
- 6.2. Proprietà meccaniche da prove dinamiche
- 6.3. Sintesi delle proprietà geotecniche

### **7. Subsintema di Selci Lama**

- 7.1. Proprietà meccaniche da prove statiche
- 7.2. Proprietà meccaniche da prove dinamiche
- 7.3. Sintesi delle proprietà geotecniche

### **8. Subsintemi di: Nuvole, M. Rotondo, Mercatale e Molin dell'Olio**

- 8.1. Proprietà Meccaniche da prove Statiche
- 8.2. Proprietà Meccaniche da prove Dinamiche

### **9. Prove penetrometriche statiche**

### **10. Analisi dei risultati ottenuti**

### **11. Conclusioni**

### **12. Riferimenti bibliografici**

## 1. Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati di sintesi dello “Studio geotecnico finalizzato alla valutazione degli effetti locali nell’ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione territoriale della pericolosità sismica locale – area campione alta Val Tiberina Umbra”, condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Firenze (DIC), e oggetto della Convenzione stipulata il 23 Dicembre 1999 tra la Regione dell’Umbria e il DIC.

Le attività che il DIC ha svolto per l’adempimento di tale incarico sono state effettuate secondo il programma fissato nella riunione di insediamento del Gruppo di Coordinamento tenutasi il 2 Giugno 2000 a Perugia presso la sala Situazioni della Protezione Civile, e via via concordato e specificato secondo le ulteriori richieste avanzate dall’Amministrazione nel corso della campagna di indagine. In particolare, le attività che il DIC ha svolto sono consistite in:

- a) attività di sperimentazione in laboratorio per la caratterizzazione dei terreni in campo statico e dinamico su campioni prelevati nel corso dei sondaggi secondo il programma concordato con il Direttore dei Lavori;
- b) ricerche rivolte all’analisi e al trattamento sotto il profilo geotecnico e statistico dei dati acquisiti con sperimentazione diretta da parte del DIC e dei risultati di prove statiche e dinamiche effettuate da altri laboratori o esistenti, sempre secondo il programma concordato con la Direzione Lavori.

Risultati dettagliati dello studio condotto relativamente all’area di Città di Castello sono contenuti nel Rapporto Intermedio datato Giugno 2000; altri risultati parziali sono stati consegnati all’Amministrazione Regionale durante lo svolgimento delle prove geotecniche in sito e in laboratorio. In particolare sono stati forniti dati integrativi il: 26/09/’00, 02/10/’00, 06/10/’00, 19/10/’00, 02/11/’00, 28/11/’00, 07/02/’01 ed il 22/03/’01.

Nella presente relazione finale si riportano in forma sintetica tutti i risultati dello studio condotto. Per la presentazione dei risultati è stata studiata una modalità tale da consentire una visione di insieme delle proprietà dei materiali che sono stati oggetto della campagna geotecnica e, soprattutto, da rendere possibile e agevole l’estensione delle informazioni acquisite alla caratterizzazione indiretta delle proprietà dinamiche delle formazioni, incontrate durante le presenti indagini, e largamente diffuse nella Val Tiberina.

A tal fine sono state considerate separatamente le seguenti formazioni:

a) *Depositi continentali quaternari*

- Alluvioni recenti
- Alluvioni terrazzate

*b) Unità pleistoceniche*

- Sintema di Fighille
- Subsintema di Selci-Lama
- Subsintema di Nuvole
- Subsintema di Monte Rotondo
- Subsintema di Mercatale
- Subsintema di Molin dell'Olio

Date le scarse informazioni disponibili e anche la loro minore diffusione nel territorio, le caratteristiche delle unità appartenenti ai Subsintemi di Nuvole, di Monte Rotondo, di Mercatale e di Molin dell'Olio sono state nel seguito raggruppate in un'unica classe.

Sempre per agevolare l'utilizzazione delle informazioni acquisite sulle proprietà geotecniche dei diversi materiali, per ciascuna delle formazioni sono riportati in quadri sintetici separati le proprietà meccaniche da prove statiche e le proprietà dinamiche. In particolare, i parametri dinamici, iniziali e dipendenti dalla deformazione di taglio, vengono riportati nella forma richiesta dalla maggior parte dei programmi di calcolo che effettuano l'analisi della risposta sismica locale.

## 2. Simbologia adottata

$c'$ : coesione drenata

$c_u$ : coesione non drenata

$c_c$ : indice di compressione

$c_s$ : indice di rigonfiamento

$d$ : diametro dei grani

$D$ : rapporto di smorzamento

$D_o$ : rapporto di smorzamento iniziale

$D_{max}$ : rapporto di smorzamento massimo

$e_o$ : indice dei vuoti iniziale

$f_s$ : resistenza di attrito laterale misurata nella prova penetrometrica statica

$G$ : modulo di taglio

$G_o$ : modulo di taglio iniziale

$I_c$ : indice di consistenza

$I_p$ : indice di plasticità

$K_o$ : coefficiente di spinta a riposo

$N_{SPT}$ : numero di colpi per 30cm d'infissione nella prova SPT

$OCR$ : grado di sovraconsolidazione

$q_c$ : resistenza unitaria di punta misurata nella prova penetrometrica statica

$q_u$ : carico unitario di rottura da prova di compressione ad espansione laterale libera

$V_S$ : velocità delle onde elastiche trasversali

$V_P$ : velocità delle onde elastiche longitudinali

$w$ : 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

$e_a$ : deformazione assiale

$f'$ : angolo di resistenza al taglio in condizioni drenate

$g$ : peso dell'unità di volume totale

$g$ : deformazione di taglio

$s'_a$ : tensione efficace assiale

$s'_c$ : tensione efficace di consolidazione

$s'_p$ : pressione di consolidazione

$s'_o = s'_v(I+2K_o)/3$ : tensione efficace media

$s'_{vo}$ : tensione verticale efficace in sito

$s'_v$ : tensione verticale efficace

$t$ : tensione tangenziale

### 3. Localizzazione delle verticali esplorate e passaggi stratigrafici

L'ubicazione delle verticali esplorate nella campagna di indagini effettuata dalla Regione dell'Umbria e a cui si è fatto riferimento per la caratterizzazione statica e dinamica delle diverse formazioni è indicata nella carta di Figura 1, dove sono riportati i sondaggi (colore rosso), le prove CPT (colore nero) e le verticali esplorate in un precedente studio (colore verde), insieme ad una rappresentazione schematica della geologia di superficie.

Il quadro complessivo delle prove in sito e in laboratorio relative alle diverse campagne di indagine e i cui risultati sono stati utilizzati per la caratterizzazione meccanica delle diverse formazioni è riportato nella Tabella 1. In tale Tabella sono anche indicate le ubicazioni, le profondità massime raggiunte dai sondaggi e delle prove in sito, le quote di estrazione dei campioni indisturbati su cui sono state effettuate le prove di laboratorio, il laboratorio che ha effettuato le prove, le unità stratigrafiche incontrate. L'attribuzione dei campioni alle diverse unità stratigrafiche e la valutazione delle pressioni litostatiche efficaci in sito è stata effettuata sulla base dei dati forniti dall'Amministrazione Regionale sui passaggi stratigrafici rilevati nei vari sondaggi e sulle profondità della falda qui di seguito riportati:

*a) passaggi stratigrafici*

Sondaggio	Profondità	Formazione
S1	0-6 m	Alluvioni terrazzate
	6-21 m	Alluvioni terrazzate (o Subsistema di Selci Lama) (SEL)
	21-78 m	Sintema di Fighille (FIG)
S2	0-4.3 m	Alluvioni terrazzate
	4-21 m	Sintema di Fighille (FIG)
S4	0-30 m	Alluvioni recenti e terrazzate
S5	0-6 m	Alluvioni terrazzate
	6-30 m	Sintema di Fighille (FIG)
S6	0-5.2 m	Subsistema di Nuvole (NUV)
S7	0-5 m	Alluvioni terrazzate
	5-50 m	Subsistema di Selci Lama (SEL)
S8	0-30 m	Subsistema di Mercatale (MER)
S9	0-30 m	Subsistema di Monte Rotondo (MOR)
S10	0-8m	Subsistema di Molin dell'Olio (MOL)
	8-18 m	Subsistema di Monte Rotondo (MOR)
	18-30 m	Sintema di Fighille (FIG)
S11	0-11 m	Alluvioni recenti e terrazzate
	11-50 m	Sintema di Fighille (FIG)
S24	0-13.7 m	Alluvioni terrazzate
	13.7-35 m	Sintema di Fighille (FIG)
S25	0-2.30 m	Alluvioni terrazzate
	2.30-3 m	Subsistema di Selci Lama (SEL)
S27	0-11.5 m	Alluvioni recenti e terrazzate
	11.5-30 m	Sintema di Fighille (FIG)
S28	0-40 m	Alluvioni recenti
S29	0-40 m	Alluvioni recenti
S30	0-14.4 m	Alluvioni terrazzate
	14.4-34 m	Subsistema di Selci Lama (SEL)
	34-40 m	Sintema di Fighille (FIG)

*b) profondità della falda*

Sondaggio	Profondità dal p.c.
S1	7.00 m
S2	4.50 m
S3	3.00 m
S4	4.00÷5.00 m
S5	10.00÷12.00 m
S7	20.00 m
S8	30.00 m
S9	> 50 m
S10	25÷30 m

S11	4.00+5.00 m
S24	4.50 m
S25	20.00 m
S27	7.00 m
S28	5.00+6.00 m
S29	10.00 m
S30	12.00 m

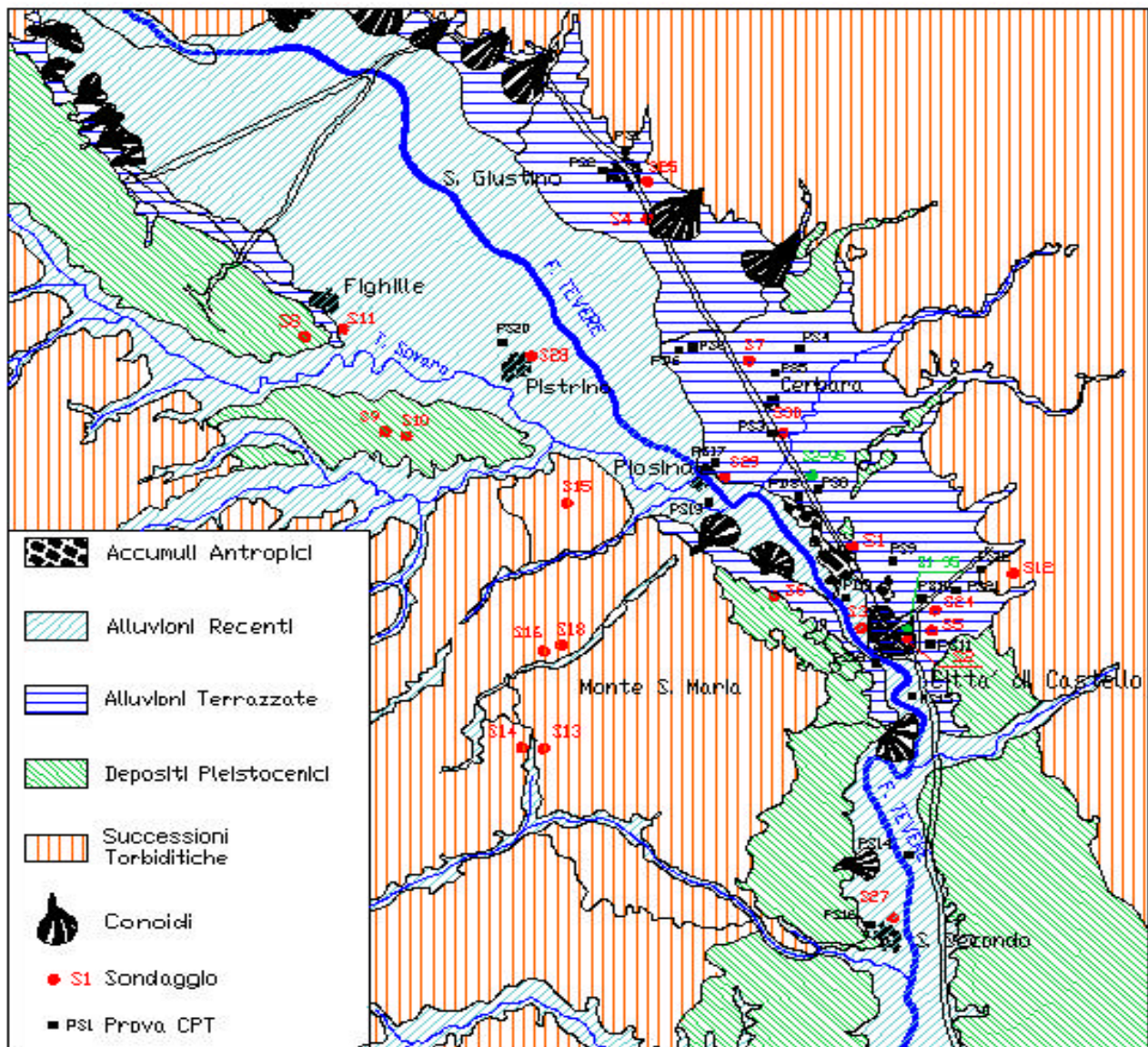


Figura 1: Schema della geologia di superficie con indicazione delle verticali d'indagine

Tabella 1: Sondaggi, campioni e prove effettuate nell'ambito dei diversi lavori

Località	Sondaggio	Prof. Max (m)	Campioni	Ambito del Lavoro o Studio Anno	Prove in Sito		Quota prelievo dal piano campagna [m]	Prove di Laboratorio							Litotipo	Note	Materiale Prelevato	Unità Stratigrafiche e passaggi
					DH	CH		Class.	ELL	EDO	DST	TxClU	RC	TTC				
Città di Castello (zona nord)	S1	28,50	C1	Cassa di Risparmio, 1978	-	-	4.00-4.60	X	-	X	X	-	-	-	A. R.	AT FIG FIG FIG	0-5m AT 5-14m AT o SEL oltre 14m FIG	
			C2				15.00-15.60	X	-	-	X	-	-	-	S. P.			
			C3				18.00-18.60	X	-	-	X	-	-	-	S. P.			
			C4				24.00-24.60	X	-	-	-	-	-	-	S. P.			
	S2	19,30	C1		280-3.40	X	-	X	X	-	-	-	A. R.	AT FIG FIG	0-6m AT 6-13m AT o SEL oltre 13m FIG			
			C2		14.80-15.40	X	-	-	-	-	-	-	S. P.					
			C3		17.20-17.80	X	-	-	X	-	-	-	S. P.					
	S3	18,10	C1		3.50-4.10	X	-	X	X	-	-	-	A. R.	AT FIG FIG	0-5m AT 5-14m AT o SEL oltre 14m FIG			
			C2		14.80-15.40	X	-	-	X	-	-	-	S. P.					
C3			16.30-16.90	X	-	-	-	-	-	-	S. P.							
Città di Castello (centro storico)	S1	40,00	C1	Dipartimento di Ingegneria Civile -Università di Firenze	X	-	7.50-8.00	-	-	-	-	-	-	-	S. P.	FIG FIG FIG FIG	0-5m AT oltre 5m FIG	
			C2				14.00-14.50	X	-	X	-	X	X	-	S. P.			
			C3				20.00-20.50	X	-	-	-	-	X	-	S. P.			
			C4				29.80-30.30	-	-	-	-	-	-	-	S. P.			
Città di Castello (zona nord)	S2	50,00	C1	(Pericolosità Sismica ed Effetti di Sito), 1995	X	-	4.50-5.00	-	-	-	-	-	-	-	A. R.	AT SEL SEL FIG	0-6m AT 6-45m SEL oltre 47 FIG	
			C2				15.00-15.50	X	-	X	-	X	X	-	A. R.			
			C3				32.00-32.50	X	-	X	-	X	X	-	A. R.			
			C4				48.00-48.50	-	-	-	-	-	-	-	S. P.			
Rio Secco	S1	50,50	-	Istituto per l'Edilizia Residenziale Pubblica, 1999	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Città di Castello (zona nord)	S1	78,00	C1		X	-	2.50-3.10	X	X	X	-	-	X	X	A. R.	AT FIG FIG FIG FIG	0-6m AT 6-22m AT o SEL oltre 23m FIG	
			C2				23.80-24.40	X	-	X	-	-	X	X	S. P.			
			C3				29.00-29.60	X	-	X	-	X	-	-	S. P.			
			C4				51.00-51.50	X	X	-	-	-	-	-	S. P.			
			C5				67.20-67.80	X	X	-	-	-	-	-	S. P.			



Città di Castello (zona ovest)	S3	180,00	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-			
Città di Castello (zona est)	S2	21,00	C1		X	-	4.50-5.00								A. R.	da aprire (DIC)	FIG	0-4m AT		
			C2				8.70-9.10									A. R.	da aprire (DIC)	FIG	oltre 4 FIG	
	S5	30,00	C1		X	-	3.20-3.70	X	-	X	-	X	-	-	-	A. R.	analizzato da SIGMA-TAU	AT	0-6m AT	
			C2		X	-	8.70-9.30	X	-	X	-	X	-	-	-	A. R.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG	oltre 6m FIG	
			C3		X	X	19.00-19.60	X	X	-	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG		
	S24	34,00	C1		-	X	2.00-2.50	X	-	X	-	X	-	-	-	A. R.	analizzato da SIGMA-TAU	AT	0-13m AT oltre 14 FIG	
C2				X	9.00-9.50	X	X	X	-	-	X	X	-	-	A. R.	da aprire (DIC)	AT			
C3				X	14.50-15.00	X	X	X	-	-	X	X	-	-	A. R.	analizzato c/o DIC	FIG			
C4				X	22.60-23.10	X	X	-	-	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG			
Città di Castello Bagni di Fontecchio	S12	20,00	-		X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-			
Città di Castello Nuvole	S6	30,00	C1	Studio Geotecnico Finalizzato	X	-	3.00-3.30	X	-	X	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	NUV	NUV		
S. Giustino	S4	30,00	C1	alla Valutazione degli Effetti			3.50-4.00									da aprire (DIC)	AR & AT	AR & AT		
			C2	Locali nell'Ambito del	X X	-	12.50-13.20	X	-	X	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AR & AT	AR & AT	
			C3	Progetto per la Realizzazione			24.00-24.50										da aprire (DIC)	AR & AT	AR & AT	
	S25	30,00	-	di una Zonazione Territoriale	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-2.3 AT poi SEL		
Selci - Lama	S7	50,00	C1	della Pericolosità Sismica Locale			3.00-3.60	X	-	X	-	X	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AT	0-5m AT	
			C2	Area Campione Alta Valle	-	X	18.20-18.80	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	SEL	oltre 5m SEL
			C3	Tiberina Umbra, 2000			28.5-29.00										da aprire (DIC)	SEL		
Citerna	S9	30,00	C1		X	-	9.00-9.30	X	X	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	MOR	MOR		
	S10	30,00	C1		X	-	3.80-4.40	X	-	X	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	MOL	0-8m MOL 8-18 MOR	
C2				X	-	21.00-21.70	X	-	X	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG	oltre 18 FIG		
Fighille	S8	30,00	C1		X	-	5.50-6.00	X	-	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	MER	MER		
	S11	50,00	C1		X	-	3.00-3.50	X	X	X	-	-	X	X	A. R.	analizzato c/o DIC	AR & AT	0-11m AR & AT		
			C2		X	-	13.20-13.70	X	-	X	-	X	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG	oltre 11m FIG	
C3		X	X	36.00-36.60	X	X	-	-	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU	FIG				

S. Secondo	S27	30,00	C1	X	-	3.00-3.50	X	-	X	-	-	X	X	A. R.	analizzato c/o DIC	AR & AT FIG FIG FIG	0-11m AR & AT oltre 12 FIG	
			C2			16.00-16.50	X	-	X	-	X	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU			
			C3			24.00-24.20	X	-	-	-	-	-	-	S. P.	analizzato da SIGMA-TAU			
			C4			28.50-28.90	X	-	X	-	-	-	-	S. P.	analizzato c/o DIC **			
Pistrino	S28	40,00	C1	X	-	3.00-3.70	X	-	X	-	X	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AR	AR	
Piosina	S29	40,00	C1	X	-	3.00-3.70	X	-	X	-	X	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AR	AR	
			C2			18.00-18.70	X	-	X	-	X	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AR	AR
Cerbara	S30	40,00	C1	X	-	4.00-4.60	X	-	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU	AT	0-14.0 AT 14.0-34.0 SEL oltre 34 FIG	
			C2			9.20-9.80	X	-	X	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU		AT
			C3			13.00-13.60	X	-	-	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU		AT
			C4			20.50-21.00	X	-	X	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU		SEL
			C5			36.00-36.40	X	-	-	-	-	-	-	-	-	analizzato da SIGMA-TAU		FIG
Monte S. Maria	S13	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
	S14	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-
Celle	S15	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
P.gio di Montriolo	S16	20,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
Cagnano	S18	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
Col de Mura	S17	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
Umbertide	S19	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
	S22	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	
	S26	10,00	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	sondaggio a distruzione	-	-	

- Class. = Prove di Classificazione  
 ELL = Prova di compressione ad espansione laterale libera  
 EDO = Prova di compressione edometrica  
 DST = Prova di taglio diretta  
 TxCU = Prova triassiale non drenata  
 RC = Prova di colonna risonante  
 TTC = Prova di taglio torsionale ciclico  
 DH = Prova Down Hole  
 CH = Prova Cross Hole

\* risultati anomali: campione escluso dall'analisi

\*\* risultati RC e TTC anomali: non certificati

UNITA' STRATIGRAFICHE  
SONDAGGI

- AR = Alluvioni recenti
- AT = Alluvioni  
terrazzate
- FIG = Sintema di  
Fighille
- SEL = Subsintema di Selci Lama
- NUV = Subsintema di  
Nuvole
- MER = Subsintema di Mercatale
- MOR = Subsintema di M.  
Rotondo
- MOL = Subsintema di Molin  
dell'Olio

## 4. Alluvioni recenti

Per la caratterizzazione delle alluvioni recenti sono stati utilizzati i sondaggi S4-00, S11-00; S27-00, S28-00, S29-00 e i risultati di prove di laboratorio su 6 campioni indisturbati (S4-00-C2, S11-00-C1, S27-00-C1, S28-00-C1, S29-00-C1 e S29-00-C2) e su alcuni campioni prelevati con il campionatore SPT.

### 4.1 Proprietà meccaniche da prove statiche

La Tabella 2 riporta le proprietà indici e i parametri fisici, di deformabilità e di resistenza relativi ai 6 campioni e i principali indici statistici delle suddette proprietà.

Nelle Figure 2 e 3 sono riportati i risultati delle prove indici. Più precisamente, la Figura 2 riporta le curve granulometriche di 8 campioni, di cui 4 prelevati in prove SPT. La Figura 3 mostra i punti sperimentali sulla carta di plasticità adottata nel Sistema Unificato (USCS) dei 6 campioni indisturbati esaminati. I risultati delle prove edometriche sono riportati nella Figura 4, mentre i parametri di deformabilità da queste desunti sono mostrati nella Tabella 3.

Le curve di compressione edometrica non sempre mostrano in maniera evidente un ginocchio al passaggio tra il tratto di ricomprensione ed il tratto di compressione vergine. L'incertezza riscontrata nell'individuazione della pressione di preconsolidazione ha comportato la stima dei parametri di deformabilità in termini di intervallo. La determinazione del coefficiente di spinta a riposo,  $K_0$ , è stata effettuata a partire dalle seguenti correlazioni empiriche (Lancellotta, 1993).

$$(Schmidt, 1966; Alpan, 1967) \quad K_0 (OC) = K_0 (NC) \cdot OCR^a$$

$$(Massarsch, 1979) \quad K_0 (NC) = 0.44 + 0.42 \cdot \frac{I_p}{100} \quad (1)$$

$$(Alpan, 1967) \quad K_0 (NC) = 0.19 + 0.233 \cdot \log (I_p)$$

dove al coefficiente  $a$  è stato assegnato il valore fornito dalle seguenti espressioni

$$a = 0.54 \cdot 10^{\frac{-I_p}{281}}$$

$$a = 0.58 \cdot I_p^{-0.12}$$

Nella Tabella 3 vengono riportati i valori minimi e massimi di  $K_0$  stimati mediante tali correlazioni.

Per quanto riguarda le misure di resistenza, nella Figura 5 si può osservare l'andamento sforzi-deformazioni ottenuto in prove di compressione ELL, mentre nella Figura 6 è riportato l'andamento con la profondità della coesione non drenata, determinata con penetrometro e torvane tascabili, normalizzata con la pressione verticale efficace. In tale grafico è anche riportata la curva

interpolante nei primi 12 m, mentre per le successive quote è stato assunto e riportato il valore medio del rapporto di coesione.

Tabella 2: Proprietà indici, parametri di deformabilità e parametri di resistenza da prove statiche di laboratorio condotte su campioni appartenenti Alluvioni Recenti

Sondaggio-Anno	S4-00	S11-00	S27-00	S28-00	S29-00		min	max	media $\mu$	dev. std	coeff. di var. CV [%]	Val. Raccom. Vr [%]	CV min-max min-max
	C2	C1	C1	C1	C1	C2							
Z [m]	12,85	3,30	3,25	3,35	3,35	18,30							
Z <sub>w</sub> [m]	4,50	4,50	7,00	5,50	10,00	10,00							
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20,59	19,80	19,60	20,68	18,75	19,44	18,75	20,68	19,81	0,73	3,69	3	1-10
q <sub>b</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	140,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w <sub>L</sub> (%)	32,01	41,00	31,00	33,48	30,69	24,25	24,25	41,00	32,07	5,40	16,85	10	5-50
w <sub>P</sub> (%)	17,60	25,00	22,00	19,46	22,51	18,36	17,60	25,00	20,82	2,83	13,58	10	10-30
I <sub>P</sub> (%)	14,41	16,00	9,00	14,02	8,18	5,89	5,89	16,00	11,25	4,09	36,31	30	5-80
w (%)	19,76	28,00	13,00	18,24	23,36	23,77	13,00	28,00	21,02	5,20	24,75	-	-
I <sub>c</sub>	0,85	0,81	2,00	1,09	0,90	0,08*	0,81	2,00	1,13	0,50	44,12	-	-
e <sub>0</sub>	0,538	0,654	0,588	0,486	0,693	0,620	0,49	0,69	0,60	0,08	12,74	25	15-30
c <sub>c</sub>	0,181	0,236	0,239	0,183	0,191	0,172	0,17	0,24	0,20	0,03	14,69	30	20-70
c <sub>s</sub>	0,041	0,057	0,023	0,025	0,034	0,028	0,02	0,06	0,03	0,01	36,79	-	-
OCR	1.0-1.4	1.8 - 3.2	3.1 - 4.7	4.3-8.7	1.9-6.4	1.0-1.4	1,00	8,70	-	-	-	-	-
K <sub>0</sub>	0.46-0.59	0.62 - 0.87	0.68 - 1.04	0.85-1.68	0.54-1.43	0.35-0.67	0,35	1,68	-	-	-	-	-
c' [kPa]	-	-	-	23,54	17,66	16,68	16,68	23,54	19,29	3,71	19,23	-	-
$\phi'$ (°)	-	-	-	24	26	26	24,00	26,00	25,33	1,15	4,56	-	10-50

\* Valore escluso dai calcoli statistici

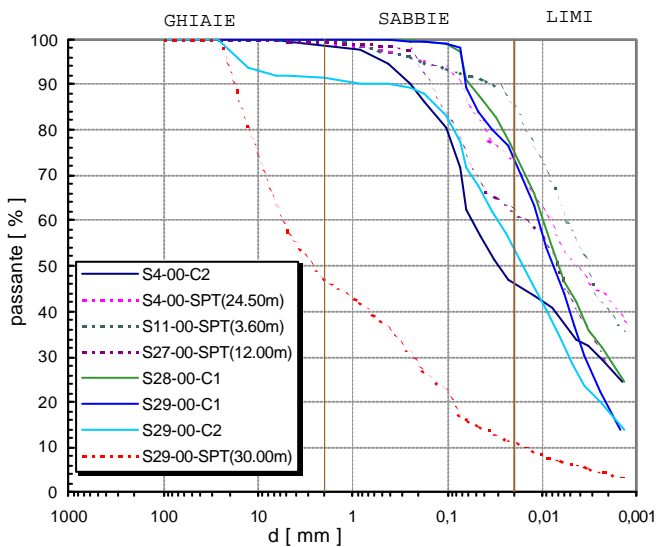


Figura 2: Curve granulometriche di materiale prelevato nelle alluvioni recenti

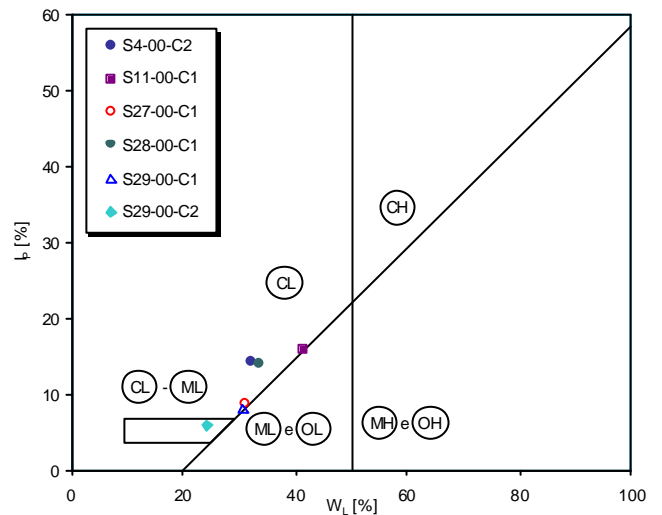


Figura 3: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

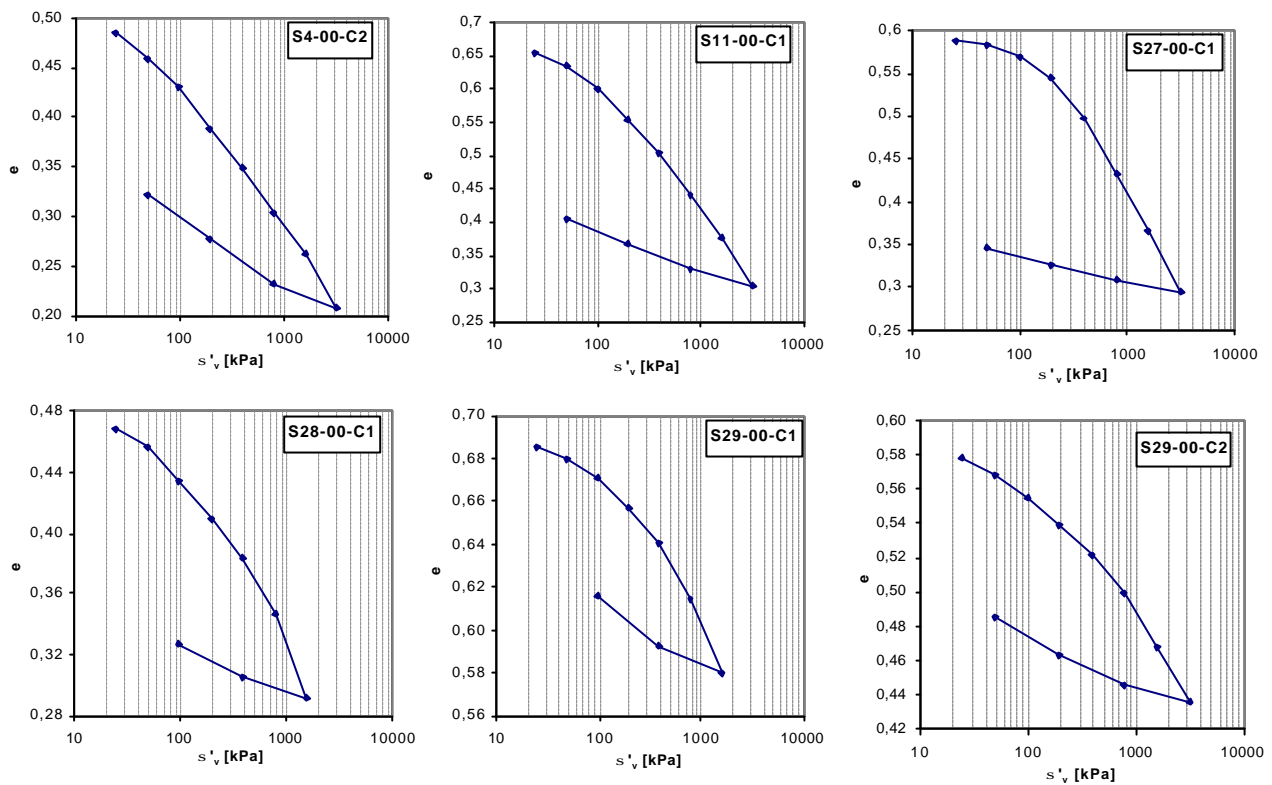


Figura 4: Prove Edometriche condotte su alluvioni recenti

Tabella 3: Parametri ricavati e parametri stimati a partire dalle prove edometriche

	$c_c$	$c_s$	$\sigma_p'$ [kPa]	$\sigma_v'$ [kPa]	OCR	$K_0^{(*)}$	$\sigma_o'$ [kPa]				
S4-00-C2	0,181	0,041	180	250	181,1	1,0	1,4	0,46	0,59	116	132
S11-00-C1	0,236	0,057	120	210	65,3	1,8	3,2	0,62	0,87	49	60
S27-00-C1	0,239	0,023	200	300	63,7	3,1	4,7	0,68	1,04	50	65
S28-00-C1	0,183	0,025	300	600	69,3	4,3	8,7	0,85	1,68	62	101
S29-00-C1	0,191	0,034	120	400	62,8	1,9	6,4	0,54	1,43	44	81
S29-00-C2	0,172	0,028	340	500	349,4	1,0	1,4	0,35	0,67	198	273

(\*) Sono riportati il valore massimo e minimo fra quelli stimati con le relazioni (1)

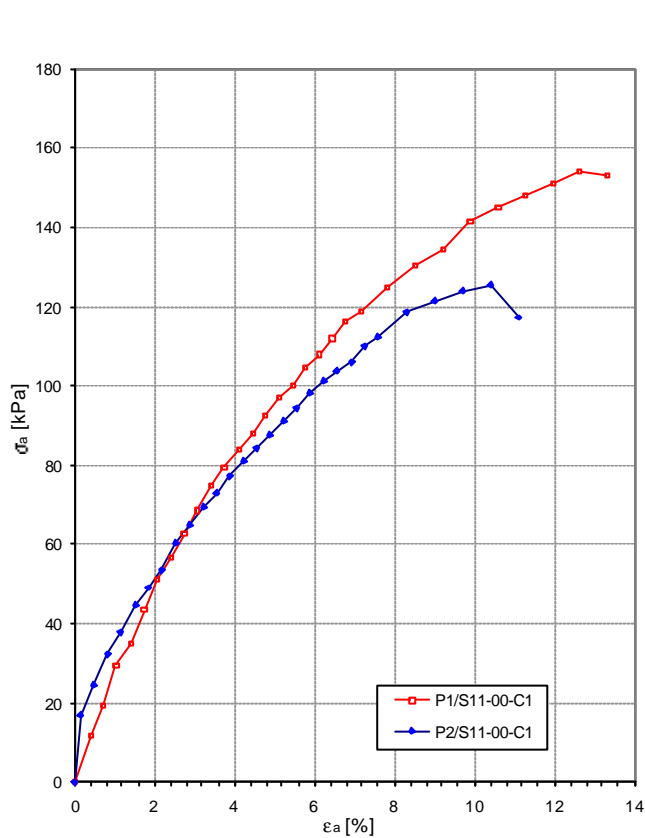


Figura 5: Prove ELL su due provini ricavati da un campione prelevato nelle alluvioni recenti

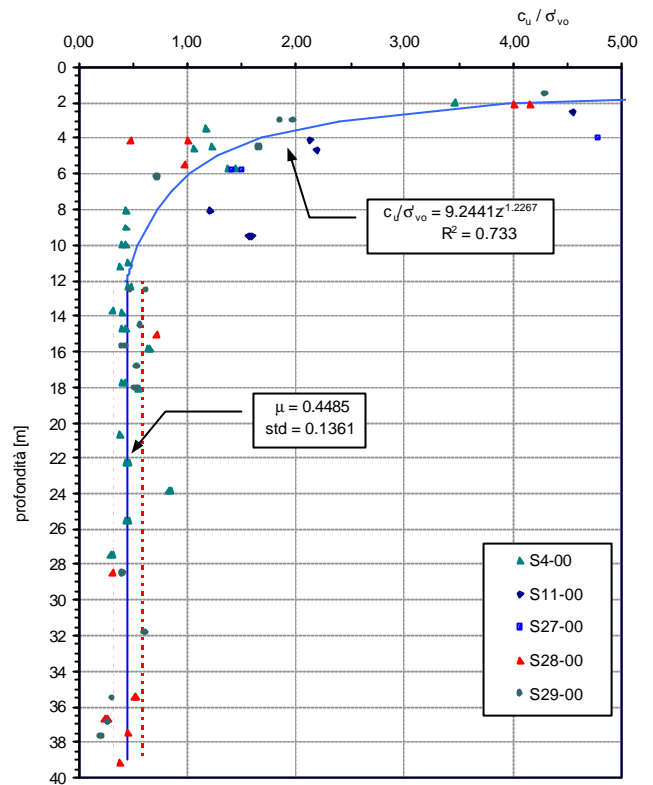


Figura 6: Valori di  $c_u$  normalizzati con la pressione efficace determinati in sito con penetrometro e torvane tascabili

## 4.2 Proprietà meccaniche da prove dinamiche

Per la determinazione delle proprietà dinamiche sono state utilizzate le stesse verticali, su cui sono state eseguite misure di  $N_{SPT}$ , N. 6 prove DH - di cui due nella verticale S4-00 - e misure con l'apparecchiatura di colonna risonante (RC) e di taglio torsionale ciclico (TTC) su N. 2 campioni (S11-00-C1 e S27-00-C1).

Nella Figura 7 sono riportati i valori del numero di colpi  $N_{SPT}$ . Nella Figura 8 sono riportati i profili delle  $V_S$  relativi ai singoli sondaggi. Nella Figura 9a, 9b e 9c sono riportati i valori di  $V_S$  in funzione della profondità, sia considerando congiuntamente tutti i profili, sia in funzione della granulometria. Tutti i profili sono stati interpolati mediante una relazione di tipo potenza.

Le prove dinamiche in laboratorio con l'apparecchio RC e TTC sono state effettuate su N. 2 campioni (S11-00-C1 e S27-00-C1). Non è stato possibile classificare con certezza tali campioni come appartenenti alla formazione delle alluvioni recenti, non essendo stato identificato chiaramente nella stratigrafia il passaggio tra alluvioni recenti e alluvioni terrazzate. Poiché per le alluvioni terrazzate è stato esaminato un solo campione (vedi oltre), i risultati ottenuti sui due campioni precedenti sono stati utilizzati nella caratterizzazione dinamica di entrambe le formazioni.

In Tabella 4 sono riportati i valori delle deformazioni di taglio corrispondenti alla soglia elastica,  $g_e$ , (considerata convenzionalmente come valore dell'ampiezza della deformazione di taglio corrispondente al valore del rapporto  $G/G_0$  uguale a 0.95) ed alla soglia volumetrica,  $g_v$ , definita come il valore della deformazione di taglio a cui corrisponde il primo incremento significativo delle pressioni interstiziali in prove non drenate (come le RC eseguite). Il legame sforzi-deformazioni, ovvero la curva di decadimento  $G(g)/G_0$ , è stato determinato sia utilizzando il modello iperbolico di Hardin e Drnevich, nella forma modificata da Yokota et al (1981), sia il modello di Ramberg e Osgood (1943), definiti mediante le espressioni seguenti.

*Modello di Yokota et al.*

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{(1 + a \cdot g^b)}$$

*Modello di Ramberg e Osgood*

$$g = \frac{t}{G_0} + C \cdot \left( \frac{t}{G_0} \right)^R$$

dove i parametri dei modelli,  $a$ ,  $b$ ,  $C$  ed  $R$ , sono stati determinati mediante regressioni lineari su variabili logaritmiche e sono indicati nella Tabella 5.

I valori del rapporto di smorzamento, in corrispondenza di alcuni livelli deformativi sono stati misurati sperimentalmente nel corso delle prove di colonna risonante con il metodo dell'incremento



logaritmico (Amplitude Decay Method). La relazione adattata ai dati sperimentali per esprimere  $D$  in funzione di  $g$  è la seguente (Yokota et al., 1981):

$$D = D_{max} \cdot e^{\left( I \frac{G}{G_0} \right)}$$

I valori dei parametri del modello,  $D_{max}$  e  $I$ , sono riportati in Tabella 5.

I punti sperimentali del modulo di taglio normalizzato,  $G/G_0$ , e del rapporto di smorzamento,  $D$ , ottenuti in funzione dell'ampiezza dello sforzo di taglio con l'apparecchio RC e TTC sono riportati nelle Figure 10 e 11. In tali Figure sono riportati anche i punti sperimentali del campione classificato come appartenente alle alluvioni terrazzate (S1-00-C1). Ai punti sperimentali ottenuti con l'apparecchio di colonna risonante è stato adattato il modello di Ramberg e Osgood. Tale modello non è stato applicato ai risultati del TTC per il minor numero di punti sperimentali ad alte deformazioni.

Nella Tabella 6 sono riportati per i tre campioni i valori di  $G_0$  ottenuti nella prova multistage di RC in corrispondenza dei diversi valori della pressione di confinamento,  $s'_c$ , e dell'indice dei vuoti  $e_0$ .

Al fine di caratterizzare con un unico modello le due formazioni, è stata assunta, nelle Figure 12 e 13, un'unica curva interpolante. In particolare in Figura 12 sono riportate le curve adattate ai dati sperimentali secondo i modelli di Ramberg & Osgood e di Yokota et Al. In Figura 13 è riportato l'andamento del rapporto di smorzamento. Per confronto si riportano in Figura 14 l'andamento della legge di decadimento,  $G(g)$ , trovata per i materiali di origine alluvionale con le leggi di decadimento trovate per materiali coesivi da vari Autori. Il modello di adattamento ai dati sperimentali riportato in tale figura è quello di Yokota et al.

Per facilitare l'utilizzazione di tali risultati e il loro inserimento nei modelli usualmente impiegati nel calcolo della risposta sismica locale, è stata preparata la Tabella 7, in cui accanto ai diversi valori dell'ampiezza della deformazione di taglio sono riportati i corrispondenti valori di  $G/G_0$  e di  $D$ . In Tabella 8, sono riportati i coefficienti delle regressioni effettuate sull'insieme dei dati sperimentali dei campioni provenienti dalle Alluvioni Recenti e Terrazzate.

Tabella 5: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici ai dati sperimentali

	S1-00-C1	S11-00-C1	S27-00-C1
$\alpha$	27,651	44,957	37,575
$\beta$	1,148	1,398	1,132
$r^2$	0,994	0,990	0,987
C	4620,617	2341,531	2038,919
R	3,165	3,145	2,841
$r^2$	0,985	0,999	0,993
$D_{max}$ [%]	25,39	23,40	21,51
$\lambda$	-2,38	-2,20	-1,71
$r^2$	0,973	0,989	0,996

Tabella 4: Valori della soglia elastica e della soglia volumetrica

	$\gamma_l$ [%]	$\gamma_v$ [%]
S1-00-C1	0,0055	0,021
S11-00-C1	0,0072	0,029
S27-00-C1	0,0034	0,023

Tabella 6: Valori sperimentali di  $G_0$  in funzione di  $\sigma_0'$  ed  $e_0$

Prova Campione	S1-00-C1			S11-00-C1			S27-00-C1		
	RC		TTC	RC		TTC	RC		TTC
$G_0$ [MPa]	36,9	79,8	77,07	31,3	83,9	79,96	71,3	112,3	106,2
$s_0'$ [MPa]	0,025	0,11	0,11	0,017	0,12	0,12	0,056	0,12	0,12
$e_0$	0,607	0,573	0,621	0,691	0,632	0,706	0,453	0,45	0,46

Tabella 7: Legge di decadimento del modulo di taglio e legge di smorzamento in formato numerico

Alluvioni Recenti & Alluvioni Terrazate		
$\gamma$ [%]	$G/G_0$	D
0,0000	1,0000	2,7911
0,0003	0,9999	2,7919
0,0004	0,9997	2,7930
0,0008	0,9987	2,7988
0,0011	0,9976	2,8056
0,0016	0,9943	2,8255
0,0021	0,9906	2,8481
0,0025	0,9866	2,8726
0,0033	0,9781	2,9260
0,0039	0,9690	2,9840
0,0045	0,9595	3,0458
0,0051	0,9497	3,1106
0,0057	0,9398	3,1782
0,0062	0,9297	3,2481
0,0068	0,9195	3,3202
0,0073	0,9093	3,3943
0,0125	0,8091	4,2126
0,0181	0,7193	5,1131
0,0241	0,6420	6,0412
0,0308	0,5762	6,9630
0,0381	0,5202	7,8568
0,0461	0,4724	8,7101
0,0547	0,4314	9,5161
0,0640	0,3959	10,2721
0,0740	0,3651	10,9781
0,0847	0,3381	11,6355
0,0961	0,3144	12,2467
0,1628	0,2294	14,7126
0,2459	0,1777	16,4466
0,3448	0,1435	17,7043
0,4593	0,1195	18,6462
0,6054	0,1000	19,4474
0,7122	0,0900	19,8715
0,8535	0,0800	20,3047
1,3243	0,0600	21,1999

Tabella 8: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici all'insieme dei dati sperimentali

AR & AT	
$\alpha$	36,033
$\beta$	1,238
$r^2$	0,953
C	2739,050
R	3,039
$r^2$	0,958
$D_{max}$ [%]	24,129
$\lambda$	-2,157
$r^2$	0,899

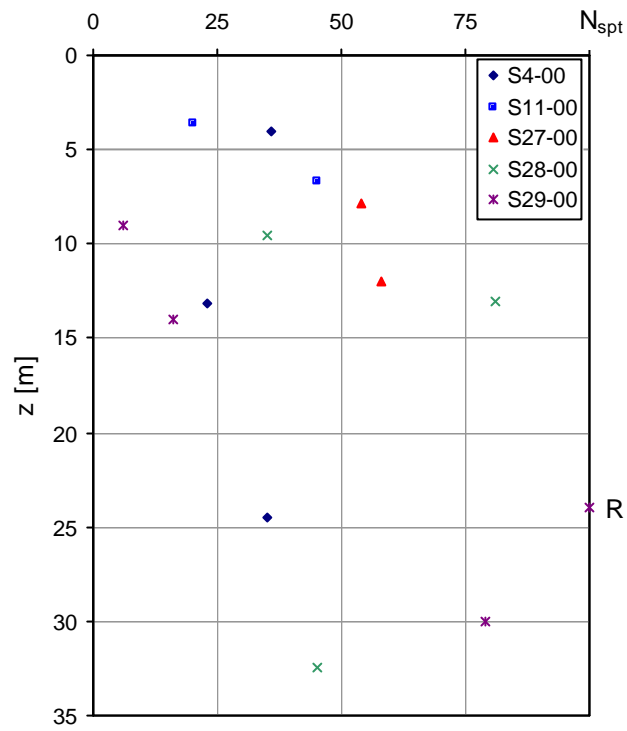


Figura 7: Valori di N<sub>spt</sub> in funzione della profondità

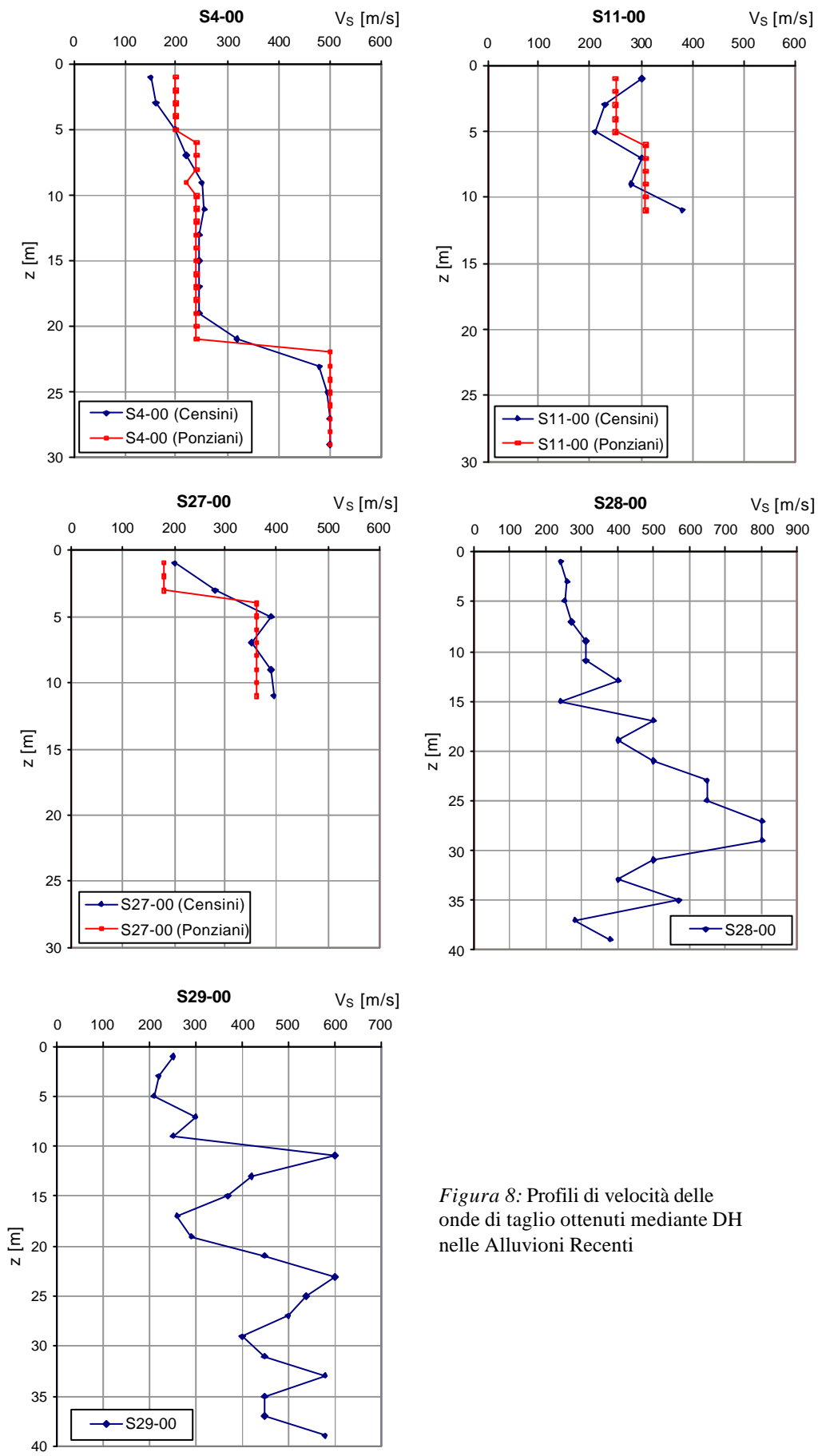


Figura 8: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH nelle Alluvioni Recenti

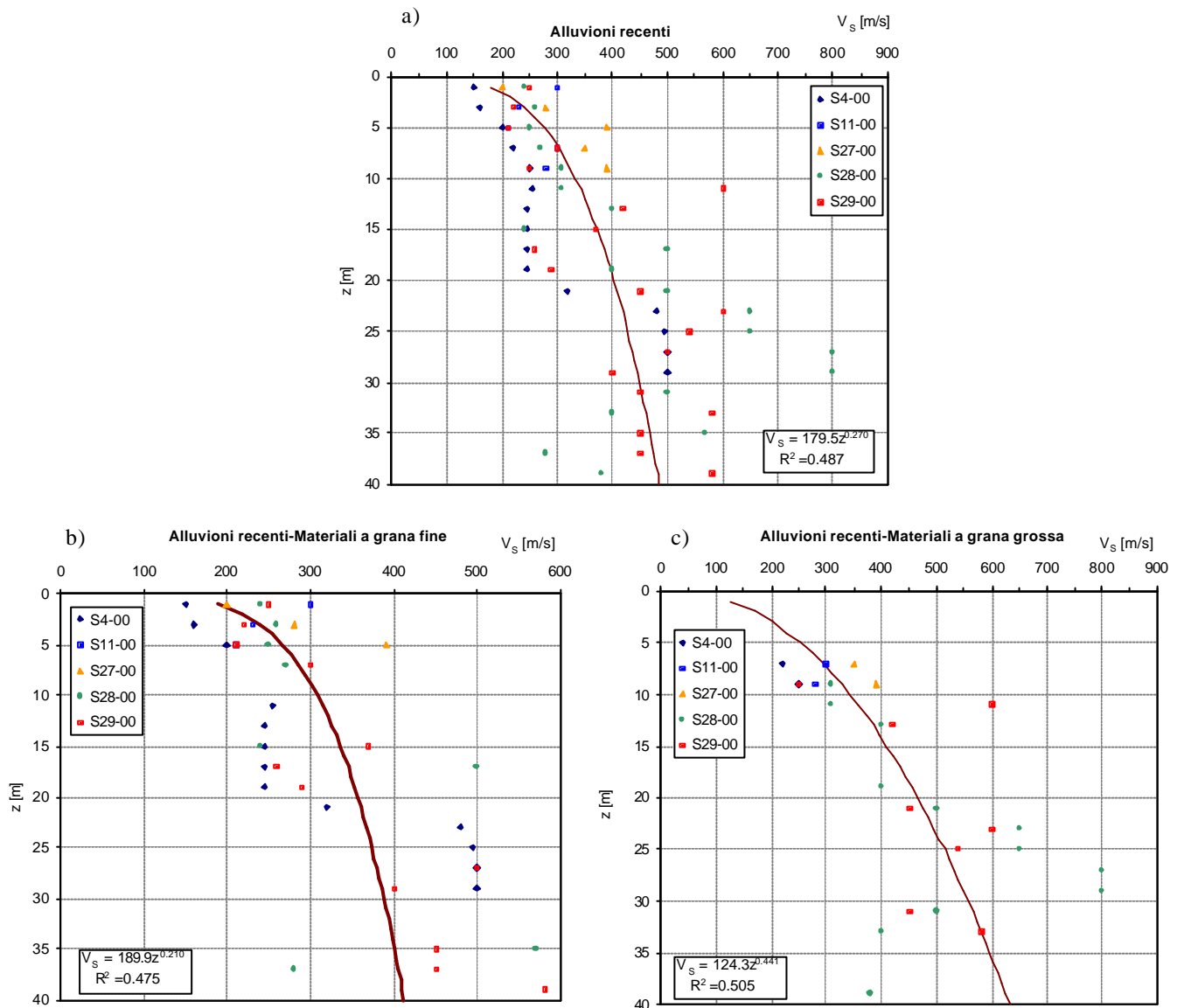


Figura 9: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante regressione dai dati sperimentali; a) per le alluvioni recenti, b) per i materiali fini presenti nelle alluvioni recenti, c) per i materiali a grana grossa delle alluvioni recenti.

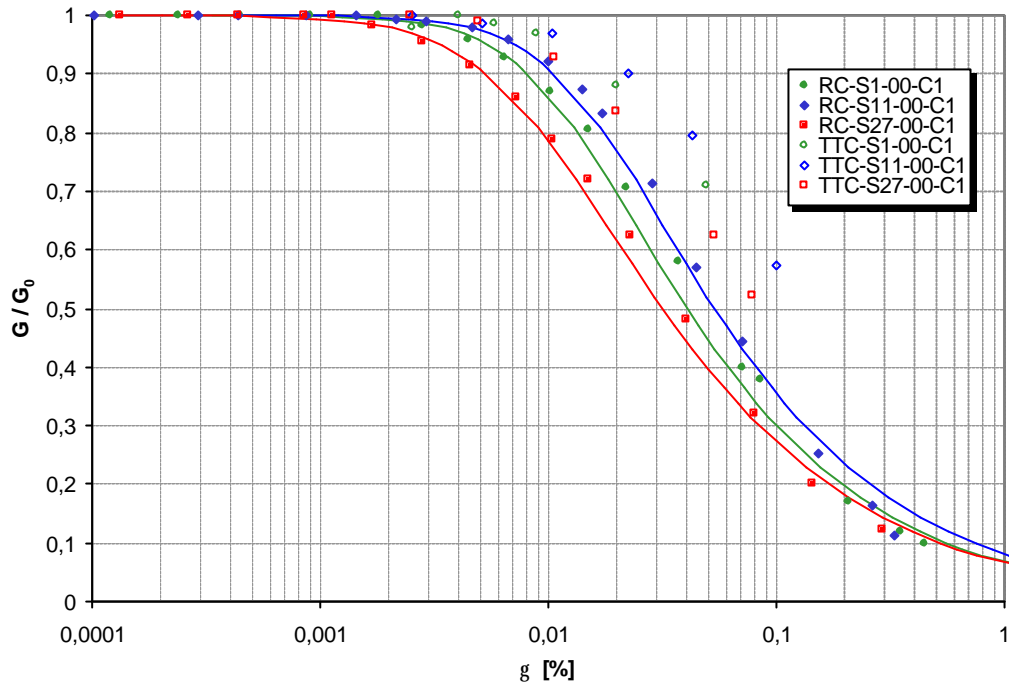


Figura 10: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modello di Ramberg & Osgood adattato ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nelle alluvioni recenti e/o terrazate.

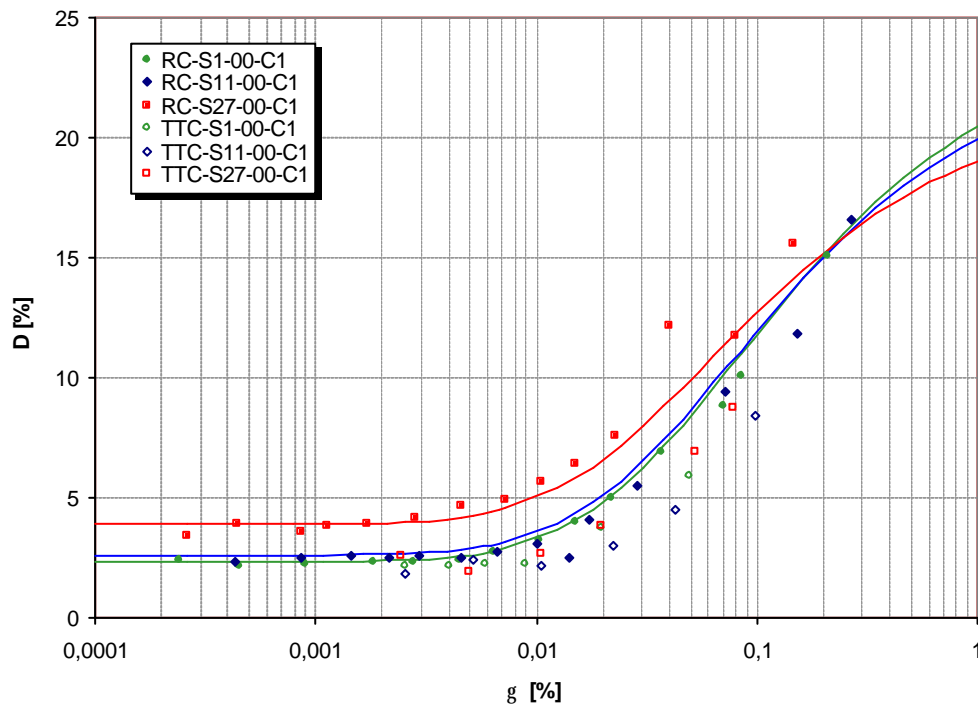


Figura 11: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e leggi esponenziali adattate ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nelle alluvioni recenti e terrazate.

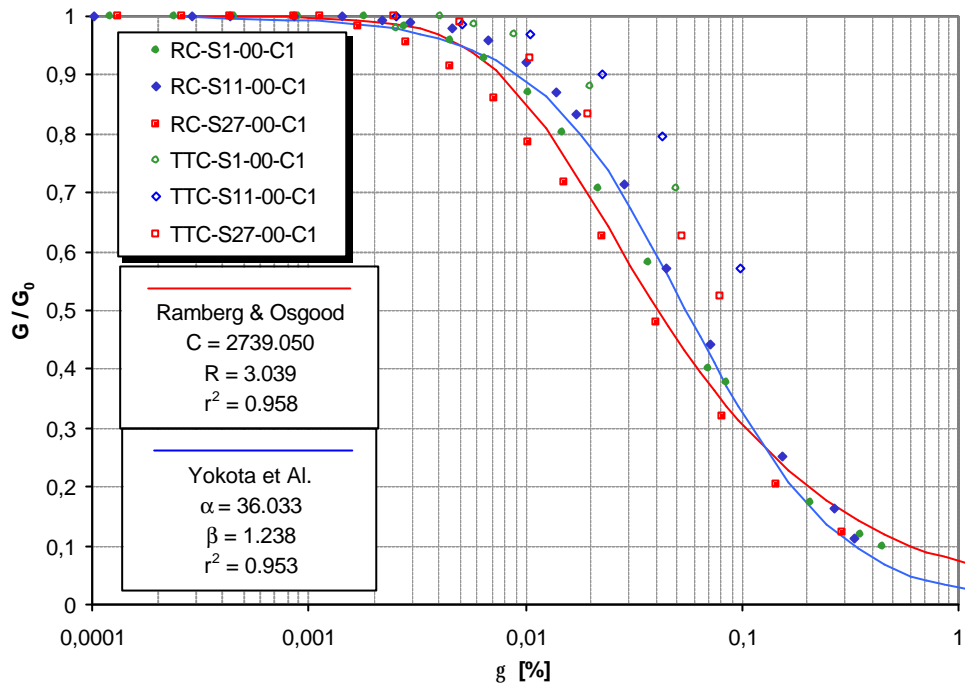


Figura 12: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modelli di Ramberg & Osgood e Yokota et Al. adattati ai dati sperimentali per le alluvioni recenti e terrazzate.

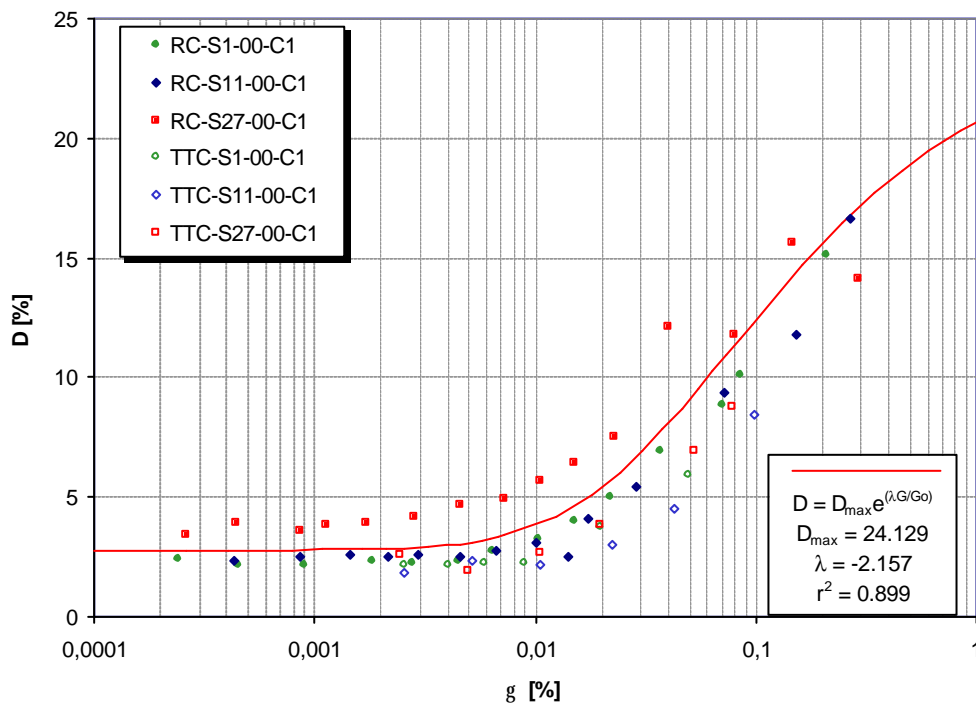


Figura 13: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e legge esponenziale adattata ai dati sperimentali per le alluvioni recenti e/o terrazzate.

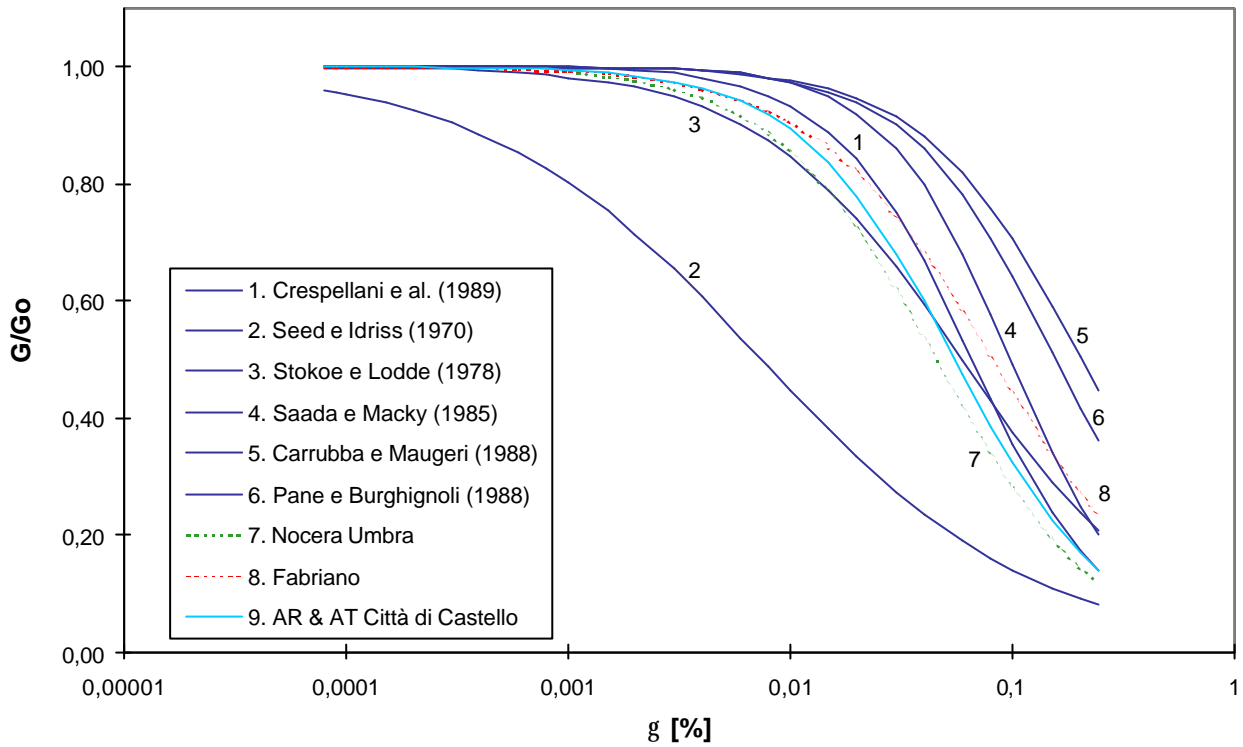


Figura 14: Confronto tra le curve di decadimento trovate con il modello di Yokota et Al. per i materiali coesivi presenti nelle alluvioni recenti e terrazzate e altre argille di letteratura



### 4.3 Sintesi delle proprietà geotecniche

#### *Proprietà in condizioni statiche*

Dal complesso dei dati sperimentali direttamente acquisiti e di alcune stime indirette effettuate utilizzando correlazioni di letteratura, le proprietà geotecniche delle alluvioni recenti oggetto dell'analisi sono così sintetizzabili:

- a) *Proprietà indici* - Ad eccezione del campione S29-00 (costituito per il 95% da ghiaia e sabbia in proporzioni all'incirca pari), i materiali esaminati sono classificabili come materiali a prevalente componente limosa con percentuali variabili di sabbia (tra il 10 e il 30%) e argilla (tra il 20 e il 40%). Con riferimento alle correnti classifiche geotecniche tali materiali risultano essere poco plastici, di natura inorganica e di bassa compressibilità, di consistenza da solido-plastica a semisolida.
- b) *Proprietà di deformabilità* - I materiali sono mediamente molto poco deformabili ( $c_c < 0.23$ ), con indice di rigonfiamento medio-alto. I valori del grado di sovraconsolidazione sono piuttosto incerti; tuttavia sembra ragionevole considerare normalconsolidati o debolmente consolidati i campioni S4-00-C2 e S29-00-C2, debolmente o mediamente sovraconsolidati i campioni S11-00-C1, S27 - 00-C1 e S29-00-C1, e infine molto sovraconsolidato il campione S28-00-C1.
- a) *Proprietà di resistenza* - In laboratorio i campioni hanno un comportamento generalmente di tipo elasto- plastico, in alcuni casi riconducibile a quello di materiali rigidi e sovraconsolidati con valori della coesione drenata diversa da zero (Campioni S28-00-C1, S29-00-C1, S29-00-C2 con valori medi di  $c'$  pari a 19.29 kPa). In sito, la coesione non drenata normalizzata con la pressione litostatica è fortemente dipendente dalla profondità nei primi 10 m ed è poi praticamente costante. Anche i valori di  $N_{SPT}$ , oltre che in numero abbastanza ridotto, sono molto dispersi. Nell'andamento di  $N_{SPT} \subset z$  è possibile, tuttavia, identificare un trend di crescita abbastanza regolare nei primi 20 m.

#### *Proprietà in condizioni dinamiche*

- a) *Valori iniziali* - I valori iniziali della rigidezza,  $G_0$ , desumibili dai valori di  $V_s$  misurati in sito, indicano una dipendenza con la profondità, con tasso di crescita più accentuato nei primi 15 m, con pendenze leggermente diverse per i materiali grana fine che alla profondità di 15 m raggiungono valori di  $V_s$  mediamente intorno a 320 m/s, mentre alla stessa profondità i materiali a grana grossa raggiungono valori di  $V_s$  intorno ai 400 m/s. Alle profondità successive il trend medio di crescita è più regolare, ma sempre con pendenze diverse per i materiali grana fine (valori medi massimi di  $V_s$  intorno ai 400 m/s) e a grana grossa (valori medi massimi di  $V_s$

intorno ai 650 m/s). La dispersione è tuttavia sempre molto elevata e le correlazioni  $V_s \subset z$  sono caratterizzate da valori di  $R^2$  intorno a 0.5.

I valori iniziali del rapporto di smorzamento  $D_0$  sono compresi fra 2.5 e 3.5 %; tali valori, comparativamente ad altri materiali studiati in letteratura, sono più vicini a quelli tipici dei materiali incoerenti che a quelli dei materiali coesivi. Il rapporto di smorzamento mantiene un andamento pressoché costante fino a valori dell'ampiezza della deformazione di taglio di  $5 \cdot 10^{-3}$  %.

*Variazione con l'ampiezza della deformazione di taglio* - Le curve di decadimento della rigidezza sono più distese di quelle tipiche dei materiali argillosi, e presentano un andamento più simile a quello dei terreni incoerenti. Il terreno esibisce un comportamento rigido per valori della ampiezza della deformazione di taglio inferiori al valore di  $5 \cdot 10^{-3}$  %, raggiunto il quale ha inizio il decadimento, che inizialmente è abbastanza contenuto, ma che diventa invece piuttosto rapido a partire da ampiezze della deformazione superiori a  $2 \cdot 10^{-2}$  %, passando da valori del rapporto  $G/G_0$  pari a 0.8 a valori di 0.20 in corrispondenza di valori di  $g$  pari a 0.2 %. Le curve di variazione del rapporto di smorzamento mostrano un sensibile aumento di  $D$  a partire da una deformazione di taglio superiore a 0.02 %, arrivando a valori pari a circa 20% per livelli di deformazione dell' 1 %.

## 5. Alluvioni Terrazzate

Le alluvioni terrazzate sono state incontrate in 12 sondaggi e precisamente nelle verticali S1-78, S2-78, S3-78, S1-95, S2-95, S1-00, S4-00, S5-00, S7-00, S11-00, S24-00, S27-00, S30-00. Per la caratterizzazione meccanica, oltre alle prove in sito, sono stati analizzati N. 14 campioni indisturbati e su alcuni campioni prelevati con il campionatore SPT.

### 5.1 Proprietà meccaniche da prove statiche

La Tabella 9 a) riassume le principali proprietà indici, i parametri di deformabilità e di resistenza relativi ai 13 campioni esaminati. In Tabella 9 b) sono riportati i principali indici statistici delle suddette proprietà.

Le Figure 15 e 16 illustrano i risultati ottenuti nelle prove di classificazione. Più precisamente, la Figura 15 riporta le curve granulometriche di N. 21 campioni, di cui 10 si prelevati in prove SPT. La Figura 16 mostra i punti sperimentali sulla carta di plasticità di del Sistema Unificato di 10 campioni esaminati. I risultati delle prove edometriche sono riportati nella Figura 17, mentre i parametri di deformabilità da queste desunti sono mostrati nella Tabella 8.

Per quanto riguarda le misure di resistenza, nella Figura 18 si può osservare l'andamento sforzi-deformazioni ottenuto in prove di compressione ELL su 4 provini, mentre nella Figura 19 è riportato l'andamento con la profondità della coesione non drenata, determinata con penetrometro e torvane tascabili normalizzata con la pressione verticale efficace. In tale grafico è anche riportata la curva interpolante i dati sperimentali appartenenti ai primi 7 m, mentre per le successive quote è stato assunto e riportato il valore medio del rapporto di coesione.

Tabella 9: a) Proprietà indice, parametri di deformabilità e parametri di resistenza da prove statiche di laboratorio condotte su campioni appartenenti alle Alluvioni Terrazzate; b) Proprietà indice, parametri di deformabilità, parametri di resistenza e principali parametri statistici delle proprietà riportate

a)

Sondaggio-Anno	S1-78	S2-78	S3-78	S1-00	S4-00	S5-00	S7-00	S11-00	S24-00	S27-00
Campione	C1	C1	C1	C1	C2	C1	C1	C1	C1	C1
Z [m]	4,30	3,10	3,80	2,80	12,85	3,45	3,30	3,30	2,20	3,25
Z <sub>w</sub> [m]	-	-	-	7,00	4,50	11,00	20,00	4,50	4,50	7,00
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	18,54	19,62	19,77	20,20	20,59	20,36	19,22	19,80	18,49	19,60
q <sub>i</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	-	193,26	-	-	-	140,18	-	-
w <sub>L</sub> (%)	45,60	40,40	47,60	35,00	32,01	36,36	26,70	41	27,88	31,00
w <sub>p</sub> (%)	27,80	14,60	28,60	22,00	17,60	20,37	-	25	-	22,00
I <sub>p</sub> (%)	7,80	25,80	19,00	13,00	14,41	15,99	-	16	-	9,00
w (%)	30,50	22,80	26,30	25,00	19,76	21,79	22,09	28	26,23	13,00
I <sub>c</sub>	1,94	0,68	1,12	0,77	0,85	0,91	-	0,81	-	2,00
e <sub>0</sub>	0,80	0,67	0,79	0,594	0,538	0,522	0,634	0,654	0,807	0,588
c <sub>c</sub>	0,292	0,209	0,272	0,193	0,181	0,313	0,168	0,236	0,162	0,239
c <sub>s</sub>	0,049	0,042	0,051	0,037	0,041	0,093	0,016	0,057	0,023	0,023
OCR	2.5 - 5.0	2.5 - 4.9	2.6 - 4.0	3.5 - 5.3	1.0-1.4	4.9 - 8.4	4.7-7.9	1.8 - 3.2	2.0 - 4.8	3.1 - 4.7
K <sub>α</sub>	0.60-1.31	0.74 - 1.20	0.73 - 0.98	0.77 - 1.11	0.46-0.59	0.91 - 1.54	1.05-1.33	0.62 - 0.87	0.60 - 1.03	0.68 - 1.04
c' [kPa]	10,79	25,51	16,68	-	-	14,72	17,66	-	12,75	-
φ' (°)	27	24	21	-	-	25	28	-	28	-

b)

Sondaggio-Anno	S30-00			min	max	media μ	dev. std	coeff. di var. CV [%]	Val. Raccom. Vr [%]	CV min-max min-max
	C1	C2	C3							
Z [m]	4,30	9,50	13,30							
Z <sub>w</sub> [m]	12,00	12,00	12,00							
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	20,42	19,25	20,90	18,49	20,90	19,75	0,75	3,78	3	1-10
q <sub>i</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-	-	--	--
w <sub>L</sub> (%)	-	29,14	30,04	26,70	47,60	35,23	7,01	19,91	10	5-50
w <sub>p</sub> (%)	-	21,06	20,83	14,60	28,60	21,99	4,28	19,49	10	10-30
I <sub>p</sub> (%)	-	8,09	9,21	7,80	25,80	13,83	5,72	41,36	30	5-80
w (%)	20,42	22,82	17,17	13,00	30,50	22,76	4,65	20,43	--	--
I <sub>c</sub>	-	0,78	1,40	0,68	2,00	1,13	0,49	43,47	--	--
e <sub>0</sub>	0,530	0,658	0,458	0,46	0,81	0,63	0,11	17,71	25	15-30
c <sub>c</sub>	-	0,171	-	0,16	0,31	0,22	0,05	23,88	30	20-70
c <sub>s</sub>	-	0,019	-	0,02	0,09	0,04	0,02	53,98	--	--
OCR	-	1.0-1.6	1,0	1,00	8,40	-	-	-	--	--
K <sub>α</sub>	-	0.40-0.60	-	0,40	1,54	-	-	-	--	--
c' [kPa]	-	-	-	10,79	25,51	16,35	5,14	31,45	--	--
φ' (°)	-	-	-	21,00	28,00	25,50	2,74	10,74	--	10-50

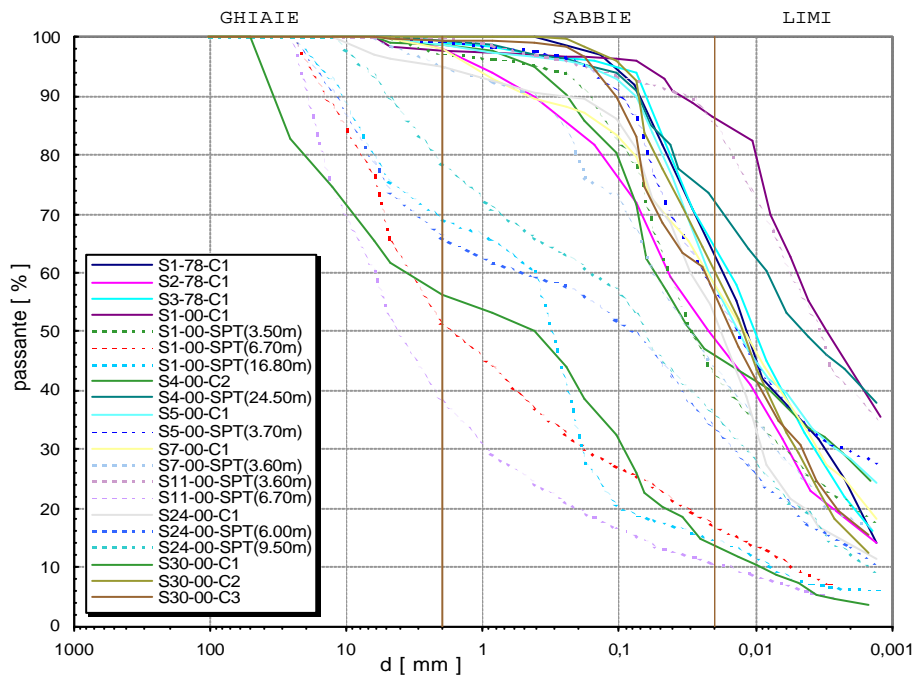


Figura 15: Curve granulometriche di materiale prelevato nelle alluvioni terrazzate

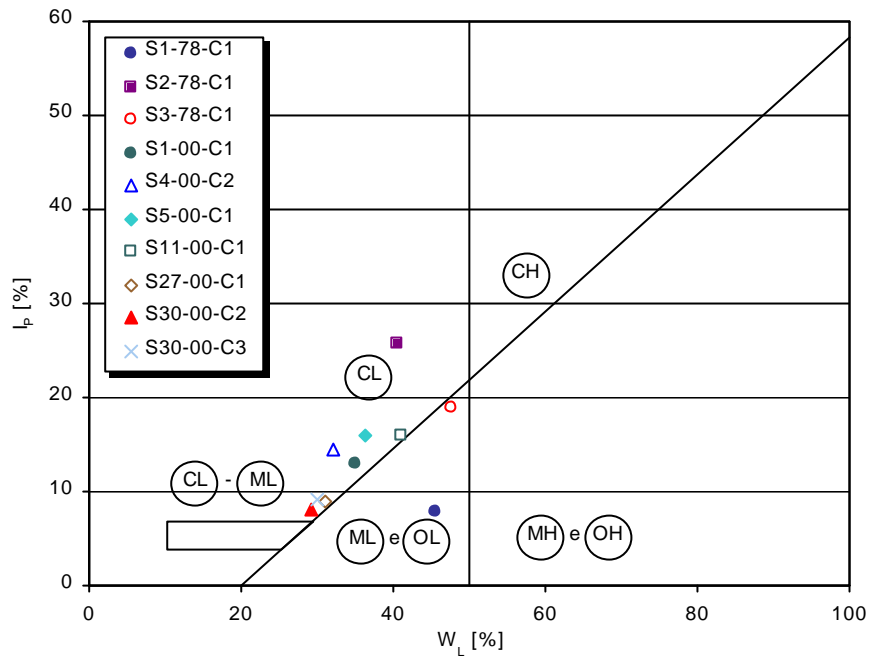


Figura 16: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

Tabella 10: Parametri ricavati e parametri stimati a partire dalle prove edometriche

	$c_c$	$c_s$	$\sigma_p'$ [kPa]	$\sigma_v'$ [kPa]	OCR	$K_0$	$\sigma_o'$ [kPa]
S1-78-C1	0,292	0,049	200	400	79,7	2,5 5,0	0,60 1,31 58 96
S2-78-C1	0,209	0,042	150	300	60,8	2,5 4,9	0,74 1,20 50 69
S3-78-C1	0,272	0,051	200	300	75,8	2,6 4,0	0,73 0,98 62 75
S1-00-C1	0,193	0,037	200	300	56,6	3,5 5,3	0,77 1,11 48 61
S4-00-C2	0,181	0,041	180	250	181,1	1,0 1,4	0,46 0,59 116 132
S5-00-C1	0,313	0,093	310	580	70,4	4,5 8,3	0,91 1,54 66 96
S7-00-C1	0,168	0,016	200	500	63,4	3,1 7,9	1,00 1,30 63 76
S11-00-C1	0,236	0,057	120	210	65,3	1,8 3,2	0,62 0,87 49 60
S24-00-C1	0,162	0,023	80	190	40,7	2,0 4,8	0,60 1,03 30 42
S27-00-C1	0,239	0,023	200	300	63,7	3,1 4,7	0,68 1,04 50 65
S30-00-C2	0,171	0,019	190	300	188,4	1,0 1,6	0,40 0,60 113 138

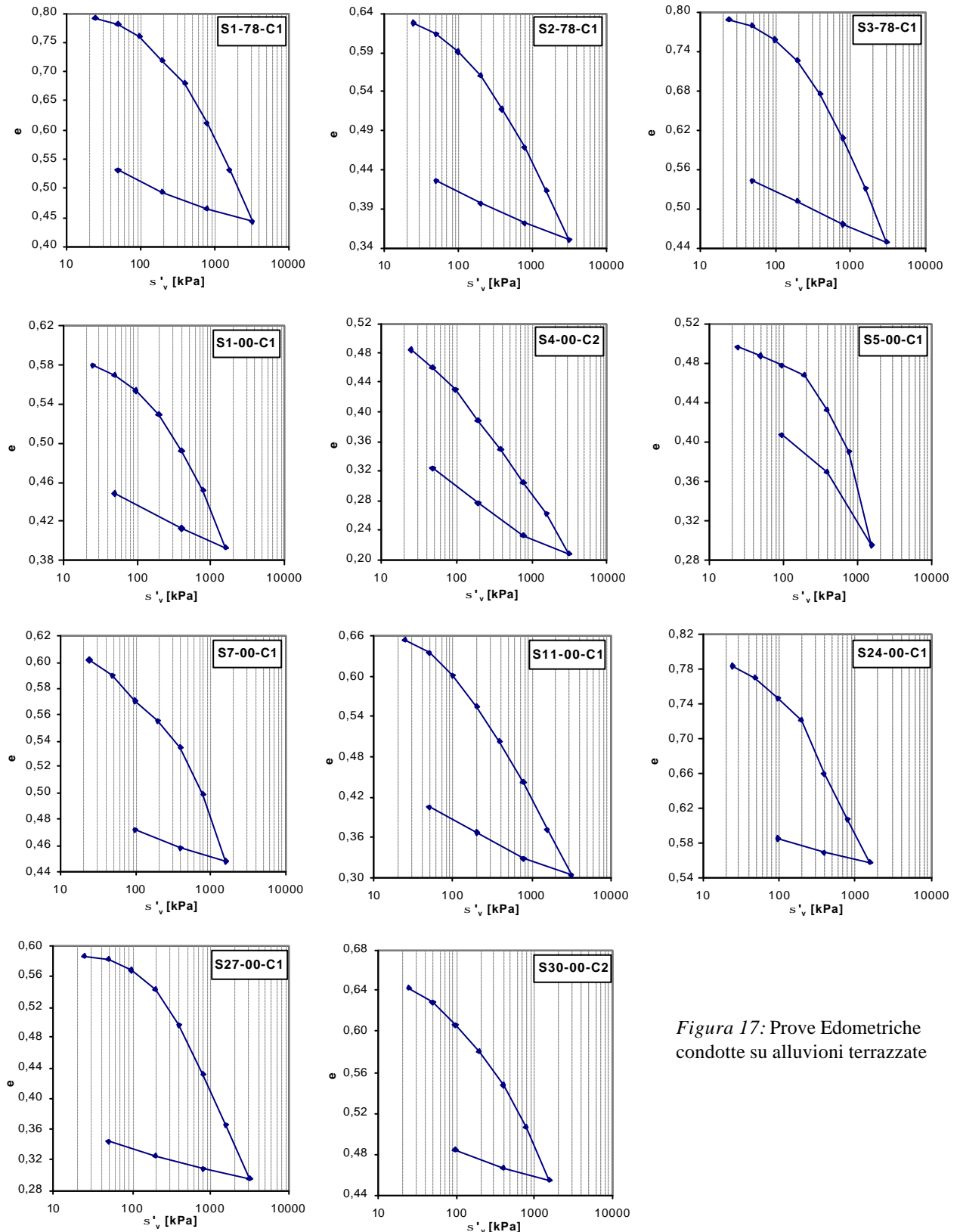


Figura 17: Prove Edometriche condotte su alluvioni terrazzate

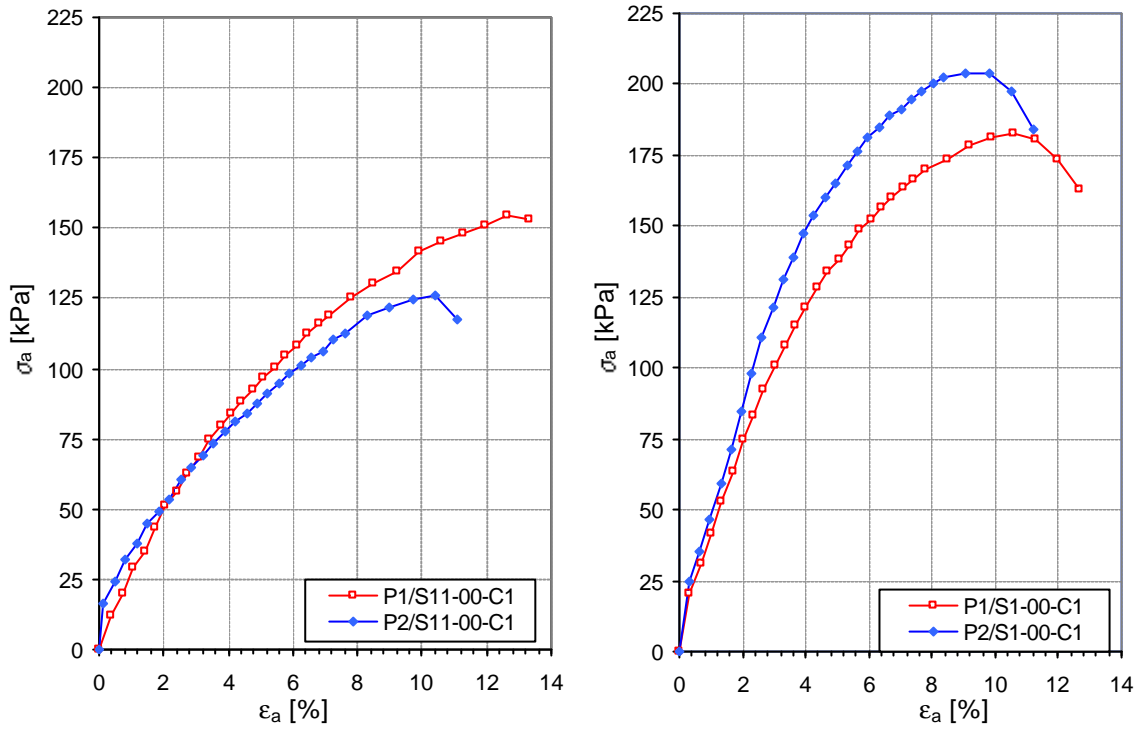


Figura 18: Prove ELL su quattro provini ricavati da due campione prelevati nelle alluvioni terrazzate

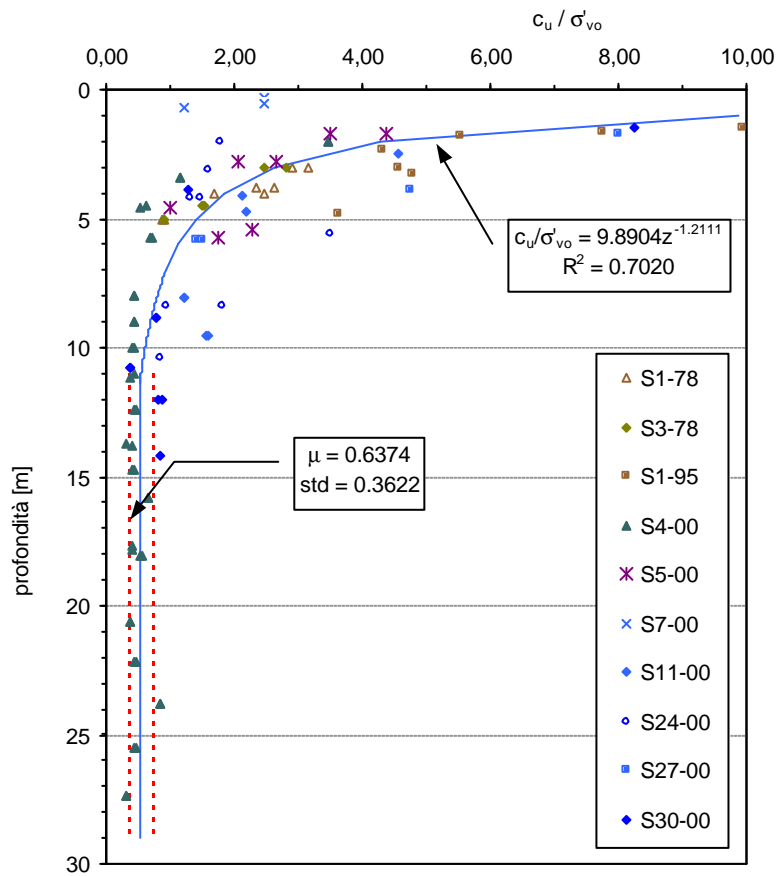


Figura 19: Valori di  $c_u$  normalizzati con la pressione efficace determinati in sito con penetrometro e torvane tascabili

## 5.2 Proprietà meccaniche da prove dinamiche

Per la determinazione delle proprietà dinamiche sono state utilizzate le stesse verticali, su cui sono state eseguite misure di  $N_{SPT}$ , N. 8 prove DH (delle quali due ripetute nella verticale S4-00) e N. 2 prove CH ed infine misure con la RC e il TTC su N. 1 campione.

Nella Figura 20 sono riportati i valori del numero dei colpi  $N_{SPT}$  in funzione della profondità. Nelle Figure 21 e 22 sono riportati i profili delle  $V_S$  relativi ai singoli sondaggi. Nella Figura 23a, 23b e 23c tali profili sono stati raggruppati in relazione alla granulometria.

Le prove dinamiche in laboratorio con l'apparecchio di RC e TTC sono state effettuate su N. 1 campione (S1-00-C1). Come già detto, a proposito delle alluvioni recenti, i campioni S11-00-C1 e S27-00-C1 non sono stati classificati con certezza come appartenenti alla formazione delle alluvioni recenti e pertanto i risultati ottenuti su tali campioni sono stati utilizzati come riferimento anche per la caratterizzazione dinamica di entrambe le formazioni.

Si rimanda pertanto alle figure e alle tabelle relative alla caratterizzazione dinamica delle alluvioni terrazzate (Figure da 10 a 13 e Tabelle da 4 a 8).

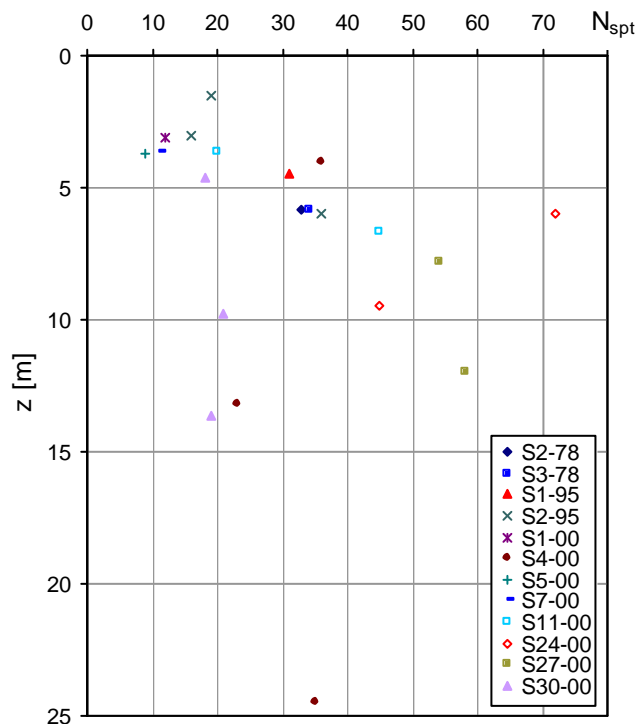


Figura 20: Valori di  $N_{SPT}$  in funzione della profondità determinati su alluvioni terrazzate



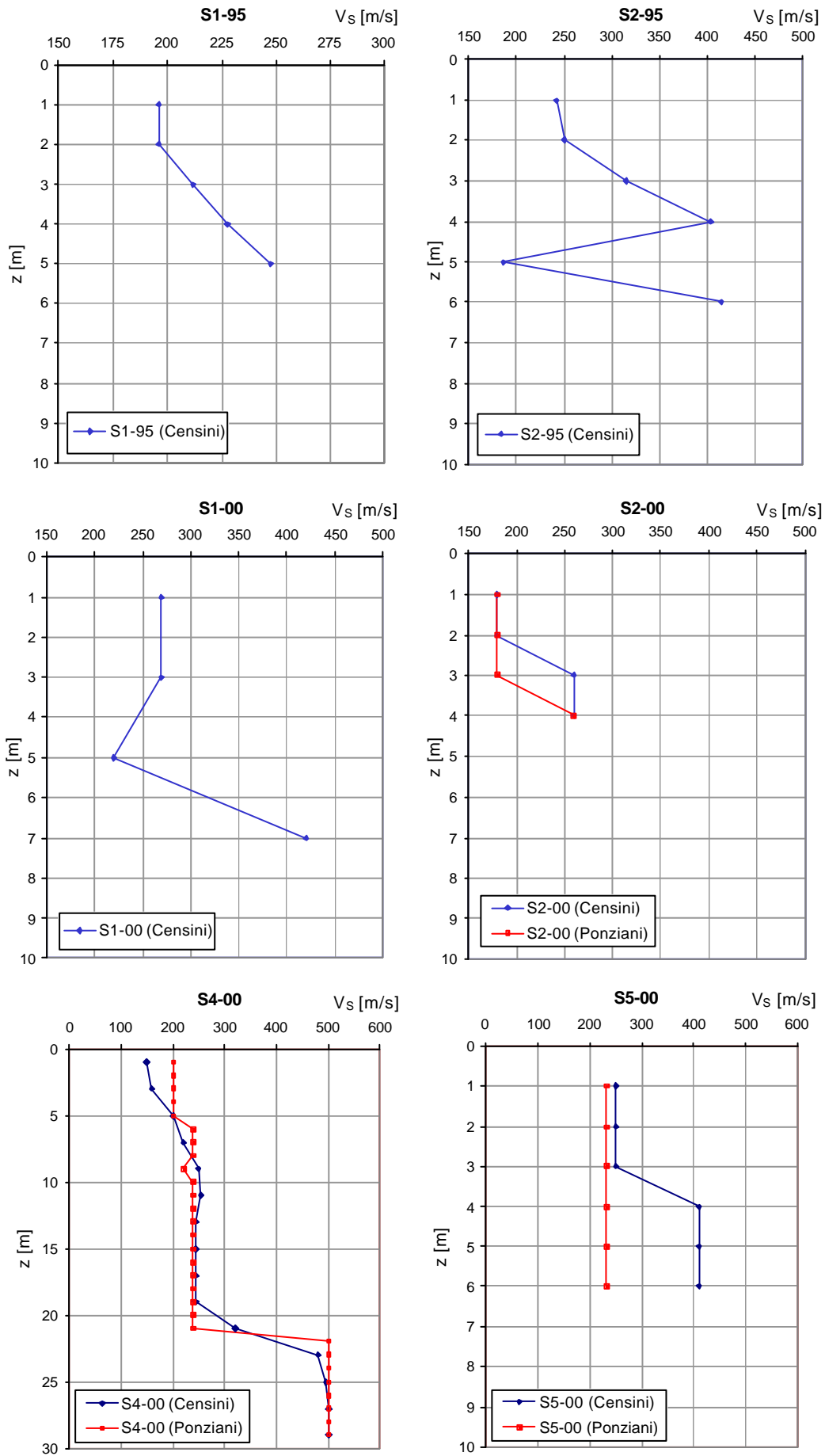


Figura 21: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH nelle alluvioni terrazzate

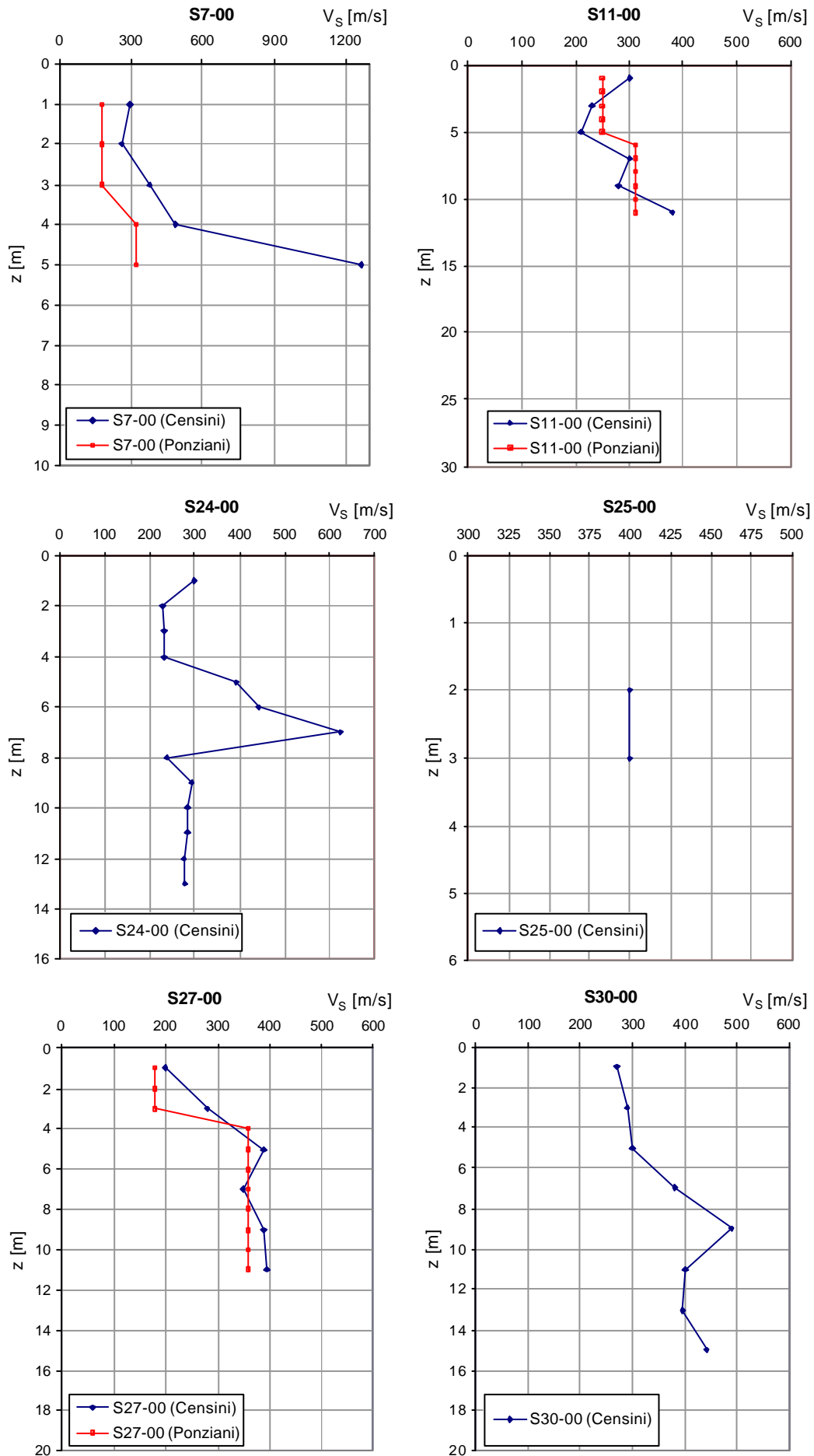


Figura 22: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH e CH nelle alluvioni terrazzate

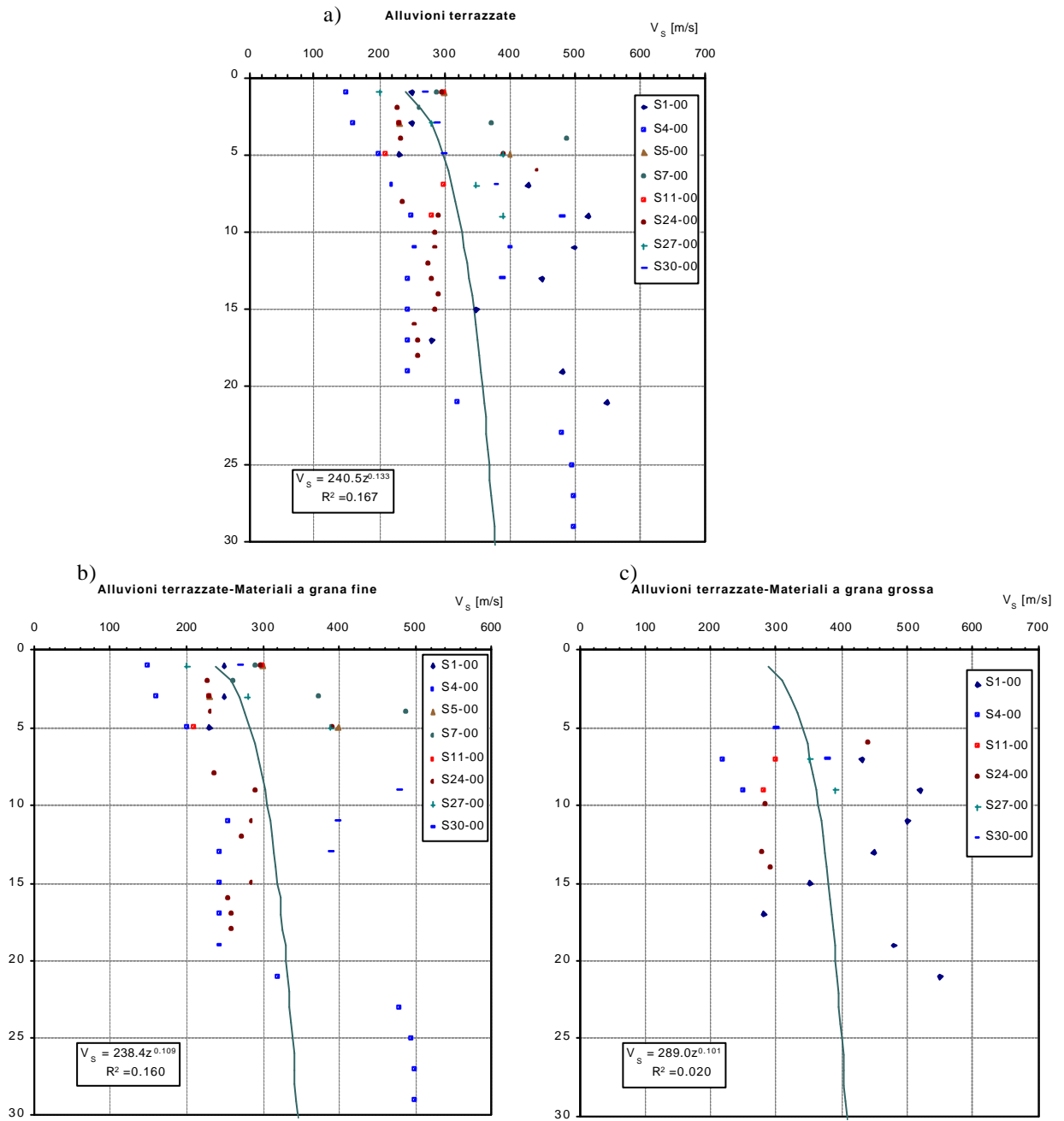


Figura 23: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante regressione dai dati sperimentali; a) per le alluvioni terrazzate, b) per i materiali fini presenti nelle alluvioni terrazzate, c) per i materiali a grana grossa delle alluvioni terrazzate.

### 5.3 Sintesi delle proprietà geotecniche

Nel sintetizzare le proprietà delle alluvioni terrazzate, occorre tenere presente che i campioni studiati in laboratorio - ad eccezione di due campioni prelevati nel sondaggio S30 alla profondità di 9.50 m e 13.30 m, di un campione prelevato nel sondaggio S4-00 a 12.85 m, e di alcuni campioni da prove SPT su cui è stata effettuata solo la granulometria - sono stati estratti sempre a quote comprese fra 2.20 m e 4.30 m, in strati superficiali che risentono particolarmente della storia locale di sovraconsolidazione e delle trasformazioni antropiche. Questo fatto è la principale causa delle elevate dispersioni riscontrate e limita il campo di applicabilità dei risultati di laboratorio.

#### *Proprietà in condizioni statiche*

Benché caratterizzate da una dispersione elevata - seppure nei limiti della variabilità intrinseca generalmente riscontrata per le singole proprietà - le proprietà geotecniche delle alluvioni terrazzate possono così riassumersi.

- a) *Proprietà indici* - Dal punto di vista della composizione granulometrica, i materiali esaminati sono classificabili in due gruppi: un gruppo a prevalente componente ghiaioso-sabbiosa (con percentuale di fini variabile tra il 10 e il 30%) e un gruppo costituito in prevalenza da limi, con percentuali variabili di sabbia e argilla, generalmente comprese tra il 10 e il 25%. Con riferimento alle correnti classifiche geotecniche, i materiali risultano essere generalmente poco plastici (con indice di plasticità variabile tra 8 e 15%, e solo eccezionalmente con valori superiori), di natura inorganica e di bassa compressibilità, di consistenza da solido-plastica a semisolida.
- b) *Proprietà di deformabilità* - I materiali sono mediamente poco deformabili ( $c_c < 0.3$ ) e con indice di rigonfiamento molto variabile, passando da valori medio-bassi a valori medio-alti. I valori stimati del grado di sovraconsolidazione sono piuttosto incerti e non permettono di dare un giudizio sicuro sulla storia dei campioni esaminati. Tuttavia sembra ragionevole considerare normalconsolidati o debolmente consolidati i campioni S4-00-C2, S30-00-C2 e S30-00-C3 (estratti a profondità maggiore di 9.50), e sovraconsolidati gli altri
- c) *Proprietà di resistenza* - I pochi campioni esaminati in laboratorio hanno mostrato un comportamento generalmente di tipo elasto-plastico, in alcuni casi con rottura di tipo fragile. Tranne i campioni S4-00-C2, S30-00-C2 e S30-00-C3, sono dotati di coesione anche in condizioni drenate a conferma che si tratta di materiali sovraconsolidati. In sito, la coesione non drenata normalizzata con la pressione litostatica, determinata con strumenti speditivi, è fortemente dipendente dalla profondità nei primi 10 m ed è poi praticamente costante. I valori di  $N_{SPT}$ , oltre che in numero abbastanza ridotto, sono molto dispersi; tuttavia nell'andamento di

$N_{SPT} \subset z$  è possibile identificare due diversi trend medi, uno per i materiali compresi nei primi 10 m di profondità (e che dalle prove di laboratorio sono risultati sovraconsolidati), e un altro per quelli a profondità superiori (normalconsolidati o debolmente sovraconsolidati, caratterizzati da valori di  $N_{SPT}$  corrispondenti a materiali poco consistenti).

*Proprietà in condizioni dinamiche*

- a) *Valori iniziali di  $G_0$*  - I valori iniziali della rigidezza,  $G_0$ , desumibili dai valori di  $V_s$  misurati in sito, indicano, in qualche caso, una dipendenza con la profondità, ma non è un risultato generalizzabile dal momento che la correlazione  $V_s \subset z$  è caratterizzata da valori di  $R^2$  estremamente bassi.
- b) *Valori iniziali di  $D_0$  e leggi di variazione dei parametri dinamici con l'ampiezza della deformazione di taglio* - Come precedentemente segnalato, i risultati delle prove di laboratorio di tipo dinamico sono stati considerati insieme a quelli delle alluvioni recenti. Si rimanda pertanto ai paragrafi 4.2 e 4.3.

## 6. Sintema di Fighille

Per la caratterizzazione dei materiali prelevati nel Sintema di Fighille sono stati utilizzati i sondaggi S1-78, S2-78; S3-78, S1-95, S1-00, S5-00, S10-00, S11-00, S24-00, S27-00, S30-00 e i risultati di prove di laboratorio su 24 campioni indisturbati (S1-78-C2, S1-78-C3, S1-78-C4, S2-78-C2, S2-78-C3, S3-78-C2, S3-78-C3, S1-95-C2, S1-95-C3, S1-00-C2, S1-00-C3, S1-00-C4, S1-00-C5, S5-00-C2, S5-00-C3, S10-00-C2, S11-00-C2, S11-00-C3, S24-00-C3, S24-00-C4, S27-00-C2, S27-00-C3, S27-00-C4 e S30-00-C5) e su alcuni campioni prelevati con il campionatore SPT.

### 6.1 Proprietà meccaniche da prove statiche

Le Tabelle 11a) ed 11b) riportano le proprietà indici e i parametri fisici, di deformabilità e di resistenza relativi ai 24 campioni e i principali indici statistici delle suddette proprietà.

Nelle Figure 24 e 25 sono riportati i risultati delle prove indici. Più precisamente, la Figura 24 riporta le curve granulometriche di 24 campioni, di cui 6 prelevati in prove SPT. La Figura 25 mostra i punti sperimentali sulla carta di plasticità adottata nel Sistema Unificato (USCS) di 18 campioni indisturbati. I risultati delle prove edometriche sono riportati nella Figura 26, mentre i parametri di deformabilità da queste desunti sono mostrati nella Tabella 12.

Per quanto riguarda le misure di resistenza, nella Figura 27 si può osservare l'andamento sforzi-deformazioni ottenuto in prove di compressione ELL, mentre nella Figura 28 è riportato l'andamento con la profondità della coesione non drenata, determinata con penetrometro e torvane tascabili, normalizzata con la pressione verticale efficace. In tale grafico sono anche riportate le curve interpolanti nei primi 20 m e per tutta la serie dei dati, inoltre per le quote maggiori a 20 m è stato e riportato il valore medio del rapporto di coesione.

Tabella 11: Proprietà indice, parametri di deformabilità e parametri di resistenza da prove statiche di laboratorio condotte su materiali appartenenti al Sintema di Fighille

Sondaggio-Anno	S1-78			S2-78		S3-78		S1-95		S1-00					S5-00	
Campione	C2	C3	C4	C2	C3	C2	C3	C2	C3	C2	C3	C4	C5	C2	C3	
Z [m]	15,30	18,30	24,30	15,20	17,50	15,10	16,60	14,25	20,25	24,10	29,25	51,25	67,40	9,10	19,25	
Z <sub>w</sub> [m]	-	-	-	-	-	-	-	5,60	5,60	7,00	7,00	7,00	7,00	11,00	11,00	
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	18,64	19,62	18,44	19,03	19,23	18,00	18,83	21,1	21,7	18,80	18,92	20,10	20,16	20,08	20,26	
q <sub>v</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	39,28	192,65	-	142,71	
w <sub>L</sub> (%)	63,60	47,40	59,30	64,80	49,00	55,70	61,50	37	33	70	41,61	32,75	45,08	24,44	22,10	
w <sub>p</sub> (%)	29,00	28,90	35,20	28,10	26,70	31,00	30,50	21	21	30	22,61	18,66	21,10	-	-	
I <sub>p</sub> (%)	34,60	18,50	24,10	36,70	22,30	24,70	31,00	16	12	40	19,00	14,09	22,98	-	-	
w (%)	30,00	25,50	35,40	30,70	26,10	37,60	29,20	19,3	20	36	29,31	21,08	26,51	21,79	21,28	
I <sub>c</sub>	0,97	1,19	0,99	0,93	1,03	0,73	1,04	1,11	1,08	0,85	0,65	0,83	0,81	-	-	
e <sub>o</sub>	0,88	0,72	0,98	0,82	0,75	-	0,82	0,477	0,505	0,890	0,766	0,548	0,614	0,599	0,559	
c <sub>c</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0,136	-	0,345	0,352	-	-	0,151	-	
c <sub>s</sub>	-	-	-	-	-	-	-	0,036	-	0,096	0,076	-	-	0,018	-	
OCR	-	-	-	-	-	-	-	1,0 - 1,9	-	0,9 - 1,3	1,0 - 1,2	-	-	1,0 - 2,6	-	
K <sub>o</sub>	0,826	0,658	-	-	0,733	0,741	-	0,47 - 0,71	-	0,56 - 0,67	0,49 - 0,62	-	-	0,53 - 0,83	-	
c' [kPa]	26,48	28,45	-	-	30,41	26,49	-	57,88	-	-	-	11,77	-	11,77	-	
φ' (°)	9	20	-	-	15	15	-	-	-	-	-	-	-	27	-	

Sondaggio-Anno	S10-00		S11-00		S24-00		S27-00			S30-00	min		max		media	dev. std	coeff. di var.	Val. Raccom.	CV min-max
Campione	C2	C2	C3	C3	C4	C2	C3	C4	C5					μ		CV [%]	Vr [%]	min-max	
Z [m]	21,35	13,50	36,25	14,75	23,10	16,25	24,25	28,7	36,2										
Z <sub>w</sub> [m]	27,50	4,50	4,50	4,50	4,50	7,00	7,00	7,00	12,00										
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	19,82	18,36	19,27	20,50	19,72	20,61	19,06	20,8	21,94		18,00	21,94	19,71	1,05	5,33		3	1-10	
q <sub>v</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	144,87	288,62	69,10	-	-	-	-	-			146,21	-	-		--	--	
w <sub>L</sub> (%)	49,46	49,23	37,50	32	25,60	28,12	19,15	53	31,054	19,15	70,00	43,02	14,82	34,45	10	5-50			
w <sub>p</sub> (%)	18,41	25,72	20,91	19	-	-	-	26	19,547	18,41	35,20	24,91	5,05	20,28	10	10-30			
I <sub>p</sub> (%)	31,05	23,51	16,59	13	-	-	-	27	11,51	11,51	40,00	23,09	8,56	37,09	30	5-80			
w (%)	23,40	29,85	25,48	23	20,86	25,47	21,64	21,1	13,39	13,39	37,60	25,58	5,84	22,81	--	--			
I <sub>c</sub>	0,84	0,82	0,72	0,69	-	-	-	1,18	1,54	0,65	1,54	0,95	0,22	22,86	--	--			
e <sub>o</sub>	0,627	0,877	0,661	0,582	0,600	0,592	0,688	0,516	0,365	0,37	0,98	0,67	0,16	23,17	25	15-30			
c <sub>c</sub>	0,132	0,274	-	0,236	-	0,09	-	0,169	-	0,09	0,35	0,21	0,10	46,01	30	20-70			
c <sub>s</sub>	0,059	0,063	-	0,037	-	0,028	-	0,051	-	0,02	0,10	0,05	0,02	47,98	--	--			
OCR	1,0 - 1,7	1,0 - 1,5	-	1,6 - 2,1	-	1,0 - 1,8	-	1,0	1,0	1,00	2,60	-	-	-	--	--			
K <sub>o</sub>	0,54 - 0,72	0,51 - 0,66	-	0,55 - 0,71	-	0,56 - 0,74	-	-	-	0,49	0,83	-	-	-	--	--			
c' [kPa]	-	23,54	-	-	-	38,26	-	-	-	11,77	57,88	28,34	13,94	49,19	--	--			
φ' (°)	-	26	-	-	-	26	-	-	-	9,00	28,00	21,22	6,78	31,94	--	--		10-50	

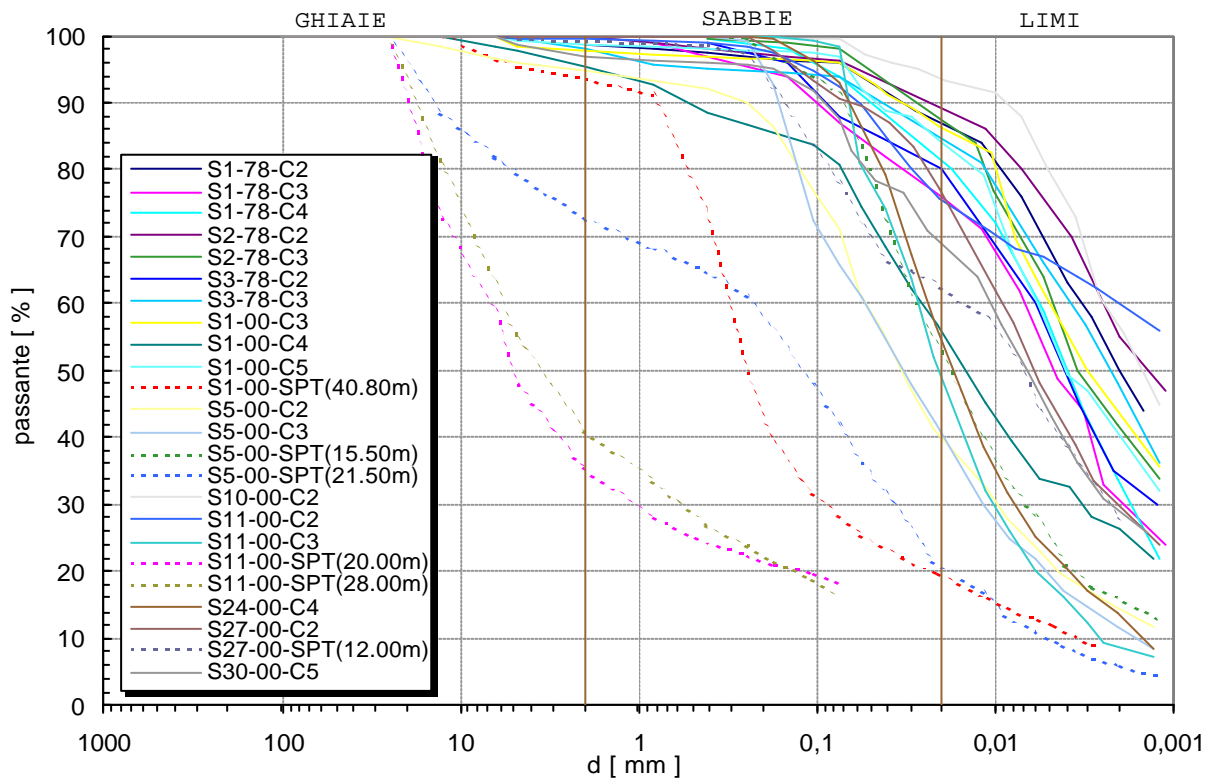


Figura 24: Curve granulometriche di materiale prelevato nel Sintema di Fighille

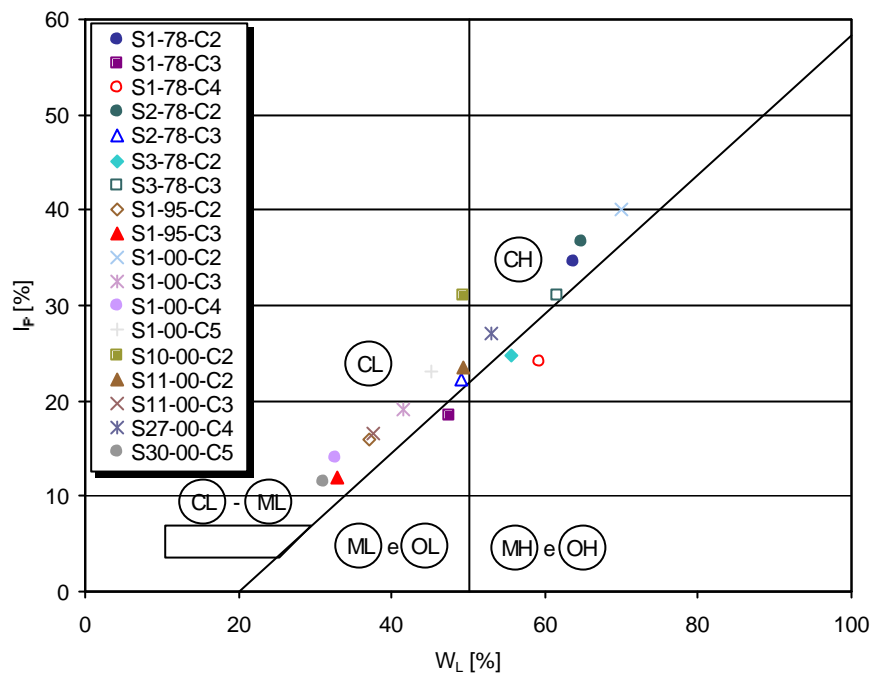


Figura 25: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

Tabella 12: Parametri ricavati e parametri stimati a partire da prove edometriche condotte su materiali appartenenti al Sintema di Fighille

	$c_c$	$c_s$	$\sigma_p'$ [kPa]	$\sigma_v'$ [kPa]	OCR	$K_0^{(*)}$	$\sigma_o'$ [kPa]				
S1-95-C2	0,136	0,036	210	400	214,0	1,0	1,9	0,47	0,71	138	173
S1-00-C2	0,345	0,096	270	400	299,0	0,9	1,3	0,56	0,67	211	233
S1-00-C3	0,352	0,076	320	400	330,0	1,0	1,2	0,49	0,57	217	235
S5-00-C2	0,151	0,018	120	310	118,4	1,0	2,6	0,47	0,80	77	103
S10-00-C2	0,132	0,059	230	400	230	1,0	1,7	0,54	0,72	159	187
S11-00-C2	0,274	0,063	200	300	200	1,0	1,5	0,51	0,65	135	153
S24-00-C3	0,236	0,037	310	410	194,1	1,6	2,1	0,55	0,71	136	157
S27-00-C2	0,090	0,028	210	400	216,3	1,0	1,8	0,41	0,65	132	166

(\*) Sono riportati il valore massimo e minimo fra quelli stimati con le relazioni (1)



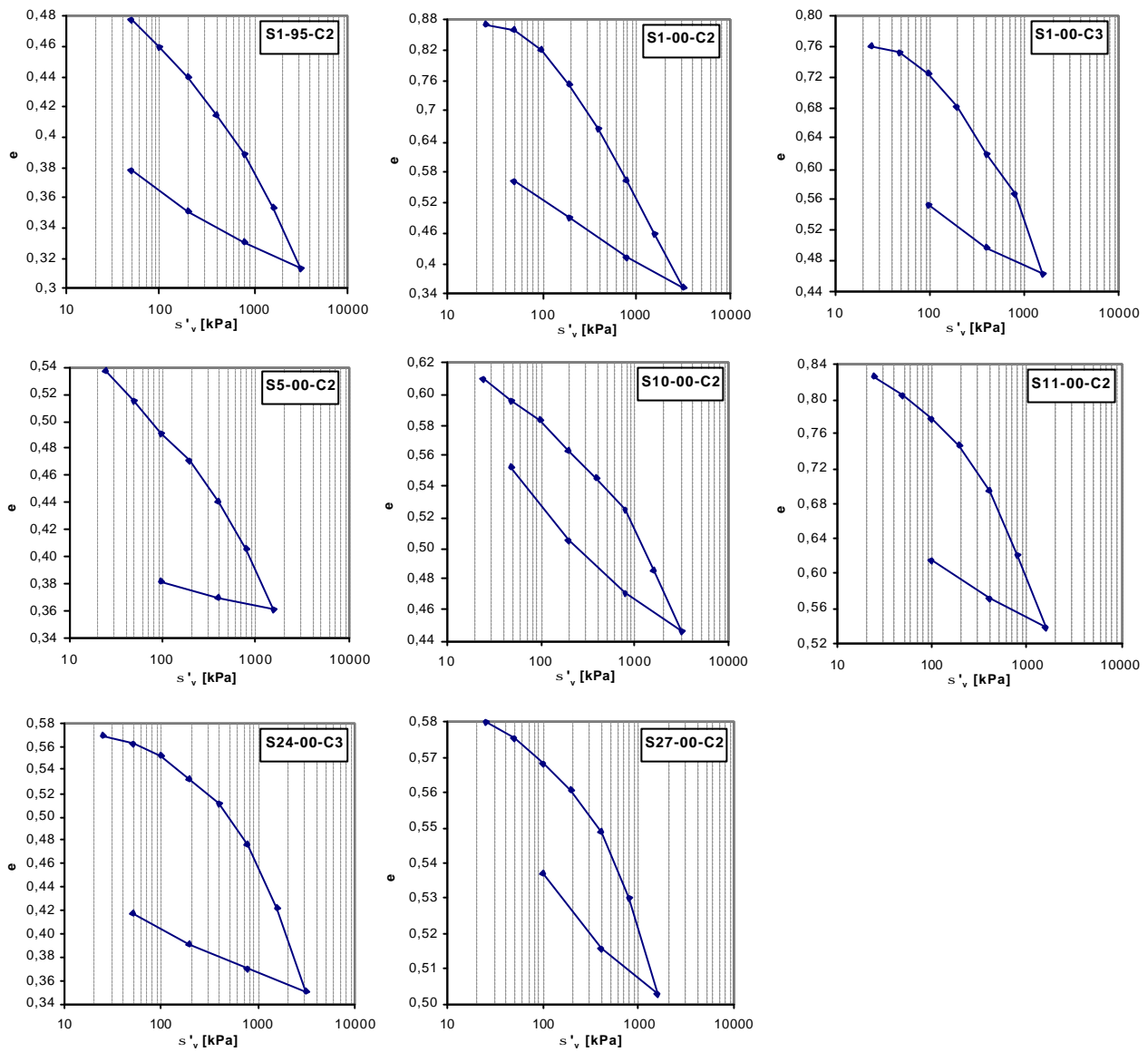


Figura 26: Prove Edometriche condotte su materiali prelevati nel Sintema di Fighille

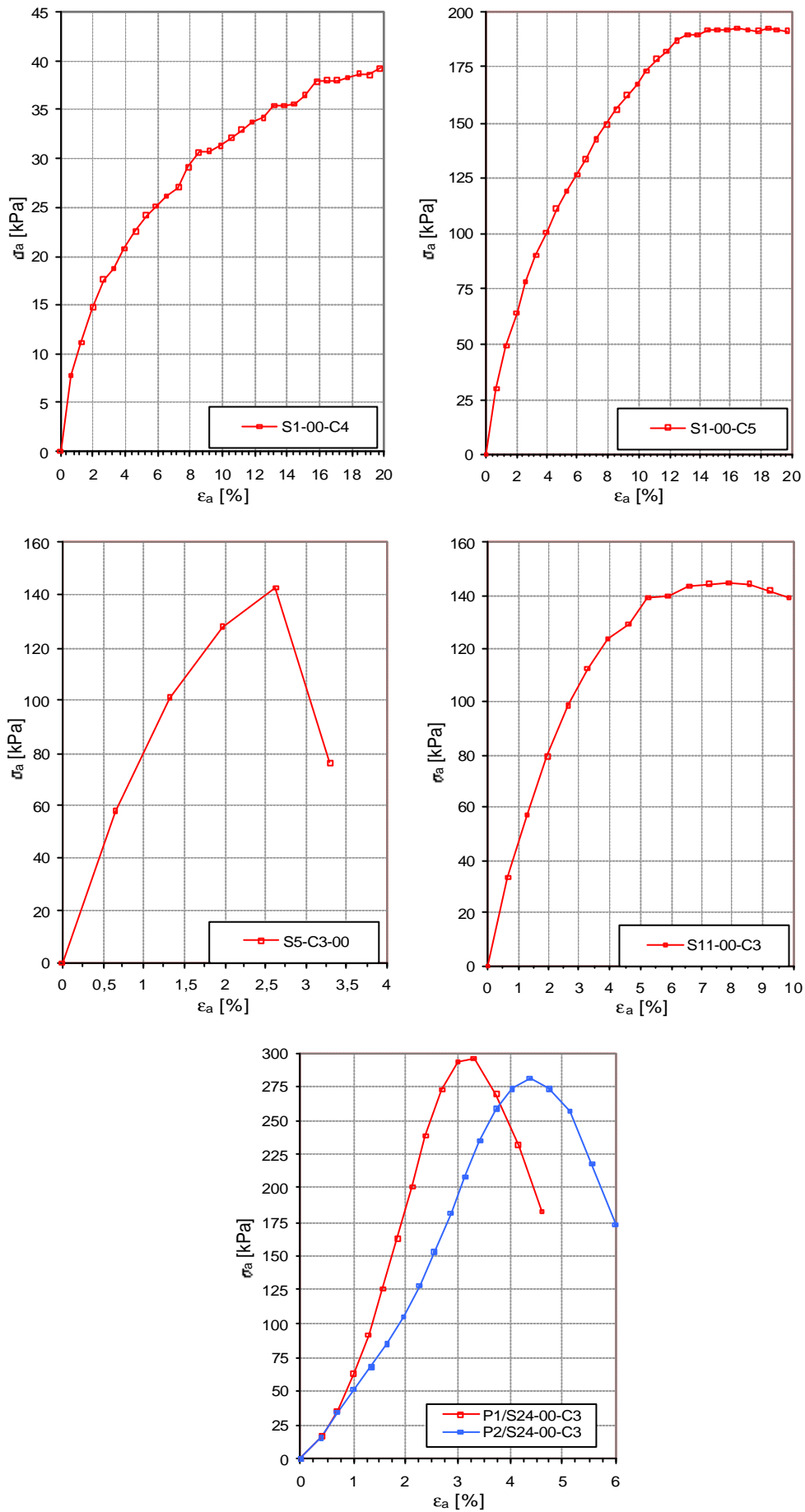


Figura 27: Prove ELL su due provini ricavati da campioni prelevati nel Sintema di Fighille

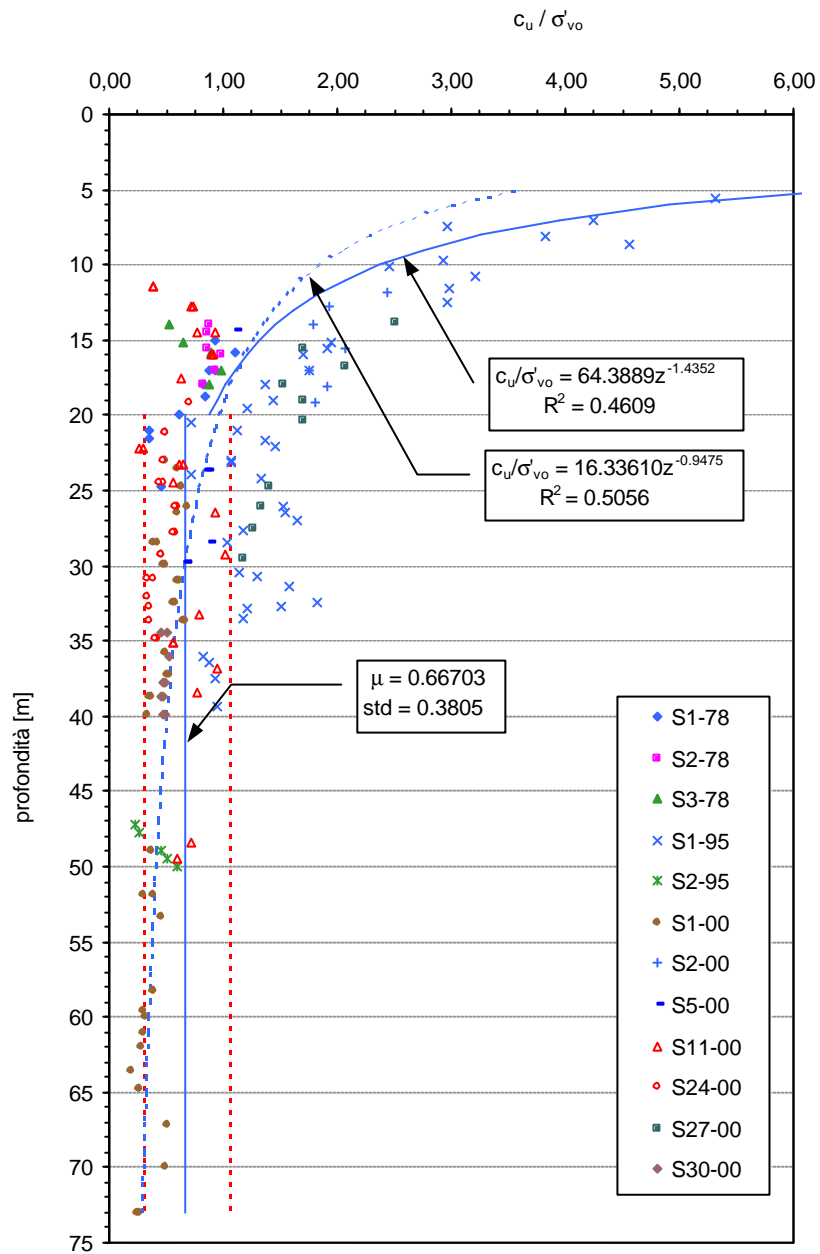


Figura 28: Valori di  $c_u$  normalizzati con la pressione efficace determinati in sito con penetrometro e torvane tascabili

## 6.2 Proprietà meccaniche da prove dinamiche

Per la determinazione delle proprietà dinamiche sono state utilizzate le stesse verticali, su cui sono state eseguite misure di  $N_{SPT}$ , N. 7 prove DH, N. 1 prova CH e misure con l'apparecchiatura di colonna risonante (RC) e di taglio torsionale ciclico (TTC) su N. 4 campioni (S1-95-C2, S1-95-C3, S1-00-C2 e S24-00-C3).

Nella Figura 29 sono riportati i valori del numero di colpi  $N_{SPT}$ . Nelle Figure 30 e 31 sono riportati i profili delle  $V_S$  relativi ai singoli sondaggi. Nella Figura 32 i valori di  $V_S$  relativi a tali profili sono stati interpolati con una funzione potenza.

Le prove dinamiche in laboratorio con l'apparecchio RC e TTC sono state effettuate su N. 4 campioni (S1-95-C2, S1-95-C3, S1-00-C2 e S24-00-C3).

In Tabella 13 sono riportati i valori delle deformazioni di taglio corrispondenti alla soglia elastica,  $g$ , ed alla soglia volumetrica,  $g_v$ .

I parametri dei modelli di Ramberg & Osgood e di Yokota et al. ( $a$ ,  $b$ ,  $C$  e  $R$ ) sono stati determinati mediante regressioni lineari su variabili logaritmiche e sono indicati nella Tabella 14.

I valori dei parametri del modello rappresentante il rapporto di smorzamento ( $D_{max}$  e  $I$ ) sono riportati in Tabella 14.

Gli andamenti del modulo di taglio normalizzato,  $G/G_0$ , e del rapporto di smorzamento,  $D$ , ottenuti in funzione dell'ampiezza dello sforzo di taglio sono riportati nelle Figure 33 e 34. In tali Figure sono riportati anche i punti sperimentali dei campioni classificati come appartenenti al Sintema di Fighille.

Nella Tabella 15 sono riportati per i tre campioni i valori di  $G_0$  ottenuti nella prova multistage di RC in corrispondenza dei diversi valori della pressione di confinamento,  $s'_c$ , e dell'indice dei vuoti  $e_o$ .

Al fine di caratterizzare con un unico la formazione, è stata assunta, nelle Figure 35 e 36, un'unica curva interpolante. In particolare in Figura 35 sono riportate le curve adattate ai dati sperimentali secondo i modelli di Ramberg & Osgood e di Yokota et Al. In Figura 36 è riportato l'andamento del rapporto di smorzamento. Per confronto si riportano in Figura 37 l'andamento della legge di decadimento,  $G(g)$ , trovata per i materiali appartenenti al Sintema di Fighille con le leggi di decadimento trovate per materiali coesivi da vari autori. Il modello di adattamento ai dati sperimentali riportato in tale figura è quello di Yokota et al.,

Per facilitare l'utilizzazione di tali risultati e il loro inserimento nei modelli usualmente impiegati nel calcolo della risposta sismica locale, è stata preparata la Tabella 16, in cui accanto ai diversi valori dell'ampiezza della deformazione di taglio sono riportati i corrispondenti valori di  $G/G_0$  e di

D. In Tabella 17, sono riportati i coefficienti delle regressioni effettuate sull'insieme dei dati sperimentali dei campioni provenienti dal Sintema di Fighille.

Tabella 13: Valori della soglia elastica e della soglia volumetrica

	$\gamma_l$ [%]	$\gamma_v$ [%]
S1-95-C2	0,0037	0,017
S1-95-C3	0,0034	0,023
S1-00-C2	0,0141	0,110
S24-00-C3	0,0051	0,024

Tabella 14: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici ai dati sperimentali

	S1-95-C2	S1-95-C3	S1-00-C2	S24-00-C3
$\alpha$	61,560	44,259	21,782	31,268
$\beta$	1,264	1,264	1,498	1,159
$r^2$	0,996	0,972	0,987	0,988
C	6635,903	2864,178	197,651	2702,091
R	3,081	2,902	2,910	3,034
$r^2$	0,997	0,999	0,971	0,993
$D_{max}$ [%]	17,47	41,54	25,39	19,34
$\lambda$	-2,37	-3,19	-2,38	-2,46
$r^2$	0,944	0,993	0,973	0,984

Tabella 15: Valori sperimentali di  $G_0$  in funzione di  $\sigma_0$  ed

Prova Campione	RC S1-95-C2			RC S1-95-C3			RC S1-00-C2			TTC S1-00-C2	RC S24-00-C3			TTC S24-00-C3
	$G_0$ [MPa]	83,5	144,4	249,2	55,9	131,8	199,7	28,4	45,8	72,4	68,67	38,8	82,5	133,8
$s_0'$ [MPa]	0,055	0,15	0,3	0,037	0,15	0,3	0,045	0,15	0,3	0,3	0,025	0,1	0,2	0,2
$e_0$	0,466	0,453	0,444	0,505	0,48	0,466	0,975	0,922	0,846	0,979	0,613	0,593	0,575	0,617

Tabella 16: Legge di decadimento del modulo di taglio e legge di smorzamento in formato numerico

Sintema di Fighille		
$\gamma$ [%]	$G/G_0$	D
0,0000	1,0000	1,85523
0,0001	0,9999	1,85585
0,0002	0,9997	1,85677
0,0005	0,9987	1,86137
0,0007	0,9976	1,86685
0,0012	0,9943	1,88280
0,0017	0,9906	1,90091
0,0021	0,9866	1,92061
0,0028	0,9781	1,96368
0,0035	0,9690	2,01065
0,0042	0,9595	2,06082
0,0048	0,9497	2,11374
0,0054	0,9398	2,16911
0,0061	0,9297	2,22670
0,0067	0,9195	2,28632
0,0073	0,9093	2,34783
0,0137	0,8091	3,04480
0,0208	0,7193	3,84427
0,0287	0,6420	4,69894
0,0377	0,5762	5,57467
0,0478	0,5202	6,44683
0,0590	0,4724	7,29852
0,0712	0,4314	8,11882
0,0847	0,3959	8,90129
0,0992	0,3651	9,64262
0,1149	0,3381	10,34173
0,1318	0,3144	10,99896
0,2334	0,2294	13,71636
0,3642	0,1777	15,68461
0,5243	0,1435	17,13918
0,7136	0,1195	18,24243
0,9603	0,1000	19,18990
1,1433	0,0900	19,69459

Tabella 17: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici all'insieme dei dati sperimentali

FIG	
$\alpha$	42,073
$\beta$	1,323
$r^2$	0,856
C	467,627
R	2,686
$r^2$	0,870
$D_{max}$ [%]	24,878
$\lambda$	-2,596
$r^2$	0,915

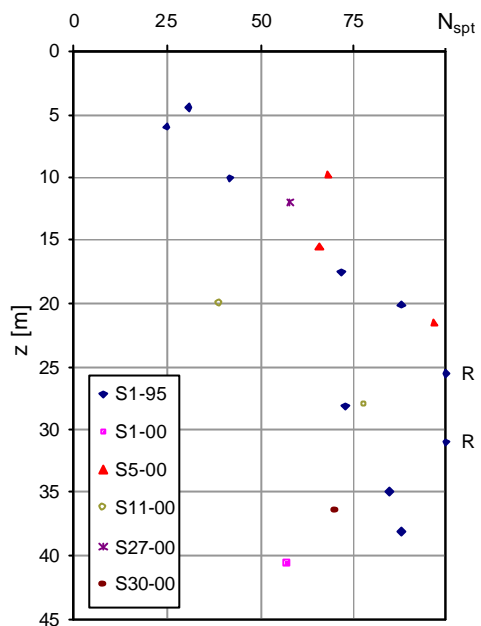


Figura 29: Valori di  $N_{SPT}$  in funzione della profondità

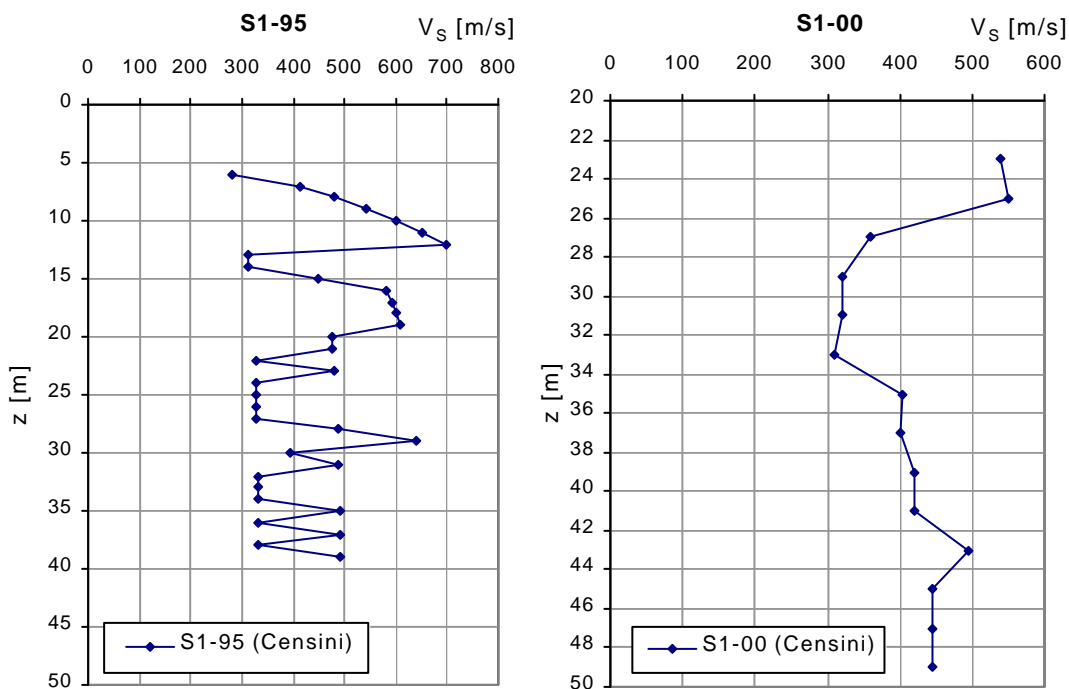


Figura 30: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH nel Sintema di Fighille

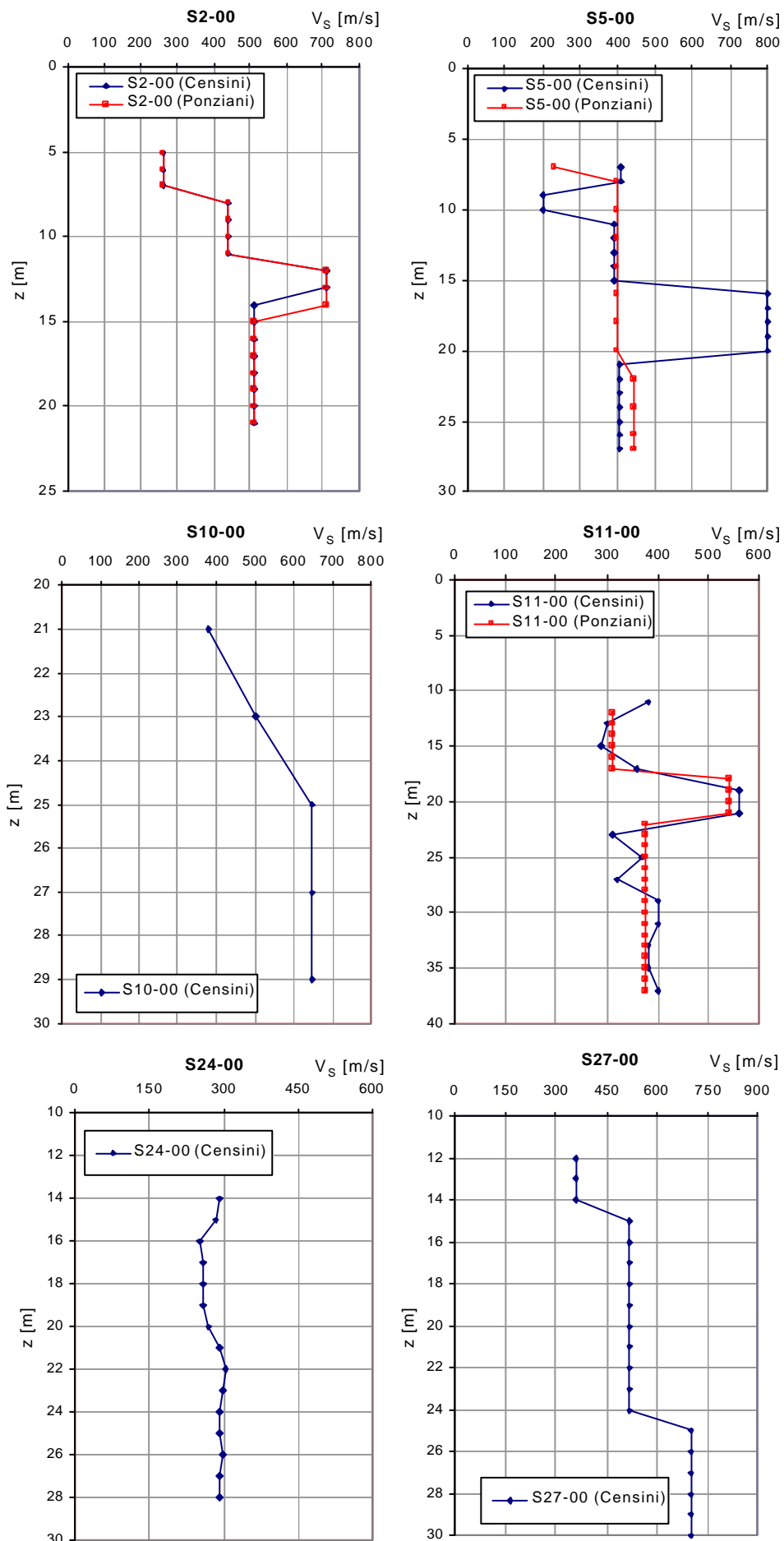


Figura 31: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH (ad eccezione del profilo di velocità relativo al sondaggio S24-00 ottenuto mediante CH) nel Sintema di Fighille

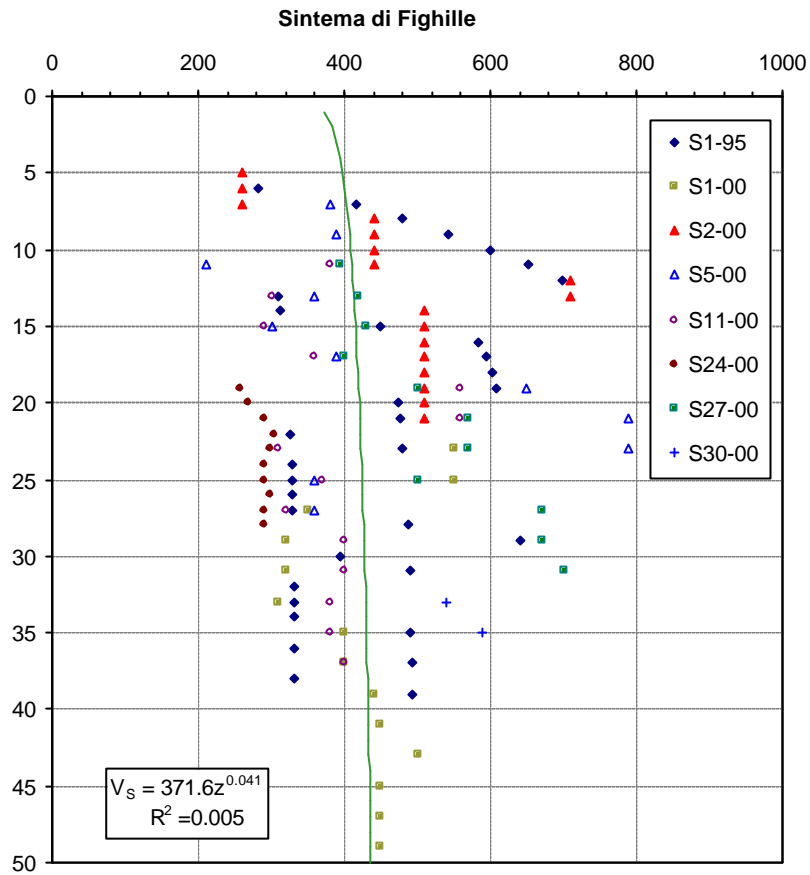


Figura 32: Profilo di velocità delle onde di taglio ottenuto mediante regressione dai dati sperimentali per i materiali appartenenti al Sintema di Fighille

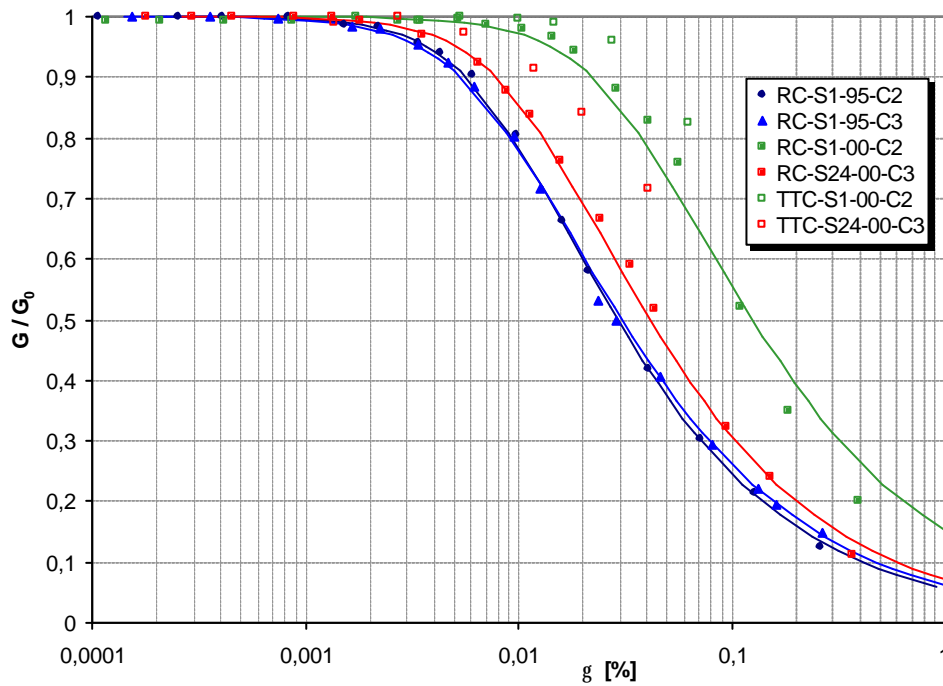


Figura 33: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modello di Ramberg & Osgood adattato ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nel Sintema di Fighille.



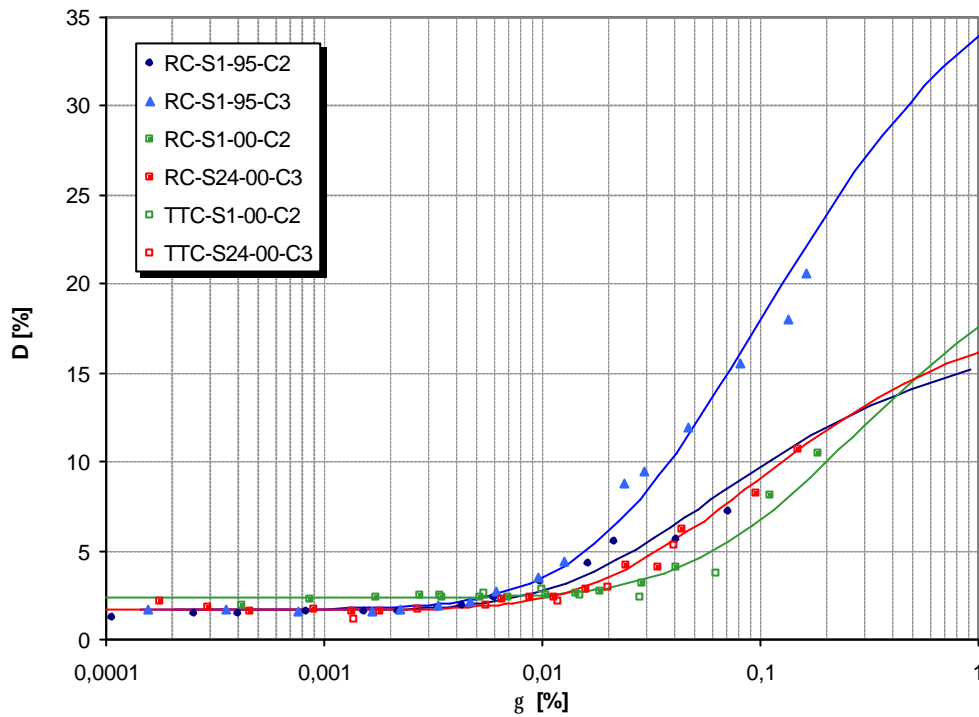


Figura 34: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e leggi esponenziali adattate ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nel Sintema di Fighille.

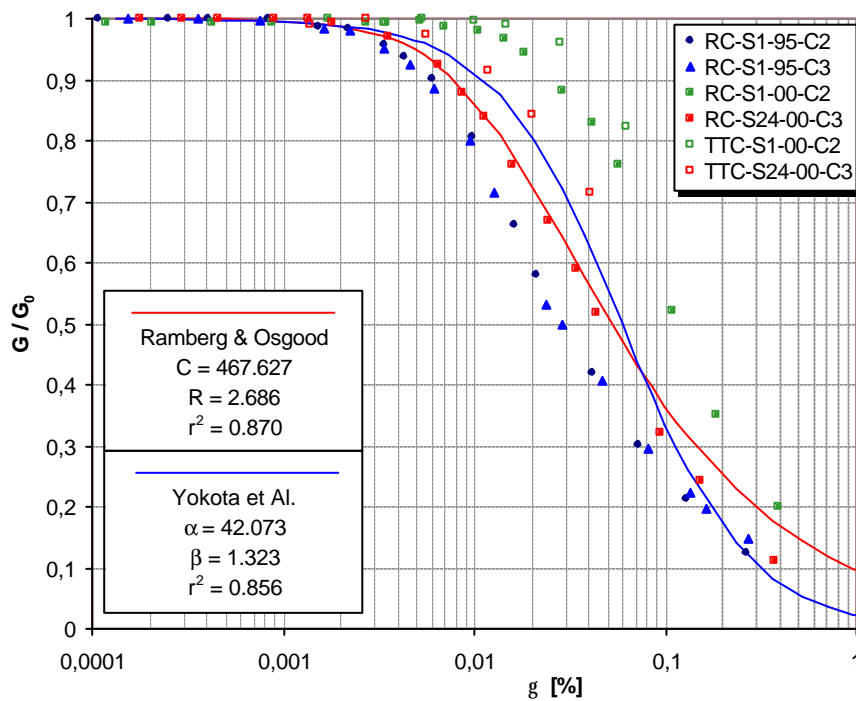


Figura 35: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modelli di Ramberg & Osgood e Yokota et al. adattati ai dati sperimentali per il Sintema di Fighille.

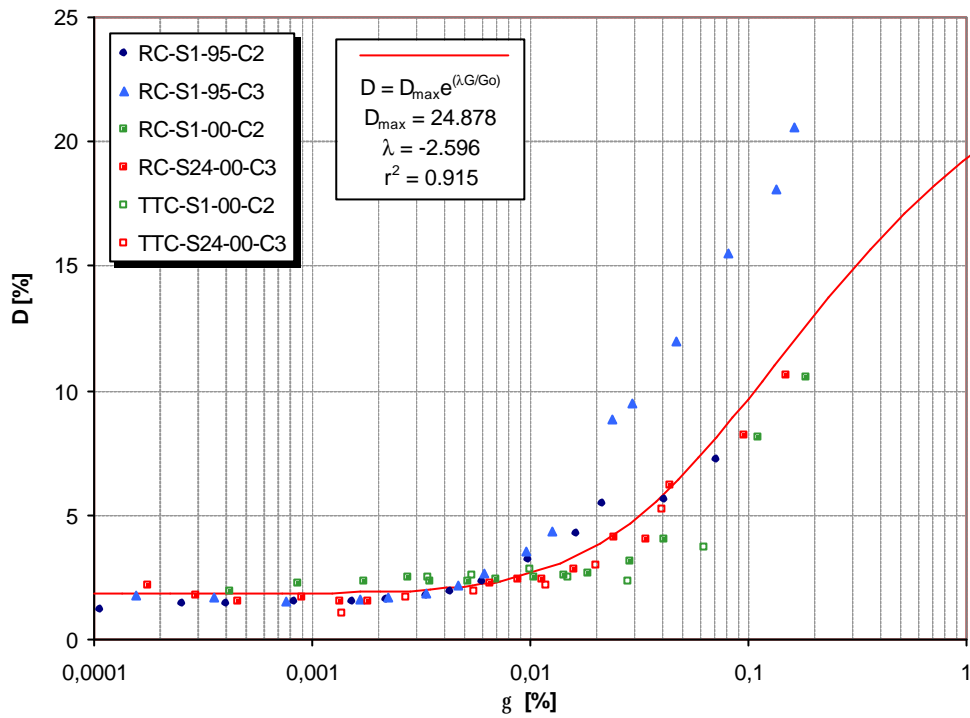


Figura 36: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e legge esponenziale adattata ai dati sperimentali per il Sintema di Fighille.

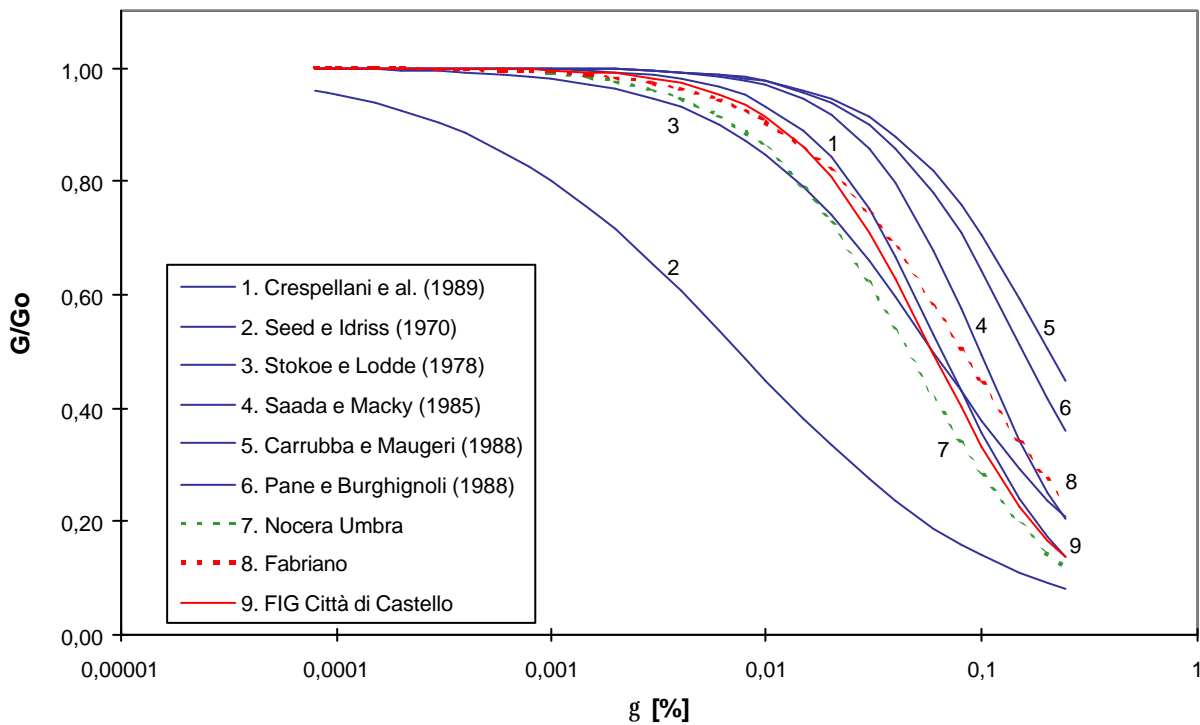


Figura 37: Confronto tra le curve di decadimento trovate con il modello di Yokota et Al. per i materiali appartenenti al Sintema di Fighille e altre argille di letteratura

### 6.3 Sintesi delle proprietà geotecniche

Nell'esaminare le proprietà del Sintema di Fighille occorre rilevare che i campioni esaminati in laboratorio sono in numero statisticamente abbastanza significativo. Sono concentrati in una fascia di profondità comprese all'incirca tra 10 m e 36 m, e gli unici due campioni, estratti a profondità di 51.25 m e 67.4 m nel sondaggio S1-00 non presentano valori delle proprietà geotecniche discordi rispetto a quelle degli altri campioni. Si ritiene perciò che il quadro delle proprietà geotecniche rilevato in laboratorio sia per questi materiali abbastanza rappresentativo e consenta di estenderne i risultati.

#### *Proprietà in condizioni statiche*

Le proprietà geotecniche del sintema di Fighille sono così sintetizzabili:

- a) *Proprietà indici* - Ad eccezione di alcuni campioni prelevati durante le prove SPT in cui si nota una prevalenza di sabbia con elementi ghiaiosi, i campioni esaminati sono costituiti da materiali fini con prevalenza di limo argilloso o di argilla con limo. Sono in genere plastici e talora molto plastici e ricadono nella carta di plasticità del Sistema Unificato nelle classi CH e CL. Hanno consistenza da solido-plastica a semisolida.
- b) *Proprietà di deformabilità* - Sono mediamente poco deformabili ( $0.1 < c_c < 0.35$ .) e con indice di rigonfiamento medio-alto. I valori del grado di consolidazione indicano che si tratta di materiali normalconsolidati o debolmente consolidati. I valori del coefficiente di spinta a riposo  $K_0$  stimati con correlazioni di letteratura variano entro un campo limitato tra 0.5 e 0.8.
- b) *Proprietà di resistenza* - In laboratorio i campioni hanno un comportamento generalmente di tipo elasto- plastico, in alcuni casi con rottura fragile. Alcuni campioni hanno valori della coesione drenata diversa da zero (con valori medi di  $c'$  intorno a 28.34 kPa) ma che in alcuni casi appaiono eccessivi in relazione alle altre caratteristiche del materiale. In sito, la coesione non drenata normalizzata con la pressione litostatica, determinata con strumenti speditivi, è dipendente dalla profondità fino ai 25 m. Al di sotto non c'è un chiaro trend con la profondità e i valori della coesione non drenata normalizzata variano da una verticale all'altra.

Anche i valori di  $N_{SPT}$ , oltre che in numero abbastanza ridotto, sono molto dispersi e non consentono correlazioni affidabili con la profondità. Nell'andamento di  $N_{SPT} \subset z$  è possibile, tuttavia, identificare un trend di crescita abbastanza regolare nei primi 20 m.

#### *Proprietà in condizioni dinamiche*

- c) *Valori iniziali* - I valori iniziali della rigidezza,  $G_0$ , desumibili dai valori di  $V_s$  misurati in sito, indicano in alcune verticali una dipendenza con la profondità, ma l'andamento è molto variabile

da una verticale all'altra, cosicché non è possibile individuare un trend generale di crescita. La dispersione è molto elevata e le correlazioni  $Vs \subset z$  sono caratterizzate da valori di  $R^2$  prossimi a zero.

I valori iniziali del rapporto di smorzamento  $D_0$  sono compresi fra 2 e 2.5 %. Il rapporto di smorzamento mantiene un andamento pressoché costante fino a valori dell'ampiezza della deformazione di taglio di  $5 \cdot 10^{-3}$  %.

d) *Variazione con l'ampiezza della deformazione di taglio* - Le curve di decadimento della rigidezza presentano un andamento simile a quello dei coesivi. Il terreno esibisce un comportamento rigido per valori della ampiezza della deformazione di taglio inferiori al valore di  $5 \cdot 10^{-3}$  %, raggiunto il quale ha inizio il decadimento, che inizialmente è abbastanza contenuto, ma che diventa invece piuttosto rapido a partire da ampiezze della deformazione superiori a  $2 \cdot 10^{-2}$  %, passando da valori del rapporto  $G/G_0$  pari a 0.8 a valori di 0.20 in corrispondenza di valori di  $g$  pari a 0.2 %.

Le curve di variazione del rapporto di smorzamento mostrano un sensibile aumento di  $D$  a partire da una deformazione di taglio superiore a 0.01 %, arrivando a valori pari a circa 20% per livelli di deformazione dell' 1 %.

## 7. Subsistema di Selci Lama

Per la caratterizzazione dei materiali prelevati nel subsistema di Selci Lama sono stati utilizzati i sondaggi S1-78, S2-78; S3-78, S2-95, S1-00, S7-00, S25-00, S30-00 mentre per la caratterizzazione meccanica della parte fine contenuta dai materiali di tale formazione, che sono prevalentemente a grana grossa, sono stati utilizzati risultati di prove di laboratorio condotte su 4 campioni indisturbati (S2-95-C2, S2-95-C3, S7-00-C2 e S30-00-C4) e su alcuni campioni prelevati con il campionatore SPT.

### 7.1 Proprietà meccaniche da prove statiche

La Tabella 18 riporta le proprietà indici e i parametri fisici, di deformabilità e di resistenza relativi ai 4 campioni esaminati e i principali indici statistici delle suddette proprietà.

Nelle Figure 38 e 39 sono riportati i risultati delle prove indici. Più precisamente, la Figura 38 riporta le curve granulometriche di 4 campioni, di cui 3 si riferiscono a prove SPT. La Figura 39 mostra i punti sperimentali sulla carta di plasticità adottata nel Sistema Unificato (USCS) di 4 campioni. I risultati delle prove edometriche sono riportati nella Figura 40, mentre i parametri di deformabilità da queste desunti sono mostrati nella Tabella 19.

In Figura 41 è riportato l'andamento con la profondità della coesione non drenata, determinata con penetrometro e torvane tascabili, normalizzata con la pressione verticale efficace. In tale grafico è anche riportata la curva interpolante la serie dei dati.

Tabella 18: Proprietà indice, parametri di deformabilità e parametri di resistenza da prove statiche di laboratorio condotte su materiali appartenenti al Subsistema di Selci Lama

Sondaggio-Anno	S2-95			S7-00	S30-00	min	max	media $\mu$	dev. std	coeff. di var. CV [%]	Val. Raccom. Vr [%]	CV min-max min-max
	C2	C3 <sup>H</sup>	C3 <sup>L</sup>	C2	C4							
Z [m]	15,25	32,1	32,4	18,40	20,75							
Z <sub>w</sub> [m]	9,00	9,00	9,00	20,00	12,00							
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20,1	20,6	20,9	20,75	19,60	19,60	20,90	20,39	0,534	2,621	3	1-10
q <sub>i</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
w <sub>L</sub> (%)	49	45	35	23,36	28,93	23,36	49,00	36,26	10,730	29,592	10	5-50
w <sub>P</sub> (%)	26	21	22	-	18,37	18,37	26,00	21,84	3,168	14,504	10	10-30
I <sub>P</sub> (%)	23	24	13	-	10,57	10,57	24,00	17,64	6,849	38,822	30	5-80
w (%)	28	22,9	20,6	10,38	22,24	10,38	28,00	20,82	6,460	31,023	-	--
I <sub>c</sub>	0,91	0,92	1,11	-	0,63	0,63	1,11	0,89	0,195	21,873	-	--
e <sub>0</sub>	0,676	0,566	0,454	0,331	0,603	0,33	0,68	0,53	0,135	25,725	25	15-30
c <sub>c</sub>	0,266	0,236	0,183	0,146	0,181	0,15	0,27	0,20	0,048	23,681	30	20-70
c <sub>s</sub>	0,07	0,052	0,036	0,015	0,020	0,02	0,07	0,04	0,023	59,008	-	--
OCR	1.3 - 2.0	1.0 - 1.3	1.0 - 1.2	1.0-1.6	1.0	1,00	8,70	-	-	-	-	--
K <sub>0</sub>	0.56 - 0.77	0.51 - 0.63	0.45 - 0.54	-	0.43 - 0.48	0,35	1,68	-	-	-	-	--
c' [kPa]	15,70	39,24	-	-	-	15,70	39,24	27,47	16,645	60,594	-	--
$\phi'$ (°)	25	26	-	-	-	25,00	26,00	25,50	0,707	2,773	-	10-50

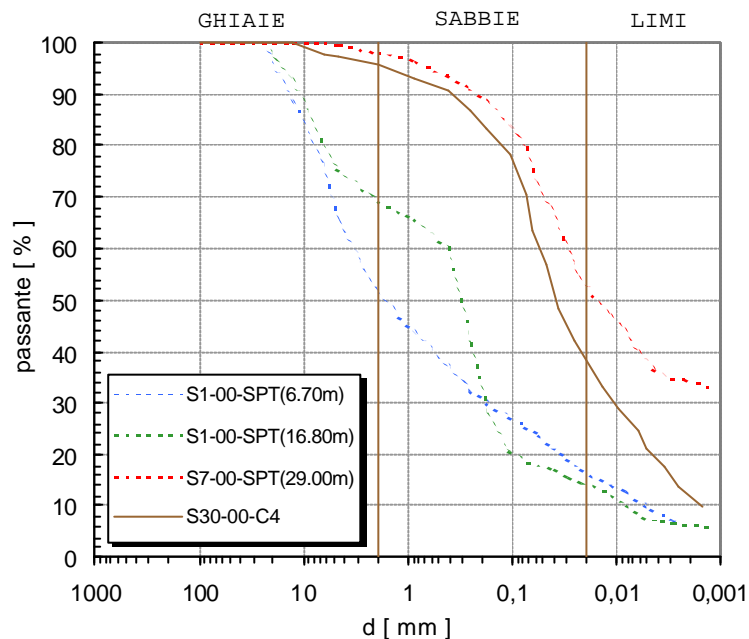


Figura 38: Curve granulometriche di materiale prelevato nel Subsistema di Selci Lama

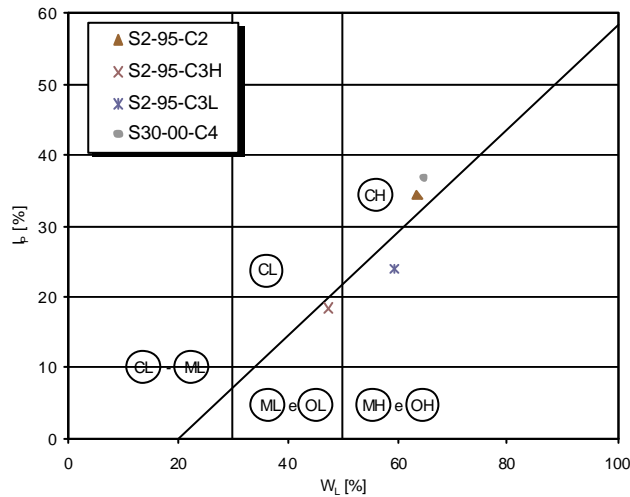


Figura 39: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

Tabella 19: Parametri ricavati e parametri stimati a partire da prove edometriche condotte su materiali appartenenti al Subsistema di Selci Lama

	$c_c$	$c_s$	$\sigma_p'$ [kPa]	$\sigma_v'$ [kPa]	OCR	$K_0^{(*)}$	$\sigma_o'$ [kPa]
S2-95-C2	0,266	0,070	310 500	244,0	1,3 2,0	0,56 0,74	172 202
S2-95-C3 <sup>H</sup>	0,236	0,052	400 560	419,0	1,0 1,3	0,51 0,62	283 311
S2-95-C3 <sup>L</sup>	0,183	0,036	400 500	420,0	1,0 1,2	0,45 0,54	266 291
S7-00-C2	0,146	0,015	360 590	367,7	1,0 1,6	- -	- -
S30-00-C4	0,181	0,020	340 340	335,8	1,0 1,0	0,43 0,48	208 219

(\*) Sono riportati il valore massimo e minimo fra quelli stimati con le relazioni (1)

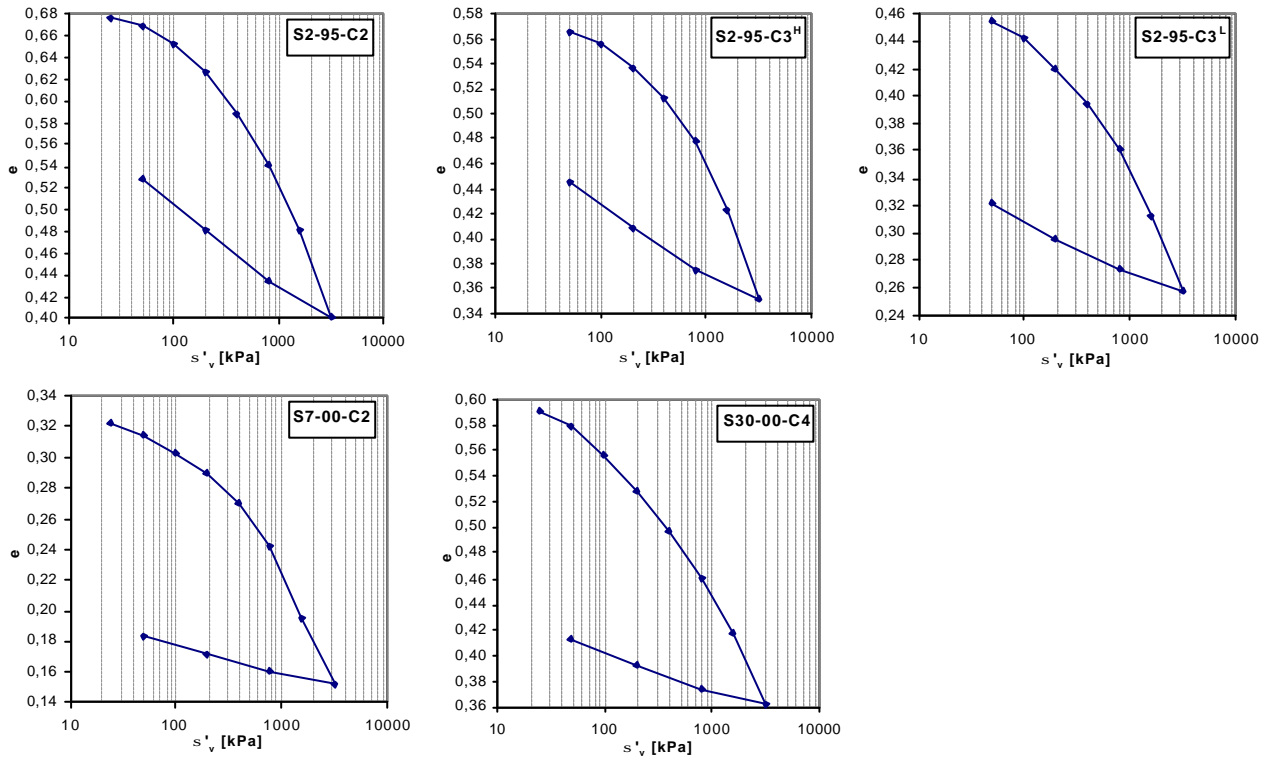


Figura40: Prove Edometriche condotte su materiali prelevati nel Subsistema di Selci Lama

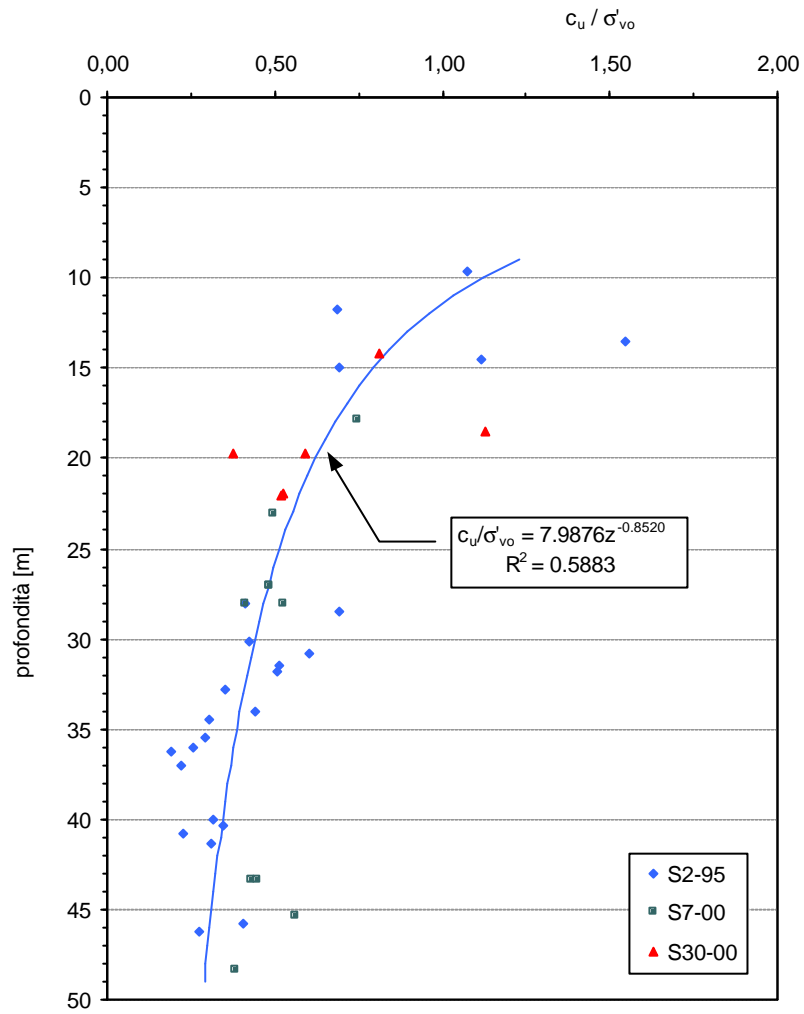


Figura 41: Valori di  $c_u$  normalizzati con la pressione efficace determinati in sito con penetrometro e torvane tascabili



## 7.2 Proprietà meccaniche da prove dinamiche

Per la determinazione delle proprietà dinamiche sono state utilizzate le stesse verticali, su cui sono state eseguite misure di  $N_{SPT}$ , N. 5 prove DH e misure con l'apparecchiatura di colonna risonante (RC) su N. 2 campioni (S2-95-C2 e S2-95-C3).

Nella Figura 42 sono riportati i valori del numero di colpi  $N_{SPT}$ . Nella Figura 43 sono riportati i profili delle  $V_S$  relativi ai singoli sondaggi. Nella Figura 44a, 44b e 44c) i valori di  $V_S$  relativi a tali profili sono stati separati in relazione alla granulometria e interpolati mediante relazioni potenza.

Le prove dinamiche in laboratorio con l'apparecchio RC sono state effettuate su N. 2 campioni (S2-95-C2 e S2-95-C3).

In Tabella 20 sono riportati i valori delle deformazioni di taglio corrispondenti alla soglia elastica,  $g$ , ed alla soglia volumetrica,  $g_v$ .

I parametri dei modelli di Yokota et al. e di Ramberg & Osgood ( $a$ ,  $b$ ,  $C$  e  $R$ ) sono stati determinati mediante regressioni lineari su variabili logaritmiche e sono indicati nella Tabella 21.

I valori dei parametri del modello rappresentante il rapporto di smorzamento ( $D_{max}$  e  $I$ ) sono riportati in Tabella 21.

Gli andamenti del modulo di taglio normalizzato,  $G/G_0$ , e del rapporto di smorzamento,  $D$ , ottenuti in funzione dell'ampiezza dello sforzo di taglio sono riportati nelle Figure 45 e 46. In tali Figure sono riportati anche i punti sperimentali dei campioni classificati come appartenenti al Sistema di Fighille.

Nella Tabella 22 sono riportati per i tre campioni i valori di  $G_0$  ottenuti nella prova multistage di RC in corrispondenza dei diversi valori della pressione di confinamento,  $s'_c$ , e dell'indice dei vuoti  $e_0$ .

Al fine di caratterizzare con un'unica la formazione, è stata assunta, nelle Figure 47 e 48, un'unica curva interpolante. In particolare in Figura 47 sono riportate le curve adattate ai dati sperimentali secondo i modelli di Ramberg & Osgood e di Yokota et al. In Figura 48 è riportato l'andamento del rapporto di smorzamento. Per confronto si riportano in Figura 48 l'andamento della legge di decadimento,  $G(g)$ , trovata per i materiali appartenenti al Subsistema di Selci Lama e le leggi di decadimento trovate per materiali coesivi da vari autori. Il modello di adattamento ai dati sperimentali riportato in tale figura è quello di Yokota et al.

Per facilitare l'utilizzazione di tali risultati e il loro inserimento nei modelli usualmente impiegati nel calcolo della risposta sismica locale, è stata preparata la Tabella 23, in cui accanto ai diversi valori dell'ampiezza della deformazione di taglio sono riportati i corrispondenti valori di  $G/G_0$  e di

D. In Tabella 24, sono riportati i coefficienti delle regressioni effettuate sull'insieme dei dati sperimentali.

Tabella 21: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici ai dati sperimentali

Tabella 20: Valori della soglia elastica e della soglia volumetrica

	$\gamma_i$ [%]	$\gamma_v$ [%]
S2-95-C2	0,0060	0,020
S2-95-C3	0,0068	0,024

	S2-95-C2	S2-95-C3
$\alpha$	22,880	46,623
$\beta$	1,223	1,384
$r^2$	0,979	0,971
C	772,147	2764,394
R	2,858	3,153
$r^2$	0,998	0,999
$D_{max}$ [%]	30,45	27,84
$\lambda$	-2,57	-2,60
$r^2$	0,990	0,972

Tabella 22: Valori sperimentali di  $G_0$  in funzione di  $\sigma_0'$  ed  $e_0$

Prova Campione	RC S2-95-C2			RC S2-95-C3		
	$G_0$ [MPa]	47,5	83,3	121,3	85,7	144,3
$s_{o'}$ [MPa]	0,05	0,15	0,3	0,07	0,2	0,4
$e_0$	0,717	0,689	0,66	0,537	0,522	0,507

Tabella 23: Legge di decadimento del modulo di taglio e legge di smorzamento in formato numerico

Subsistema di Selci		
$\gamma$ [%]	G/G <sub>0</sub>	D
0	1	2,16559
0,0003	0,9999	2,16638
0,0005	0,9997	2,16745
0,0010	0,9987	2,17285
0,0013	0,9976	2,17929
0,0020	0,9943	2,19800
0,0026	0,9906	2,21926
0,0032	0,9866	2,24239
0,0041	0,9781	2,29295
0,0050	0,9690	2,34809
0,0057	0,9595	2,40700
0,0065	0,9497	2,46915
0,0072	0,9398	2,53418
0,0079	0,9297	2,60183
0,0086	0,9195	2,67187
0,0093	0,9093	2,74415
0,0160	0,8091	3,56376
0,0232	0,7193	4,50515
0,0310	0,6420	5,51272
0,0397	0,5762	6,54614
0,0492	0,5202	7,57623
0,0595	0,4724	8,58287
0,0708	0,4314	9,55301
0,0830	0,3959	10,47889
0,0960	0,3651	11,35652
0,1100	0,3381	12,18449
0,1248	0,3144	12,96313
0,2122	0,2294	16,18505
0,3212	0,1777	18,52095
0,4512	0,1435	20,24823
0,6020	0,1195	21,55886
0,7947	0,1000	22,68477
0,9357	0,0900	23,28464
1,1223	0,0800	23,90037

Tabella 17: Coefficienti delle regressioni ottenuti adattando i modelli teorici all'insieme dei dati sperimentali

SEL	
$\alpha$	40,794
$\beta$	1,333
$r^2$	0,970
C	1457,807
R	3,009
$r^2$	0,996
$D_{max}$ [%]	29,450
$\lambda$	-2,610
$r^2$	0,973

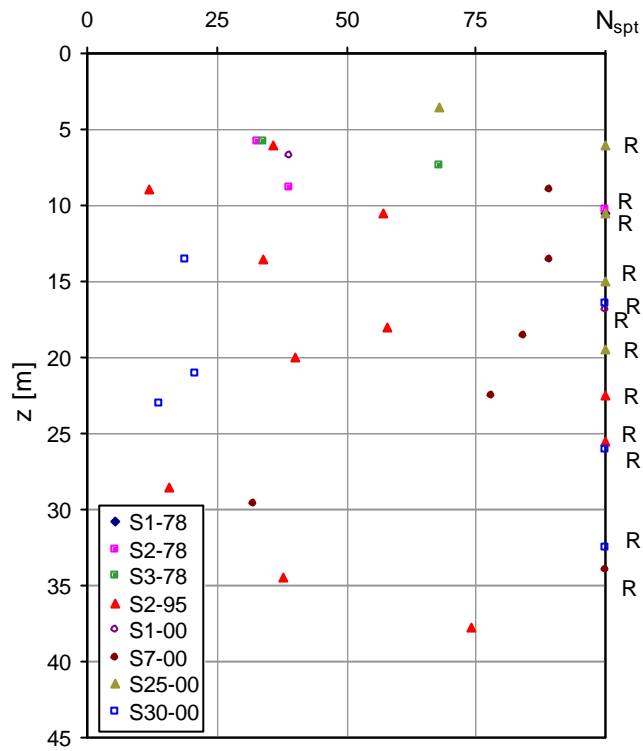


Figura 42: Valori di  $N_{sPT}$  in funzione della profondità

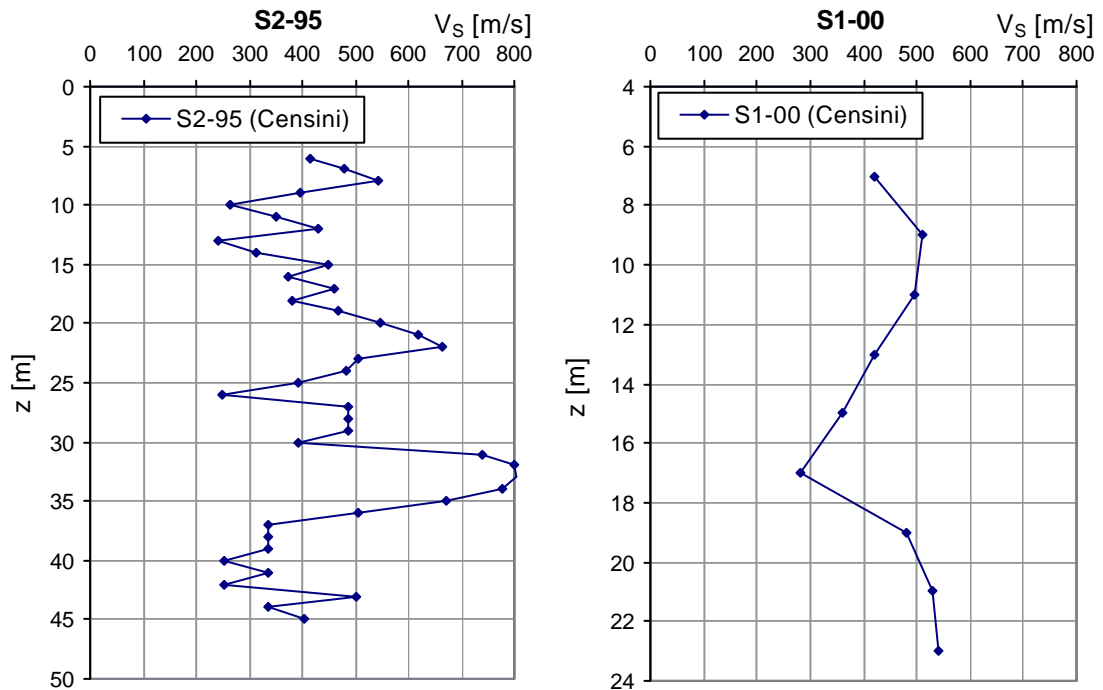


Figura 43: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH nel Subsistema di Selci Lama

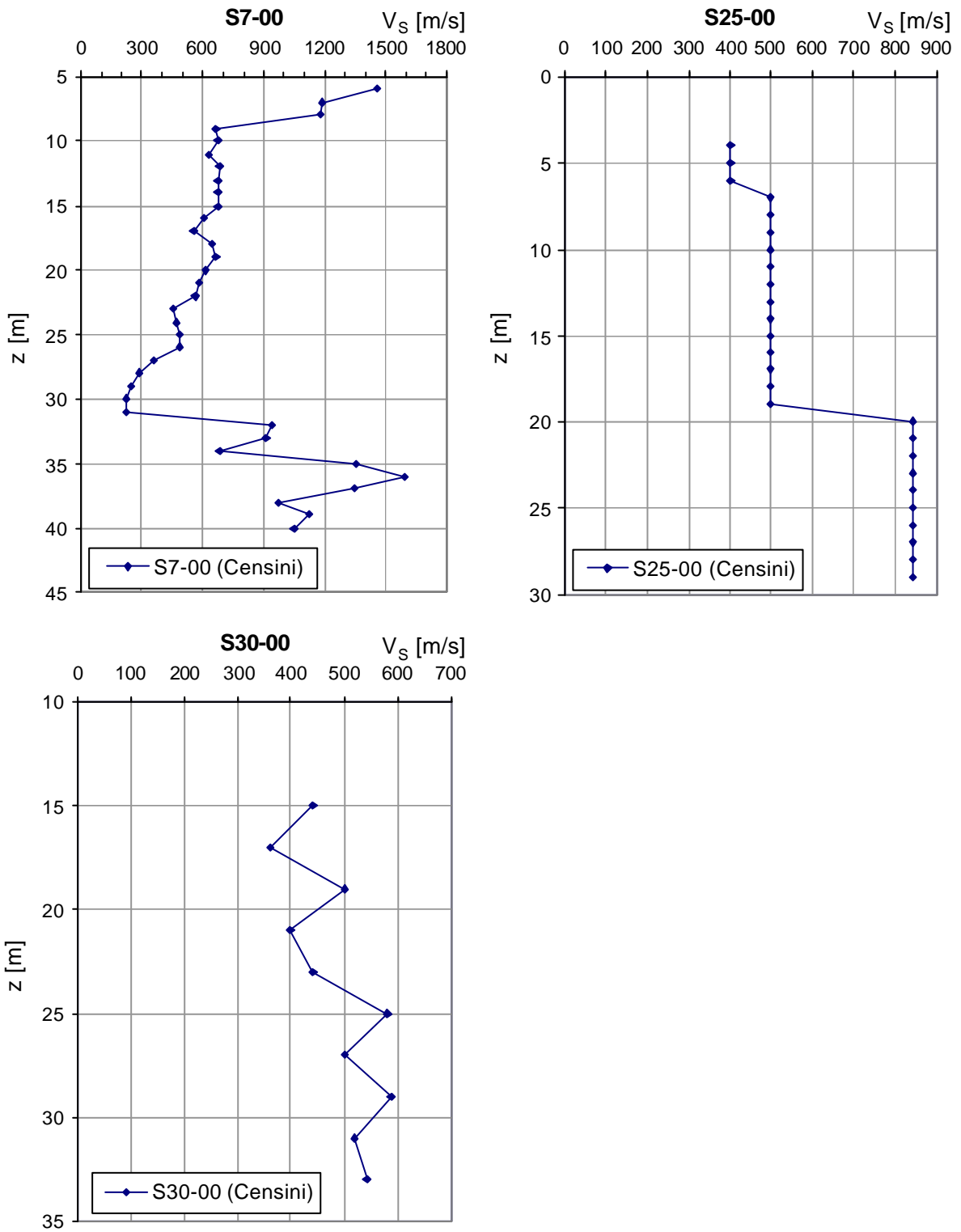


Figura 44: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH (ad eccezione del profilo di velocità relativo al sondaggio S7-00 ottenuto mediante CH) nel Subsistema di Selci Lama

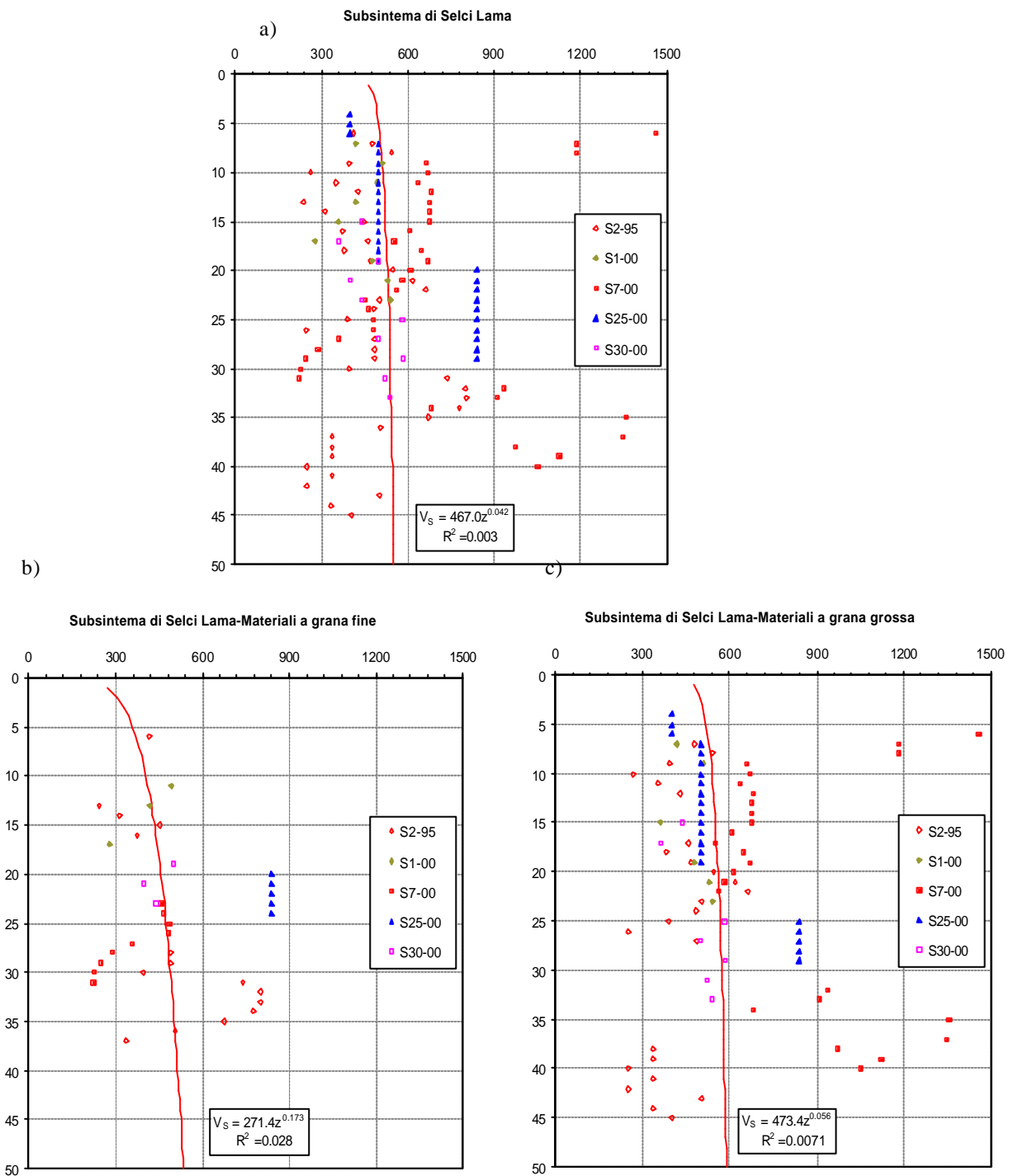


Figura 45: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante regressione dai dati sperimentali; a) per il Subsistema di Selci Lama, b) per i materiali fini presenti nel Subsistema di Selci Lama, c) per i materiali a grana grossa del Subsistema di Selci Lama.

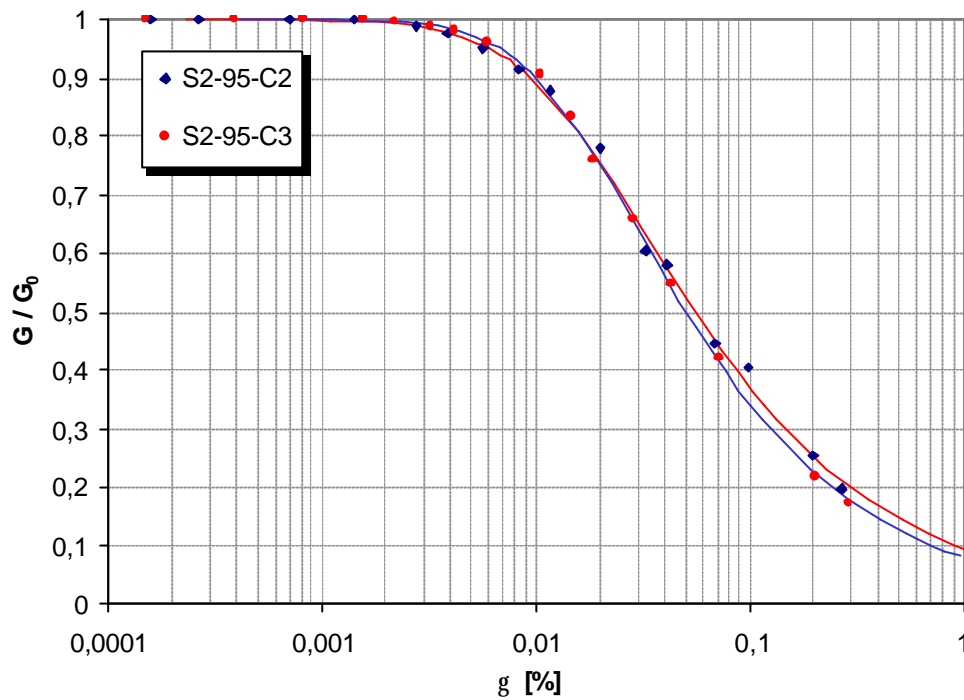


Figura 46: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modello di Ramberg & Osgood adattato ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nel Subsistema di Selci lama.

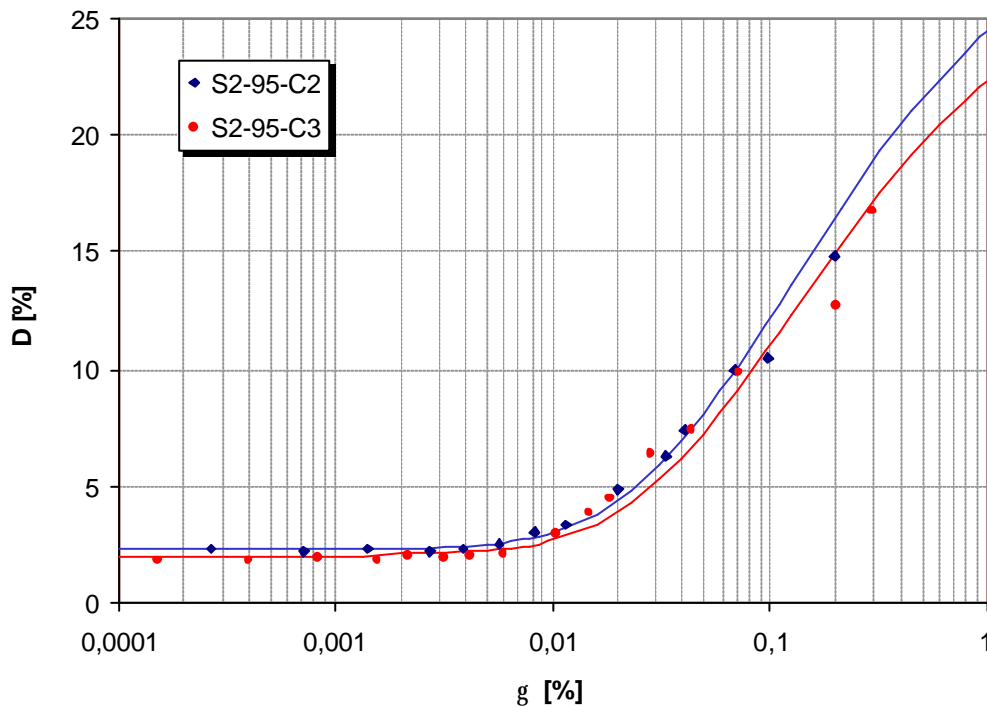


Figura 47: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e leggi esponenziali adattate ai dati sperimentali per ciascun campione prelevato nel Subsistema di Selci Lama.

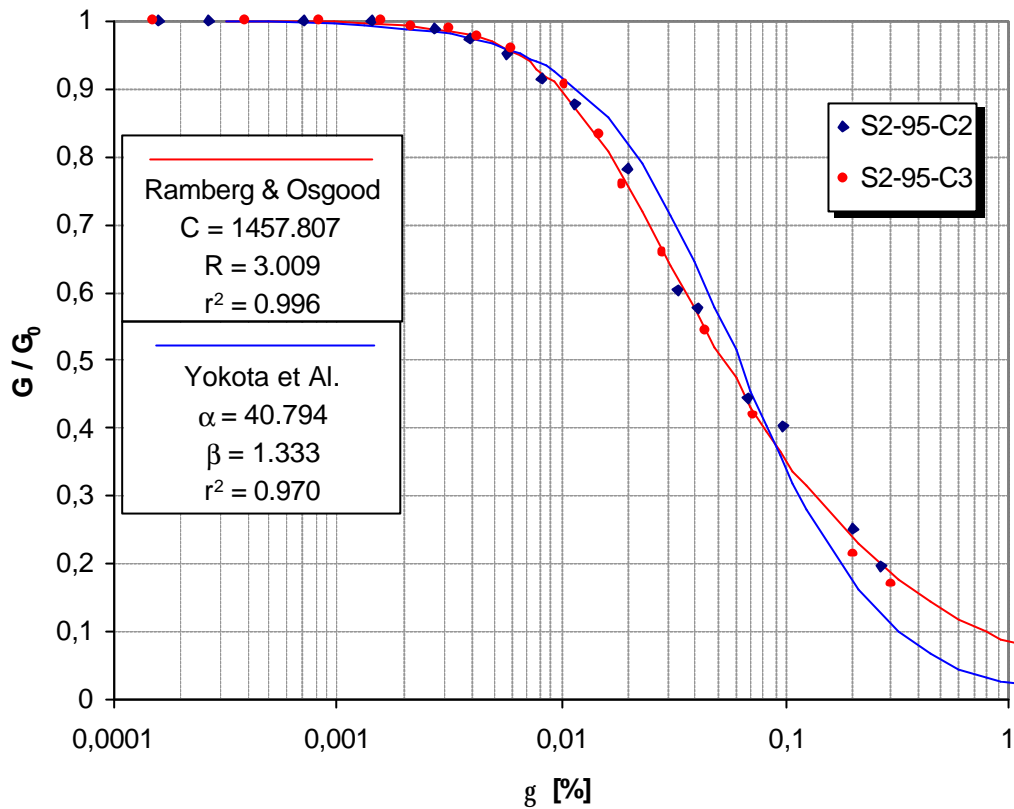


Figura 48: Valori sperimentali del decadimento del modulo di taglio e modelli di Ramberg & Osgood e Yokota et Al. adattati ai dati sperimentali per il Subsistema di Selci Lama.

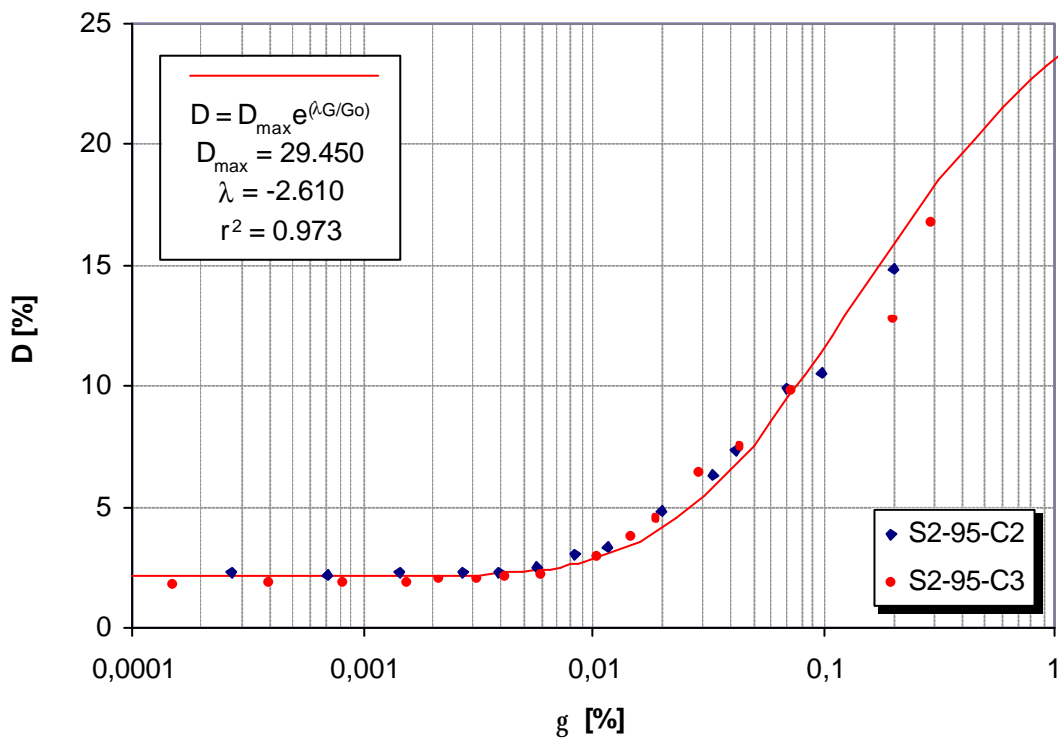


Figura 49: Valori sperimentali del rapporto di smorzamento in funzione del livello deformativo e legge esponenziale adattata ai dati sperimentali per il Subsistema di Selci Lama.

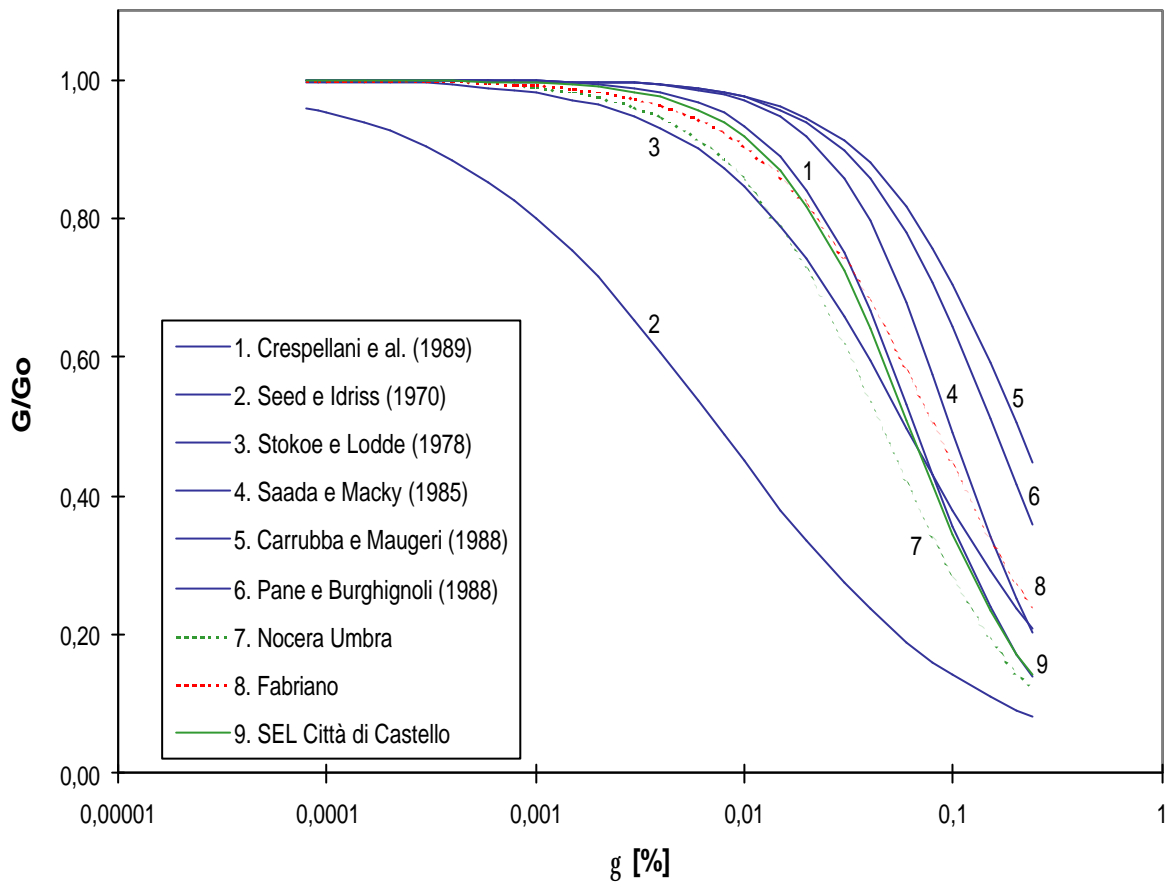


Figura 50: Confronto tra le curve di decadimento trovate con il modello di Yokota et Al. per i materiali appartenenti al Subsistema di Selci Lama e altre argille di letteratura



### 7.3 Sintesi delle proprietà geotecniche

I cinque campioni esaminati in laboratorio sono relativi a tre diverse verticali e sono stati estratti ad una profondità variabile tra 15.25 m e 32.40 m. Appartengono a classi di terreno abbastanza diverse e perciò le loro caratteristiche medie sono poco significative.

#### *Proprietà in condizioni statiche*

Le proprietà geotecniche del subsistema di Selci Lama sono così sintetizzabili:

- c) *Proprietà indici* - I campioni indisturbati esaminati in laboratorio e i campioni estratti durante le prove SPT indicano che nel subsistema di Selci Lama sono presenti sia materiali a prevalente componente sabbiosa con elementi ghiaiosi sia materiali a prevalente componente limo-argillosa (campioni S2-95-C2, S2-95-C3<sup>L</sup> e S2-95-C3<sup>H</sup>). Con riferimento a questo secondo gruppo, i punti sperimentali ricadono nel Sistema Unificato a cavallo della retta A in corrispondenza delle classi CL, CH e MH. La plasticità è variabile ( $I_p$  è compreso tra 10 e 24%), e la consistenza da plastica a semisolida.
- d) *Proprietà di deformabilità* - I valori dell'indice di compressione, che è per tutti i campioni piuttosto basso ( $c_c < 0.27$ ), indicano che il terreno non è molto deformabile. Nei campioni di materiale più fino, l'indice di rigonfiamento è medio-alto. Il grado di sovraconsolidazione è per tutti i campioni compreso tra 1 e 2, e sembra ragionevole considerare il terreno normalconsolidato.
- e) *Proprietà di resistenza* - In laboratorio alcuni campioni hanno presentato valori della coesione drenata diversa da zero, con valore medio e massimo rispettivamente pari a 27.5 kPa e 39.24 kPa (valori che sembrano eccessivi e in contrasto con il fatto che il terreno è normalconsolidato). In sito, la coesione non drenata normalizzata con la pressione litostatica, misurata con strumenti speditivi, è dipendente dalla profondità fino a circa 35 m e ha un valore medio praticamente costante a profondità superiori. I valori di  $N_{SPT}$  sono molto dispersi e non è possibile identificare alcun trend con la profondità.

#### *Proprietà in condizioni dinamiche*

- a) *Valori iniziali* - I valori iniziali della rigidezza,  $G_0$ , desumibili dai valori di  $V_s$  misurati in sito in corrispondenza delle 5 verticali esplorate, non indicano una sensibile dipendenza con la profondità. Aggregando tutti i profili, la correlazione  $V_s \subset z$  è caratterizzata da un valore di  $R^2$  praticamente uguale a zero. Separando i materiali a grana fine da quelli a grana grossa, non si ottengono risultati migliori in termini di  $R^2$  (sempre intorno a zero). Si nota però che il valore

medio di  $V_S$  è per i materiali fini varia tra 450 e 550 m/s, e per i materiali a grana grossa fra 500 e 600 m/s e con una deviazione standard molto maggiore.

I valori iniziali del rapporto di smorzamento  $D_0$  sono intorno al 2 % e si mantengono costanti fino a valori dell'ampiezza della deformazione di taglio di  $6 \cdot 10^{-3}$  %.

b) *Variazione con l'ampiezza della deformazione di taglio* - Le curve di decadimento della rigidezza sono quelle tipiche dei materiali argillosi. Il terreno esibisce un comportamento rigido per valori della ampiezza della deformazione di taglio inferiori al valore di  $7 \cdot 10^{-3}$  %, raggiunto il quale ha inizio il decadimento, che inizialmente è abbastanza contenuto, ma che diventa invece piuttosto rapido a partire da ampiezze della deformazione superiori a  $2 \cdot 10^{-2}$  %, passando da valori del rapporto  $G/G_0$  pari a 0.8 a valori di 0.20 in corrispondenza di valori di  $\gamma$  pari a 0.2 %. Le curve di variazione del rapporto di smorzamento mostrano un sensibile aumento di  $D$  a partire da una deformazione di taglio superiore a 0.02 %, arrivando a valori pari a circa 25 % per livelli di deformazione dell' 1 %.

## **8. Subsintemi di: Nuvole, M. Rotondo, Mercatale e Molin dell'Olio**

Poiché i sondaggi ed i campioni prelevati nei materiali appartenenti ai subsintemi di Nuvole, M. Rotondo, Mercatale e Molin dell'Olio sono in numero ridotto si riporta la caratterizzazione meccanica in un unico paragrafo. In particolare i materiali appartenenti a tali subsintemi, poiché diversi, sono stati mantenuti distinti nella caratterizzazione geotecnica.

Il subsintema di Nuvole (NUV) è stato state incontrato in un solo sondaggio e precisamente nella verticale S6-00; il subsintema M. Rotondo (MRO) è stato incontrato in due sondaggi, S9-00 e S10-00; il subsintema di Mercatale (MER) è stato incontrato nella sola verticale S8-00 ed infine il subsintema di Molin dell'Olio (MOL) nella sola verticale S10-00. Per la caratterizzazione meccanica di tali subsintemi, oltre alle prove in sito, sono stati analizzati N. 4 campioni indisturbati (S6-00-C1, S8-00-C1, S9-00-C1 e S10-00-C1).

### **8.1 Proprietà meccaniche da prove statiche**

Le Tabelle 25a, 25b, 25c e 25d riassumono le principali proprietà indici, i parametri di deformabilità e di resistenza relativi ai 4 campioni esaminati.

Le Figure 51 e 52 illustrano i risultati ottenuti nelle prove di classificazione. Più precisamente, la Figura 51 riporta le curve granulometriche di N. 5 campioni, di cui 1 si riferisce ad una prova SPT. La Figura 52 mostra i punti sperimentali sulla carta del Sistema Unificato di 4 campioni esaminati. I risultati dell'unica prova edometrica effettuata, su materiale prelevato nel subsintema di Nuvole sono riportati nella Figura 53, mentre i parametri di deformabilità da questa desunti sono mostrati nella Tabella 26.

Per quanto riguarda le misure di resistenza al taglio, nella Figura 54 si può osservare l'andamento sforzi-deformazioni ottenuto dall'unica prova di compressione ELL effettuata, su materiale prelevato nel subsintema di M. Rotondo, mentre nella Figura 55 è riportato l'andamento con la profondità della coesione non drenata normalizzata con la pressione verticale efficace per materiali appartenenti ai subsintemi di Nuvole e Mercatale.

Tabella 25: Proprietà indice, parametri di deformabilità e parametri di resistenza da prove statiche di laboratorio condotte su materiali prelevati nel subsistema di: a) Nuvole; b) M. Rotondo; c) Mercatale; d) Molin dell'Olio

a) **SUBSISTEMA DI NUVOLE**

Sondaggio-Anno	S6-00
Campione	C1
Z [m]	3,15
Z <sub>w</sub> [m]	assente
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	20,53
q <sub>u</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-
w <sub>L</sub> (%)	32,16
w <sub>P</sub> (%)	17,61
I <sub>P</sub> (%)	14,55
w (%)	12,37
I <sub>c</sub>	1,36
e <sub>o</sub>	0,451
c <sub>c</sub>	0,092
c <sub>s</sub>	0,016
OCR	1.5-6.2
K <sub>o</sub>	0.55-1.20
c' [kPa]	-
φ' (°)	-

b) **SUBSISTEMA DI M. ROTONDO**

Sondaggio-Anno	S9-00
Campione	C1
Z [m]	9,15
Z <sub>w</sub> [m]	55,00
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	19,81
q <sub>u</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	113,90
w <sub>L</sub> (%)	40,63
w <sub>P</sub> (%)	23,26
I <sub>P</sub> (%)	17,37
w (%)	23,28
I <sub>c</sub>	1,00
e <sub>o</sub>	0,705
c <sub>c</sub>	-
c <sub>s</sub>	-
OCR	-
K <sub>o</sub>	-
c' [kPa]	-
φ' (°)	-

c) **SUBSISTEMA DI MERCATALE**

Sondaggio-Anno	S8-00
Campione	C1
Z [m]	5,75
Z <sub>w</sub> [m]	30,00
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	19,20
q <sub>u</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-
w <sub>L</sub> (%)	34,18
w <sub>P</sub> (%)	22,65
I <sub>P</sub> (%)	11,53
w (%)	22,45
I <sub>c</sub>	1,02
e <sub>o</sub>	0,636
c <sub>c</sub>	-
c <sub>s</sub>	-
OCR	-
K <sub>o</sub>	-
c' [kPa]	-
φ' (°)	-

d) **SUBSISTEMA DI MOLIN DELL'OLIO**

Sondaggio-Anno	S10-00
Campione	C1
Z [m]	4,05
Z <sub>w</sub> [m]	27,50
γ [kN/m <sup>3</sup> ]	19,28
q <sub>u</sub> (E.L.L.) [kN/m <sup>2</sup> ]	-
w <sub>L</sub> (%)	69,71
w <sub>P</sub> (%)	25,48
I <sub>P</sub> (%)	44,23
w (%)	27,29
I <sub>c</sub>	0,96
e <sub>o</sub>	0,747
c <sub>c</sub>	0,213
c <sub>s</sub>	0,074
OCR	1.9 - 4.8
K <sub>o</sub>	0.73 - 1.13
c' [kPa]	-
φ' (°)	-

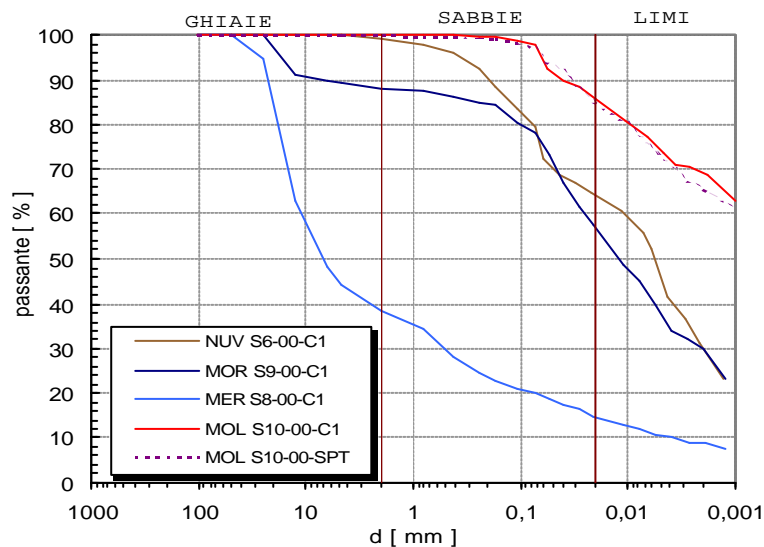


Figura 51: Curve granulometriche di materiale prelevato nei quattro subsistemi

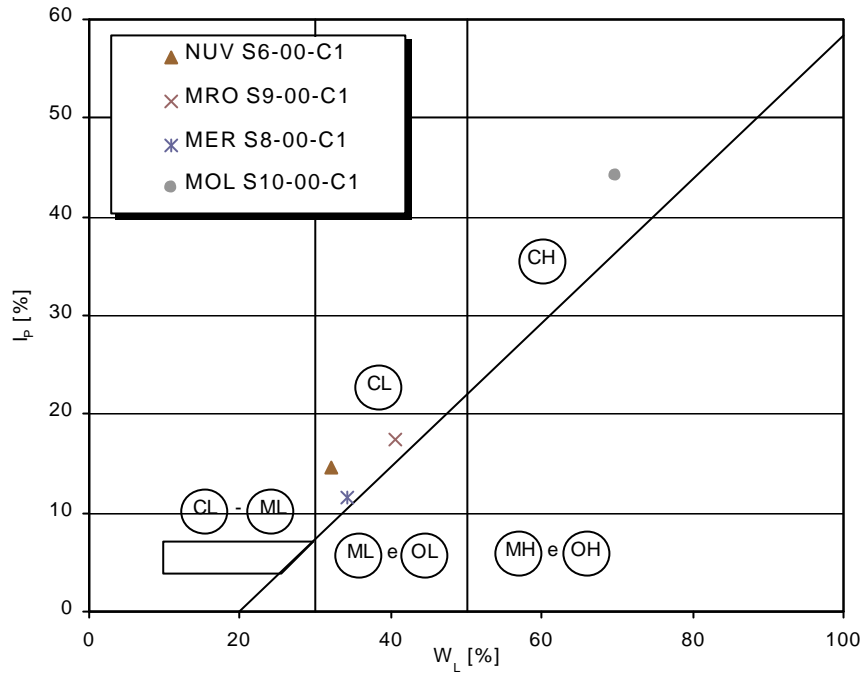


Figura 52: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

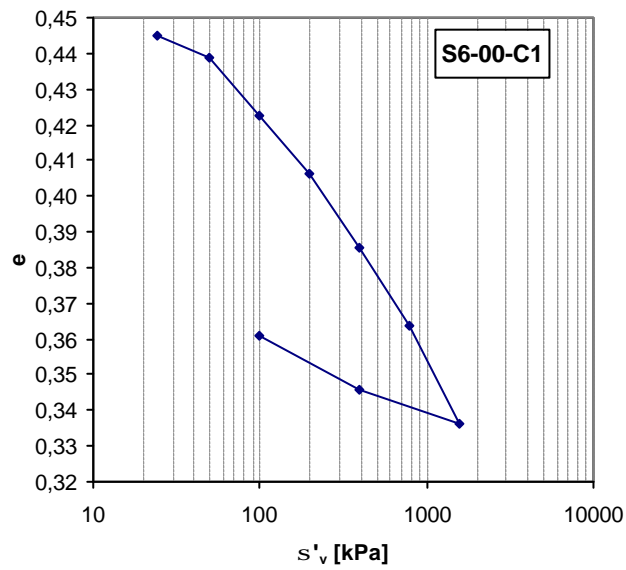


Figura 53: Prova Edometrica condotta su materiale prelevato nel subsistema di Nuvole

Tabella 26: Parametri ricavati e parametri stimati a partire dalla prova edometrica

	$c_c$	$c_s$	$\sigma'_b$ [kPa]	$\sigma'_v$ [kPa]	OCR	$K_0$	$\sigma'_o$ [kPa]				
S6-00-C1	0,092	0,016	100	400	64,7	1,5	6,2	0,55	1,20	45	73

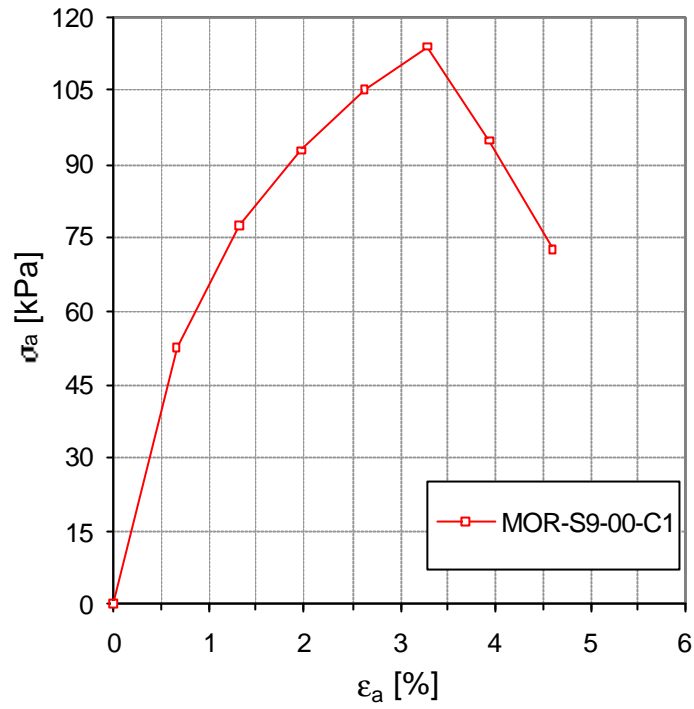


Figura 54: Prova ELL su un provina ricavata da un campione prelevato nel subsistema di M. Rotondo

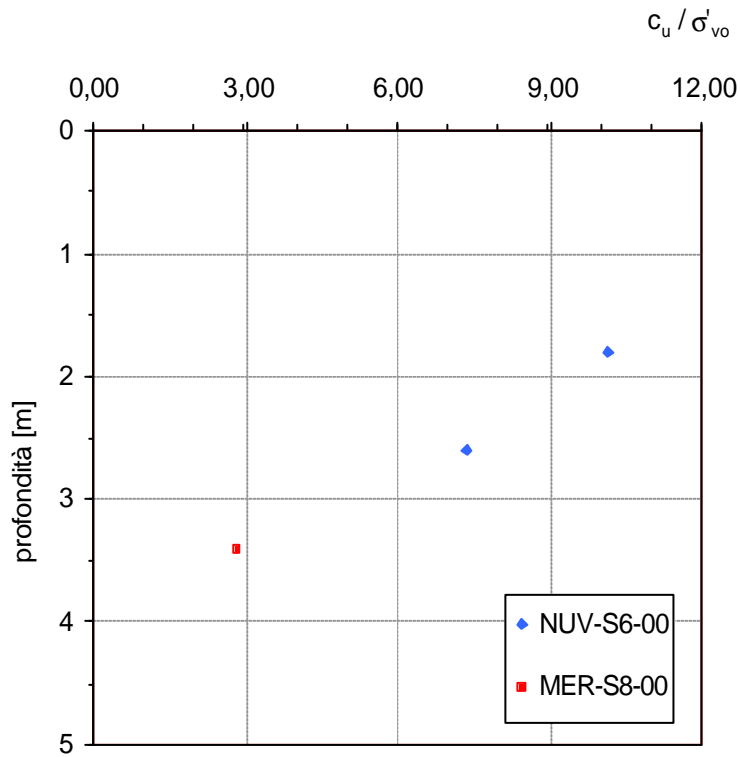


Figura 55: Valori di  $c_u$  normalizzati con la pressione efficace determinati in sito con penetrometro e torvane tascabili

### 8.2 Proprietà meccaniche da prove dinamiche

Per la determinazione delle proprietà dinamiche sono state utilizzate le stesse verticali, su cui sono state eseguite misure di  $N_{SPT}$ , N. 4 prove DH.

Nella Figura 56 sono riportati i valori del numero dei colpi  $N_{SPT}$  in funzione della profondità. Nella Figura 55 sono riportati i profili delle  $V_S$  relativi ai singoli sondaggi. Nessuno dei quattro campioni indisturbati è stato sottoposto a prove dinamiche di laboratorio.

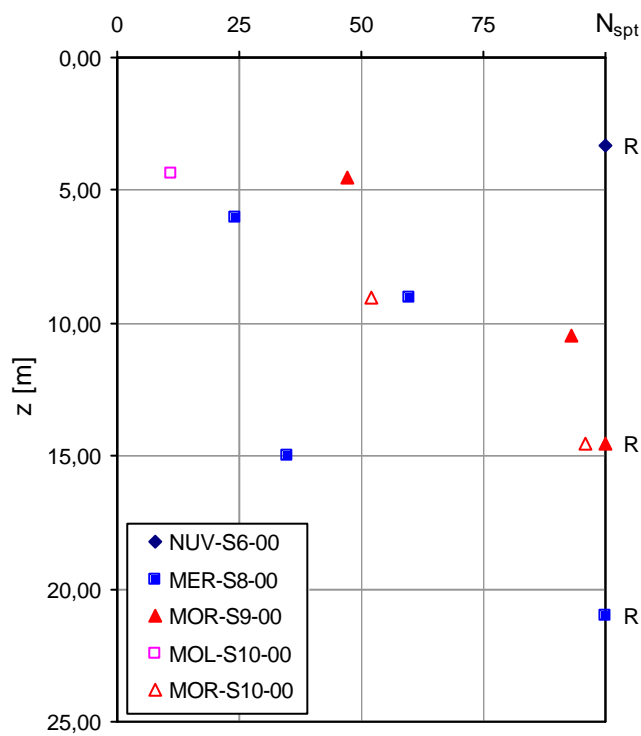


Figura 56: Valori di  $N_{SPT}$  in funzione della profondità determinati sui quattro subsintemi

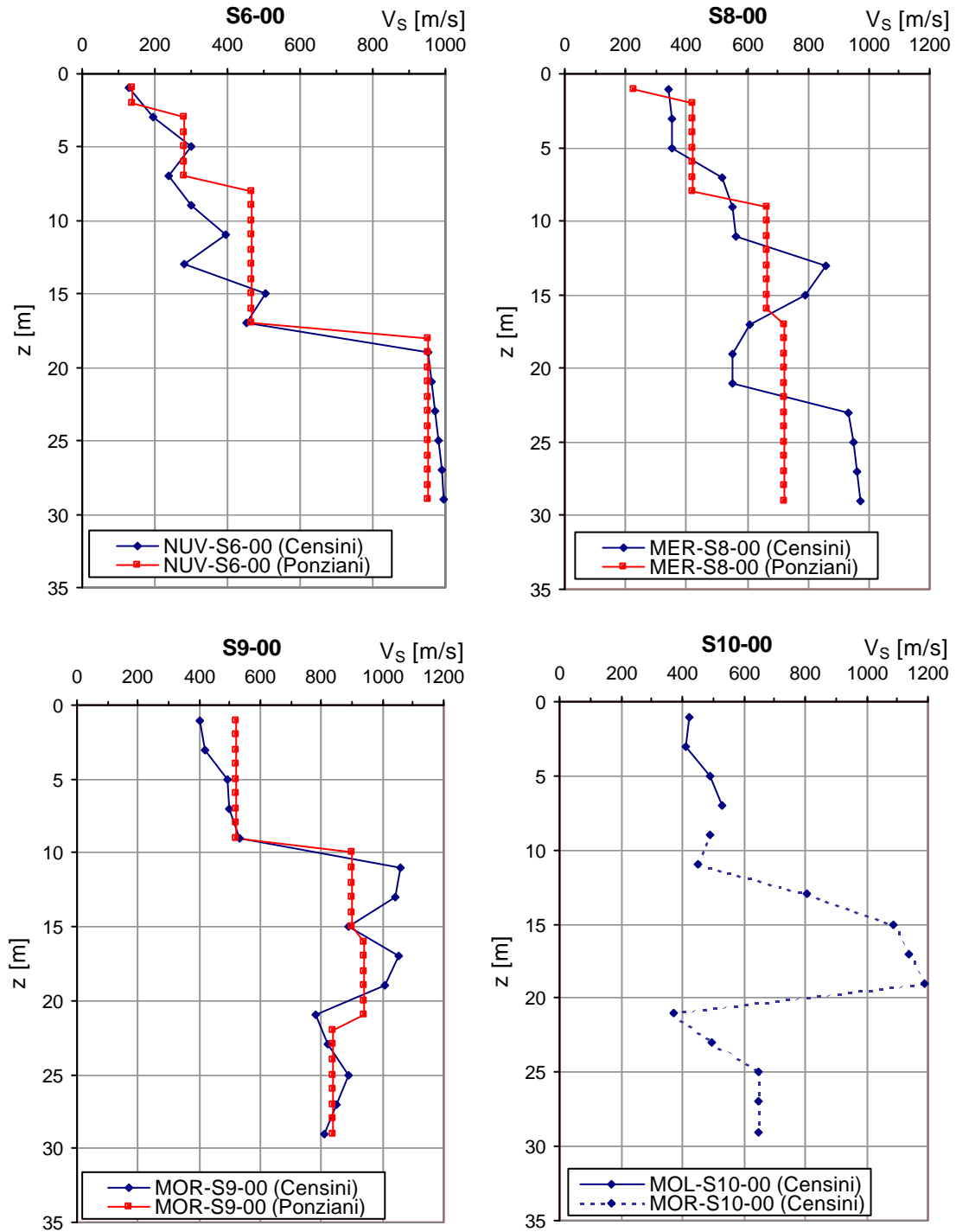


Figura 57: Profili di velocità delle onde di taglio ottenuti mediante DH nei quattro subsistemi di: Nuvole, Mercatale, M. Rotondo e Molin dell'Olio



## 9. Prove CPT

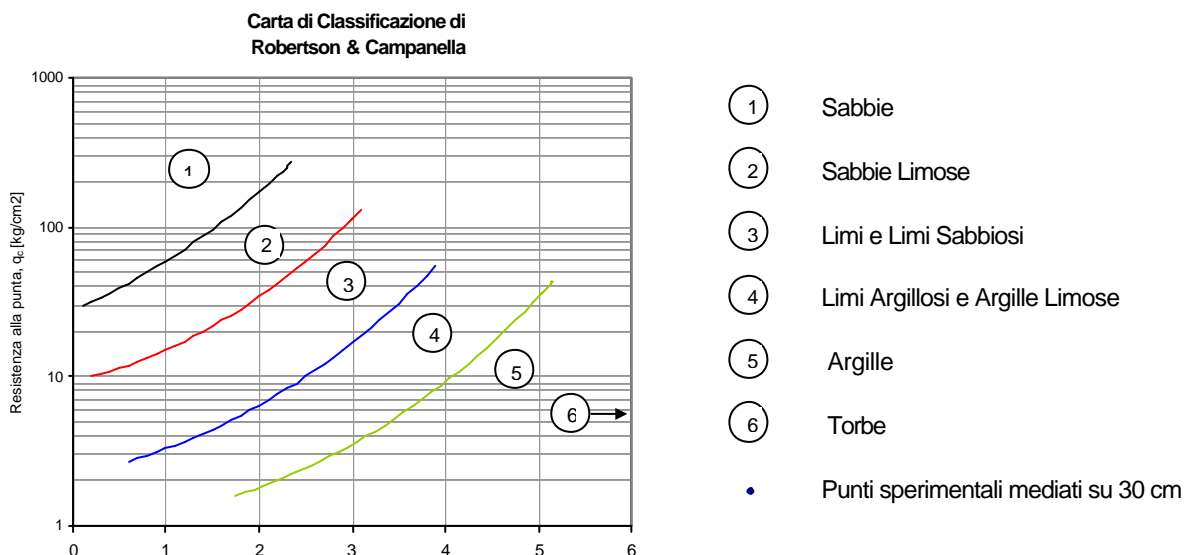
I dati digitalizzati delle prove CPT a punta elettrica (resistenza alla punta  $q_c$  e resistenza d'attrito laterale  $f_s$ ) sono stati forniti al DIC dall'Amministrazione Regionale, e pertanto non vengono qui riportati.

Tali dati sono stati esaminati in vista sia di pervenire ad una classificazione dei materiali incontrati nelle verticali esplorate, sia della ricerca di correlazioni di validità regionale con la velocità delle onde di taglio  $V_S$  (misurate con prove down-hole o cross-hole in fori di sondaggio situati in prossimità).

a) *Classificazione* Delle diverse correlazioni esistenti per la classificazione dei terreni da prove CPT si sono utilizzate quella raccomandata dall'A.G.I. (1977) e quella proposta da Robertson e Campanella (1983). L'identificazione del terreno secondo l'A.G.I., che si basa solo sull'indice di attrito ( $I_f = q_c / f_s$ ) prevede le seguenti classi di terreno:

- 1) torbe e argille organiche ( $I_f \leq 15$ )
- 2) limi e argille ( $15 < I_f \leq 30$ )
- 3) limi sabbiosi e sabbie limose ( $30 < I_f \leq 60$ )
- 4) sabbie e sabbie con ghiaia ( $I_f \geq 60$ )

La classificazione di Robertson e Campanella (1983), oltre ad essere più recente e specifica per il penetrometro statico elettrico, presenta il vantaggio di essere più affidabile in quanto utilizza sia i valori misurati della resistenza alla punta,  $q_c$ , che del rapporto d'attrito ( $FR = 100 f_s / q_c$ ). Le classi di terreno identificabili con tale metodo sono riportate nel grafico seguente.



I punti sperimentali sono stati mediati ogni 30 cm e sono mostrati nella Figura 58 da a) ad h). Come si può osservare, la grande maggioranza dei punti sperimentali ricadono nelle zone corrispondenti ai limi sabbiosi e ai limi argillosi.

b) *Correlazioni  $q_c$  -  $V_S$*  - Per quanto riguarda la ricerca di correlazioni regionali tra  $q_c$  e  $V_S$ , è innanzitutto da sottolineare che le prove CPT effettuate hanno raggiunto il substrato roccioso (o formazioni molto dure) a profondità diverse, e possono da questo punto di vista essere divisi in tre gruppi. Le prove PS1, PS2, PS4, e PS15 sono decisamente prove molto corte, raggiungendo rispettivamente profondità di 3.20m, 1.65m, 3.40m, 4.5m. Le prove PS3, PS5, PS6, PS9, PS10, PS14, PS17, PD6, PD9, caratterizzate da un valore della resistenza alla punta  $q_c$  all'incirca costante con la profondità (generalmente con valori inferiori a 4MPa), hanno incontrato la formazione rocciosa a una profondità tra i 6.5 e i 9m, profondità alla quale quindi le prove sono state arrestate. Il terzo gruppo, costituito dalle prove PS8, PS11, PS12, PS16, PS18, PS19, PS20, PS21, PD8, caratterizzato da valori mediamente compresi tra 2 e 4MPa, hanno incontrato il substrato a profondità superiori ai 10 m e fino 20 metri circa, quota massima alla quale sono state arrestate.

Ai fini della ricerca di una relazione  $V_S \subset q_c$ , solo le CPT del terzo gruppo potevano essere prese in considerazione. Tuttavia, solo in alcuni casi in prossimità delle prove CPT si disponeva di misure di  $V_S$  in fori di sondaggio. Inoltre, solo in due casi (PS11 e PS21) il confronto è risultato significativo, ma in una delle due verticali (prova PS11), le misure di  $V_S$  nel vicino sondaggio S5-00 sono incerte. Perciò basandosi sulle misure di una sola verticale non si è potuta ricavare una correlazione di validità regionale, per la quale l'incertezza nelle stime sarebbe risultata elevata almeno quanto quella delle correlazioni di letteratura.

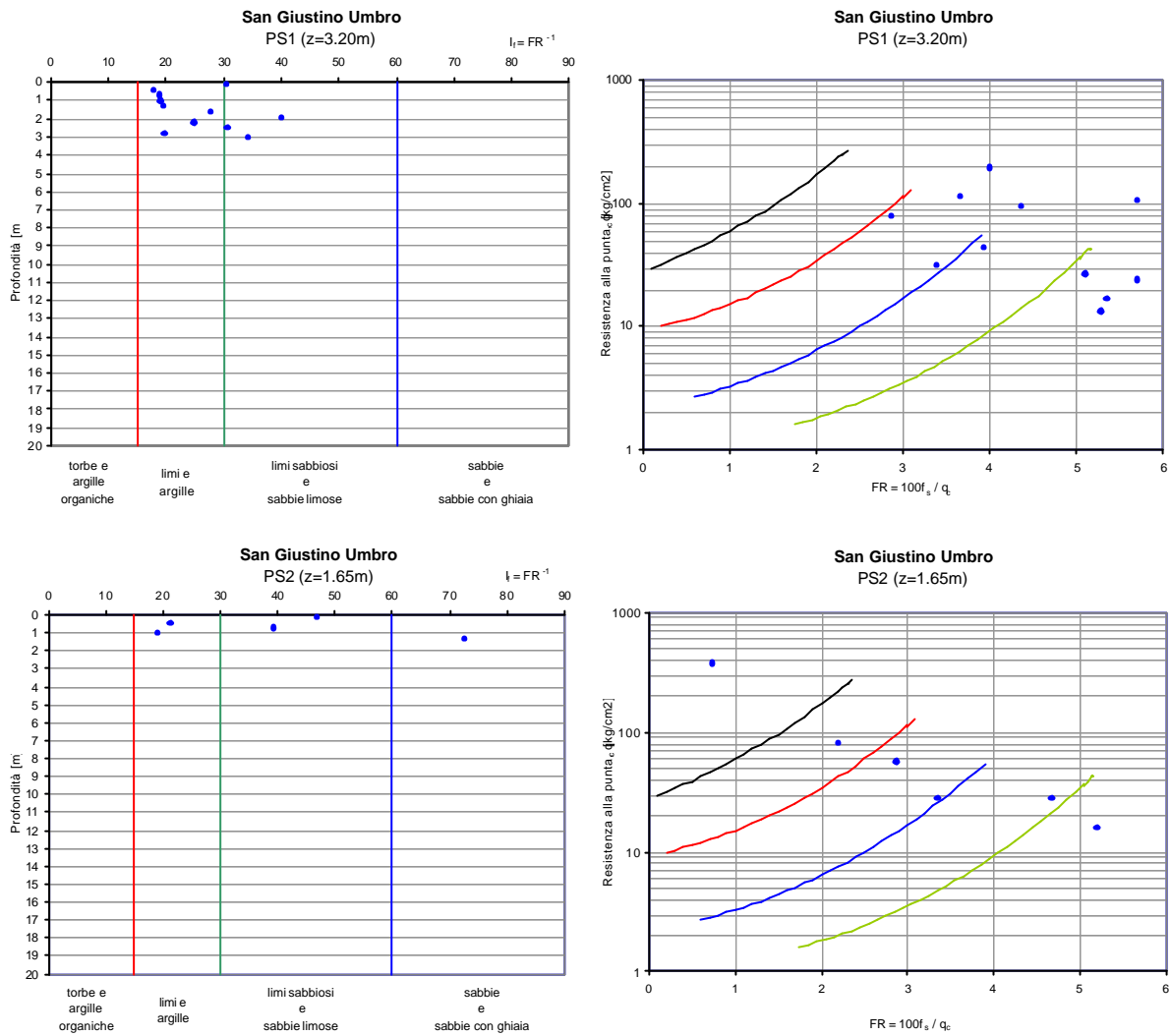


Fig. 58 (a): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

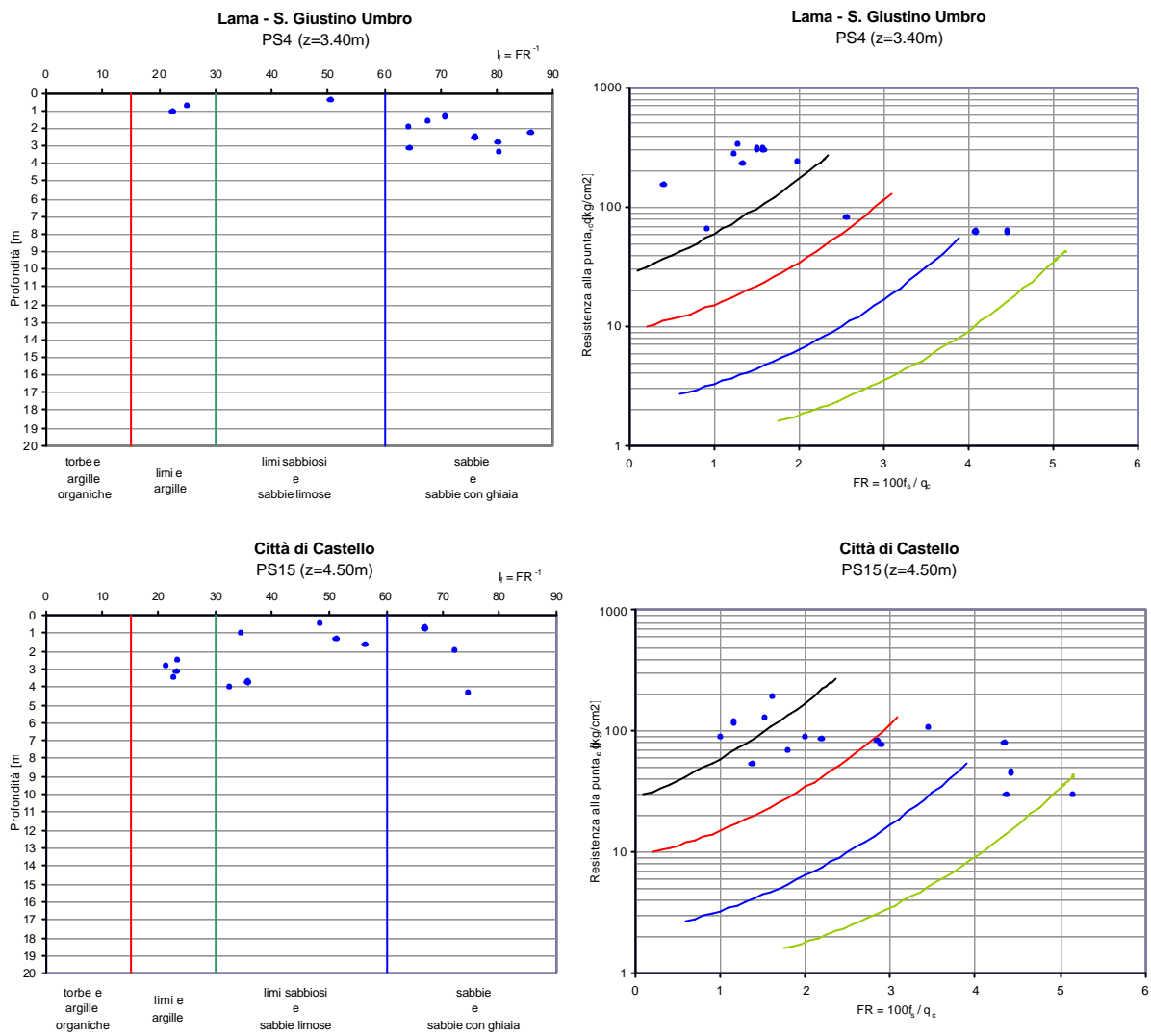


Fig. 58 (b) : Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

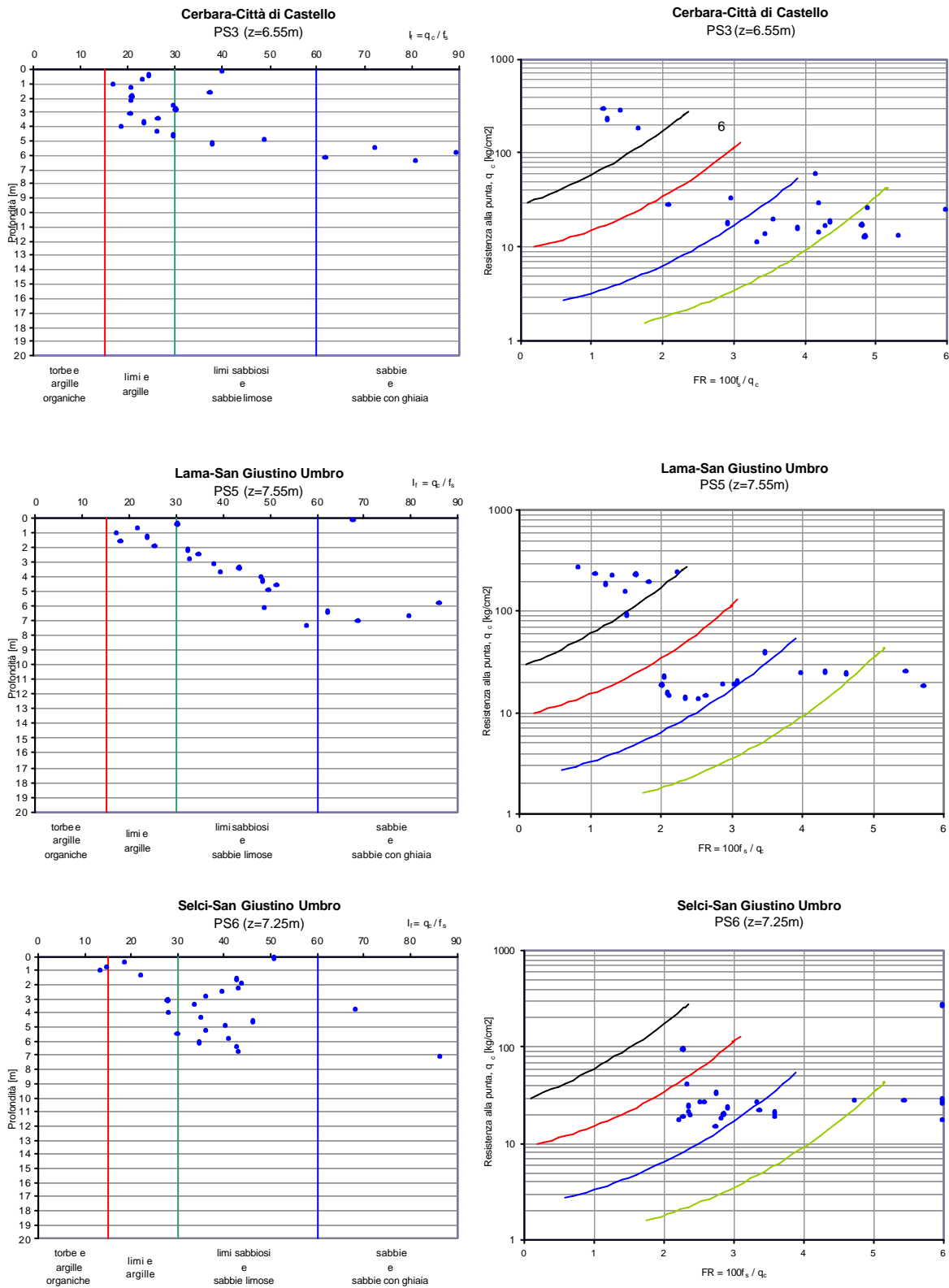


Fig. 58 (c) : Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

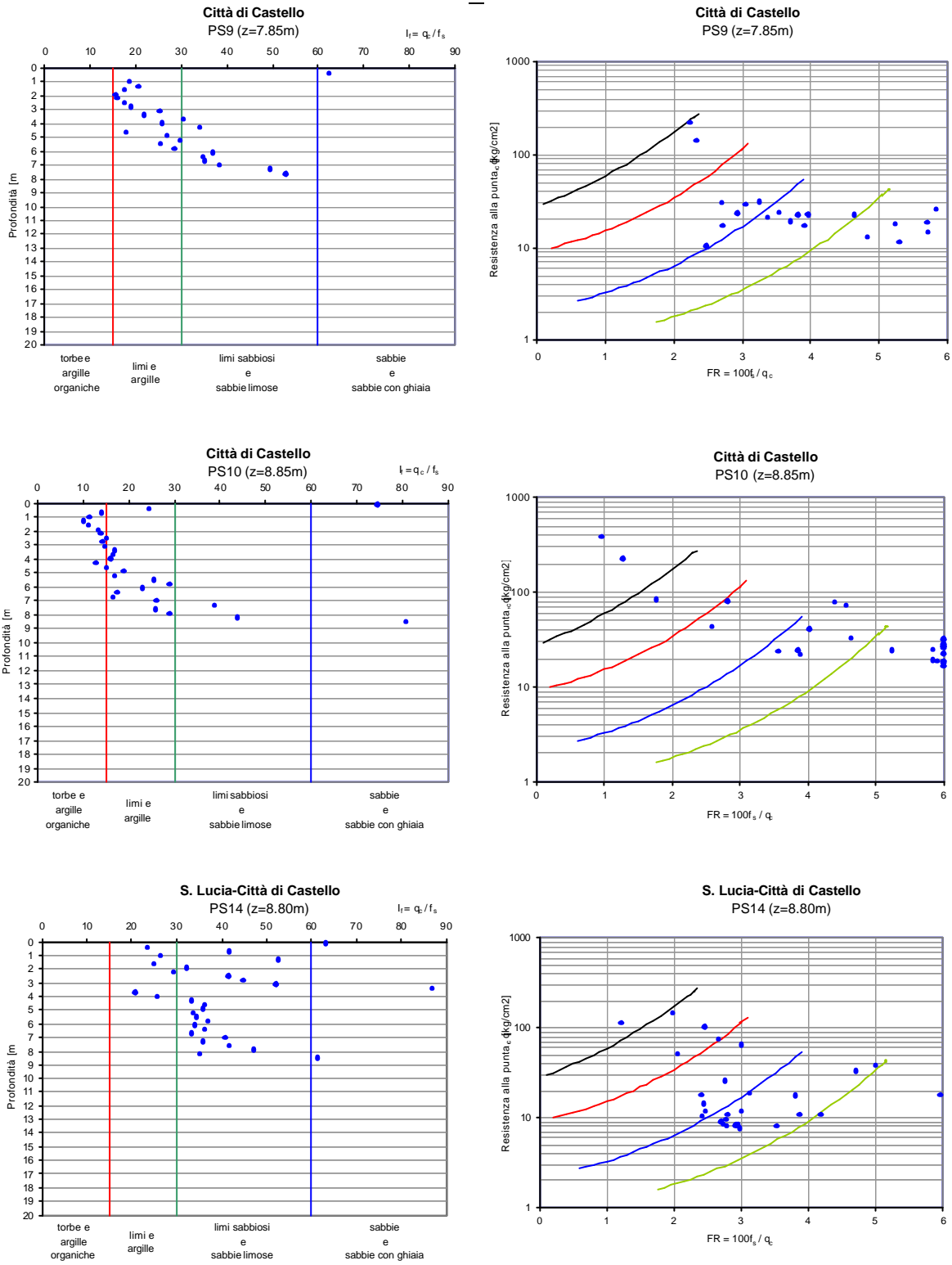


Fig. 58 (d): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

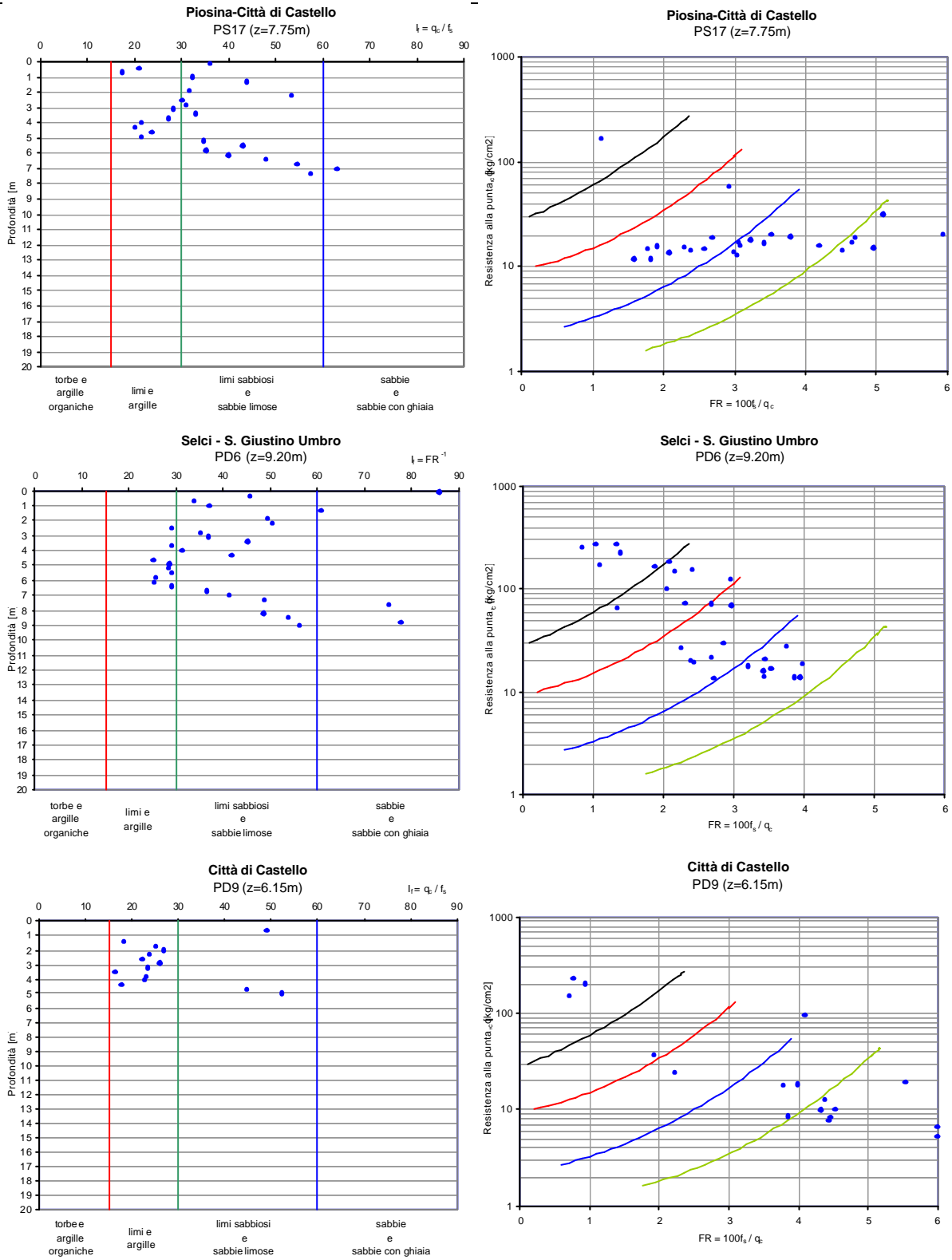


Fig. 58 (e): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

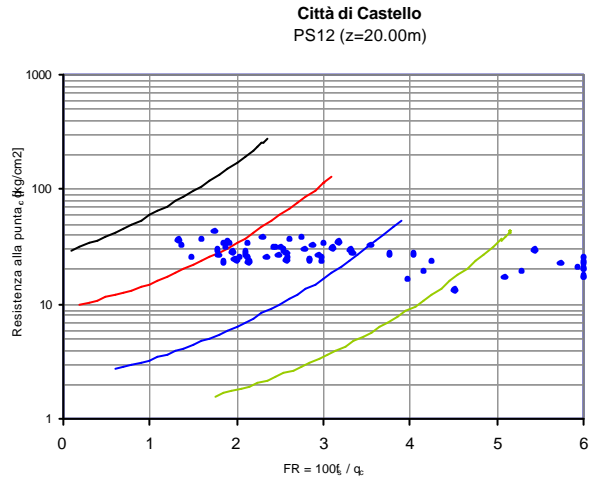
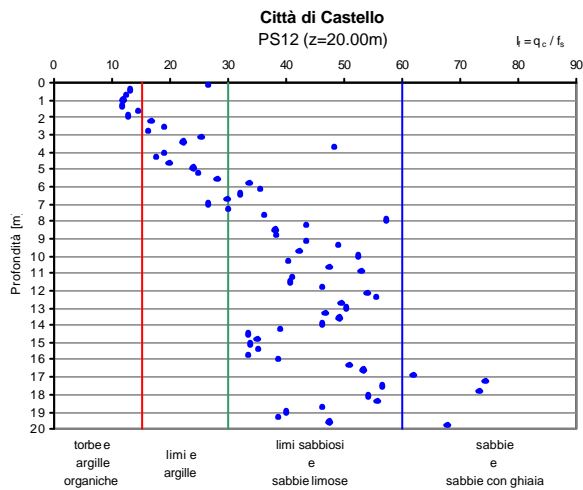
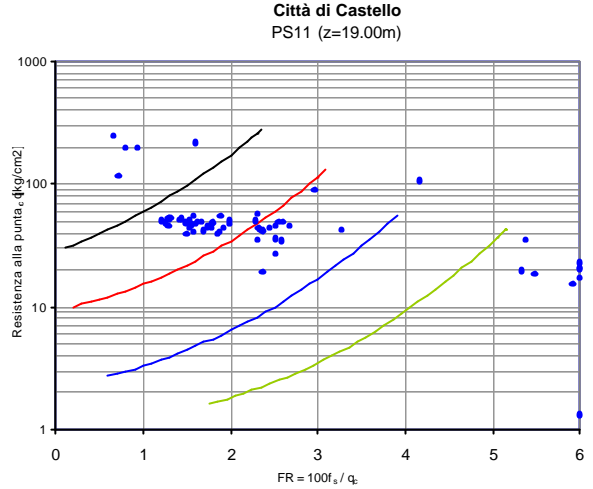
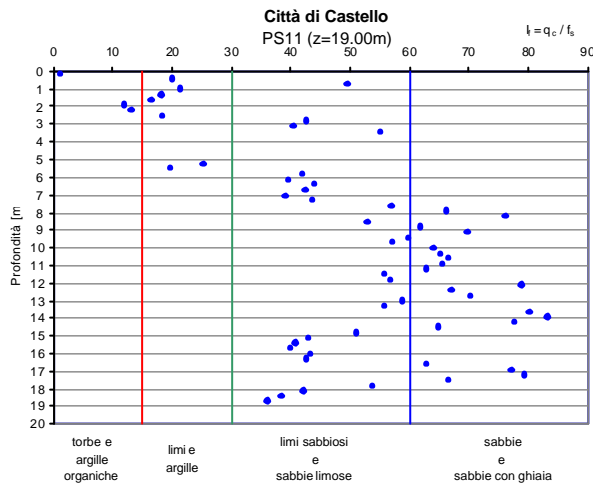
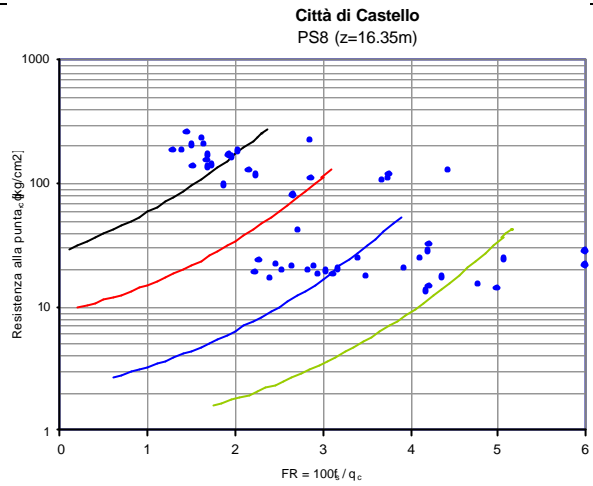
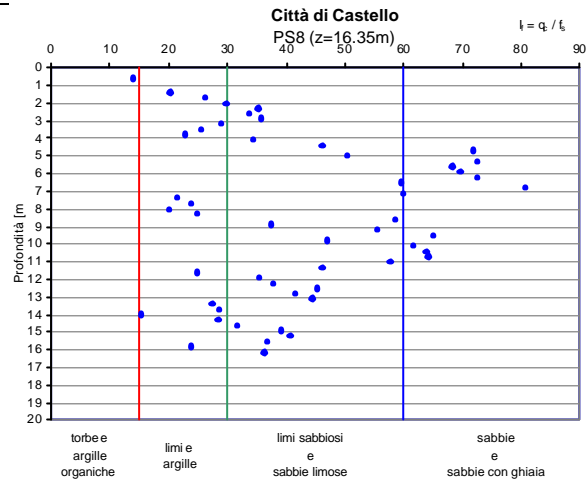


Fig. 58 (f): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)



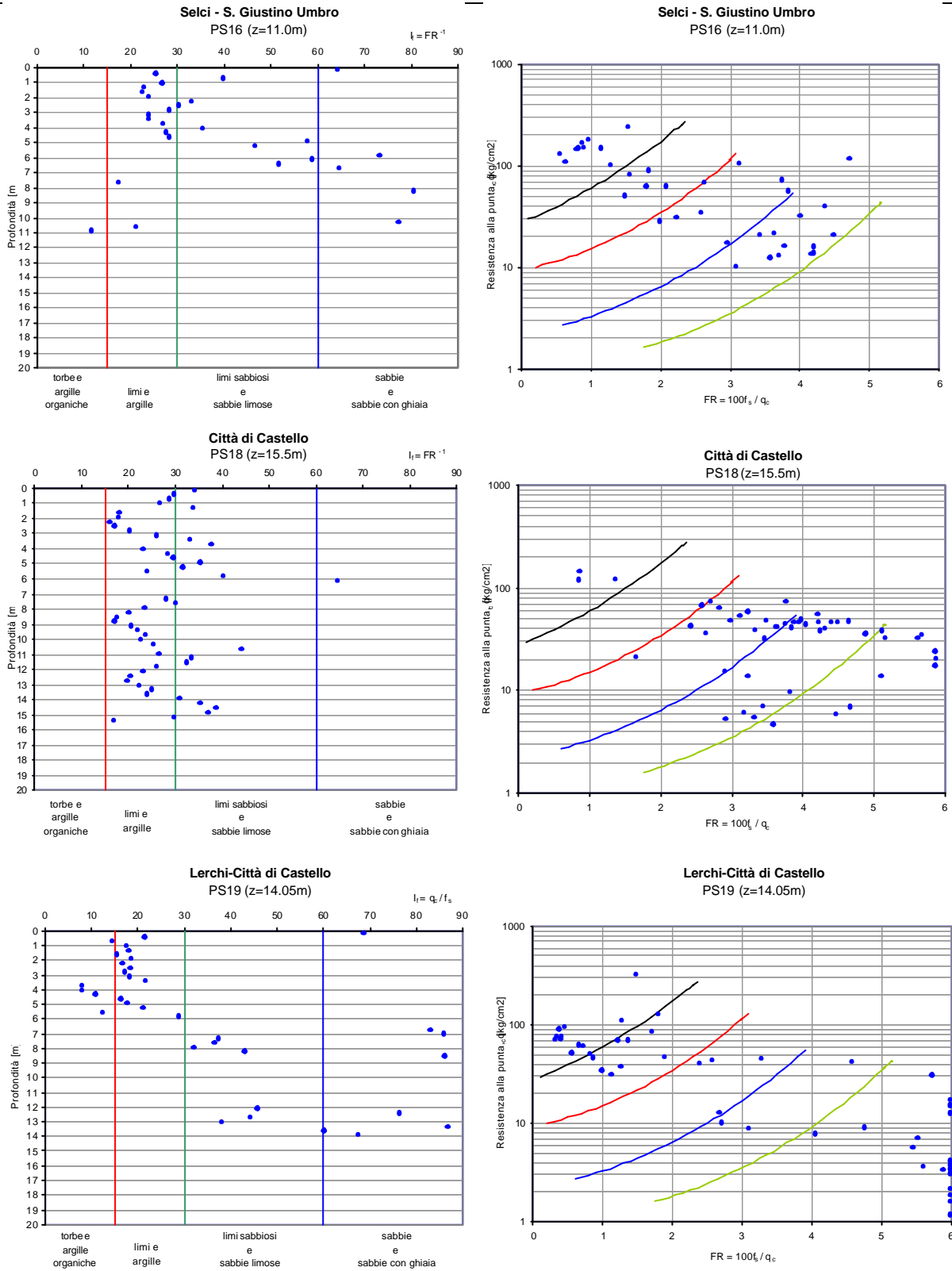


Fig. 58 (g): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

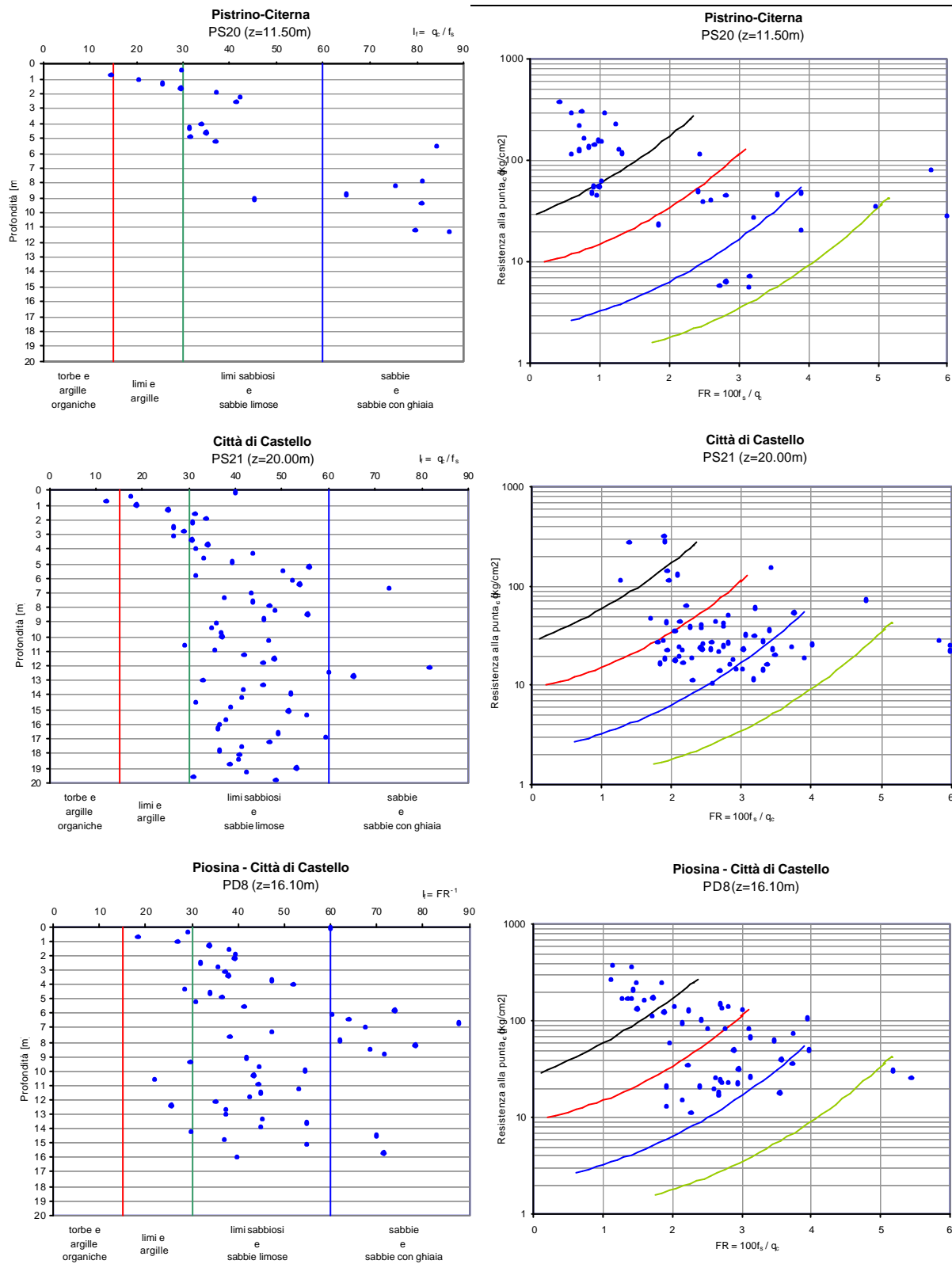


Fig. 58 (h): Identificazione dei terreni in base ai risultati di prove penetrometriche statiche (punta elettrica) secondo Robertson & Campanella (1983) ed A.G.I. (1977)

## 10. Analisi dei risultati

I risultati delle indagini sperimentali e delle elaborazioni effettuate ed esposte separatamente per le diverse formazioni rivelano che esistono similarità e differenze di comportamento, che non sono facilmente evidenziabili dal momento che per alcuni subsistemi le informazioni disponibili sono troppo poche per trarne considerazioni di carattere generale.

Le formazioni per le quali le informazioni geotecniche sono più elevate sono, come si è visto, le Alluvioni Recenti e Terrazzate, il Sintema di Fighille e il Subsistema di Selci Lama. Per queste formazioni, il confronto delle proprietà geotecniche in campo statico e dinamico ha portato alle seguenti osservazioni.

a) *Proprietà indici e classi di terreno* - I campioni esaminati in laboratorio appartenenti alle quattro formazioni si dispongono nella carta di plasticità del Sistema Unificato (Figura 59) secondo una retta parallela alla retta "A". Le Alluvioni Recenti e le Alluvioni Terrazzate si trovano nella parte inferiore del diagramma, il Subsistema di Selci Lama si trova prevalentemente nella parte superiore, mentre i punti rappresentativi del Sintema di Fighille, che presenta la maggiore variabilità, si trovano sia in prossimità dei punti rappresentativi delle Alluvioni sia di quelli del Subsistema di Selci Lama. Sulla base delle curve granulometriche e dei limiti di consistenza, i campioni esaminati in laboratorio risultano costituiti in prevalenza da limi argillosi e sabbiosi, inorganici, poco o mediamente plastici, di media consistenza.

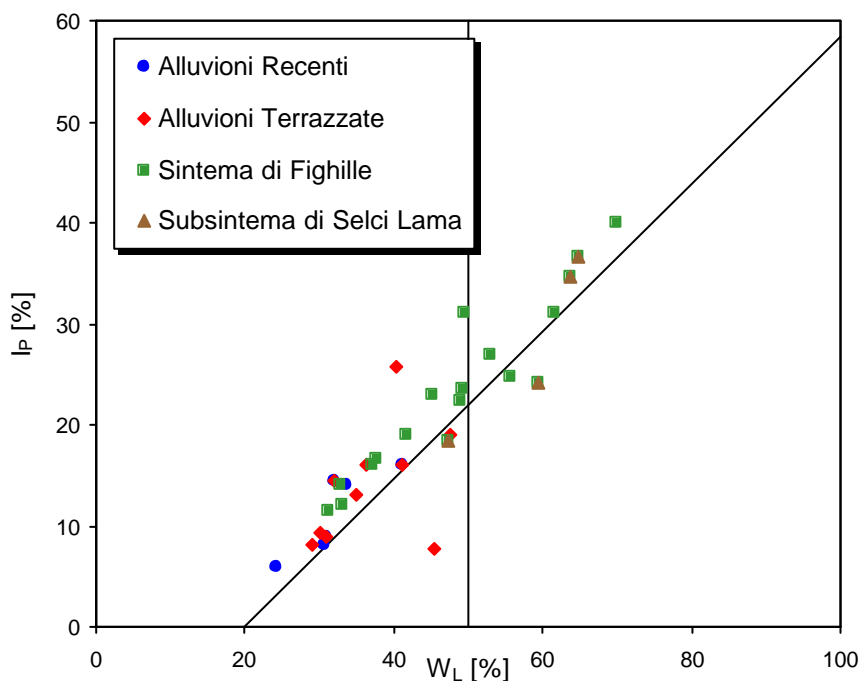


Figura 59: Carta di Plasticità del Sistema Unificato

b) *Proprietà di deformabilità* - I campioni sono mediamente tutti poco deformabili e con indice di rigonfiamento medio-alto. I valori del grado di sovraconsolidazione sono piuttosto incerti, ma sebbene caratterizzati da diverse storie tensionali, i campioni estratti a profondità superiori ai 10-12 m corrispondono alla condizione di normalconsolidazione.

c) *Proprietà di resistenza* - In laboratorio i campioni hanno un comportamento generalmente di tipo elasto- plastico, in alcuni casi con rottura fragile, con valori della coesione drenata talora diversa da zero (che in alcuni casi appaiono però eccessivi). I valori di  $N_{SPT}$ , oltre che in numero abbastanza ridotto, sono molto dispersi. Nell'andamento di  $N_{SPT} \subset z$  non è possibile identificare dei trend di crescita regolari.

c) *Proprietà in condizioni dinamiche*

I valori iniziali della rigidezza,  $G_0$ , desumibili dai valori di  $V_s$  misurati in sito, indicano nelle Alluvioni Recenti e Terrazze una qualche dipendenza con la profondità, con tasso di crescita più accentuato nei primi 15 m; questa dipendenza non è generalmente riscontrabile nel Sintema di Fighille e nel Subsintema di Selci Lama.

Le curve normalizzate del modulo di taglio per le formazioni delle Alluvioni Recenti e Terrazze, del Sintema di Fighille e del Subsintema di Selci Lama (Figura 60) presentano un andamento molto simile su tutto il campo di deformazione analizzato.

Le curve del rapporto di smorzamento (Figura 61) presentano differenze trascurabili nel valore iniziale e fino a deformazioni dell'ordine dello 0.2%, che, limitatamente ai materiali appartenenti alla formazione di Selci Lama, diventano maggiori, ma comunque contenute, per valori superiori di  $g$ .

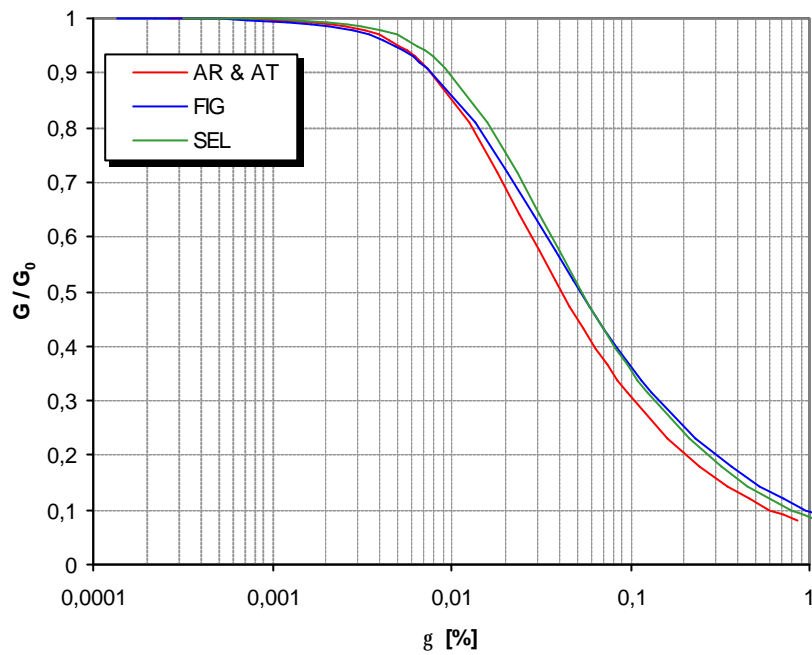


Figura 60: Curve normalizzate del modulo di taglio per le formazioni delle Alluvioni Recenti e Terrazze, del Sintema di Fighille e del Subsistema di Selci Lama

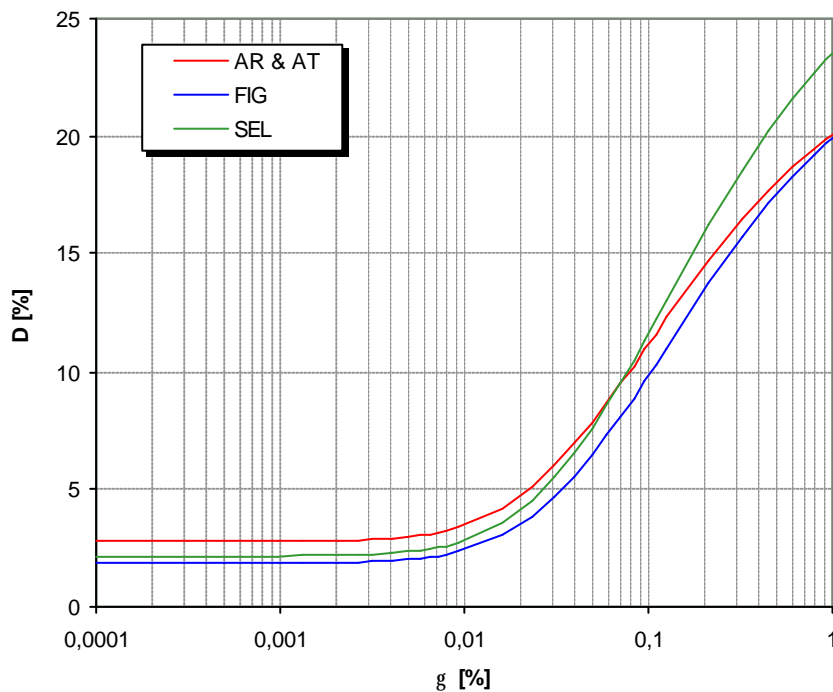


Figura 61: Curve del rapporto di smorzamento per le formazioni delle Alluvioni Recenti e Terrazze, del Sintema di Fighille e del Subsistema di Selci Lama

## 11. Conclusioni

In conformità al programma di lavoro specificato all'art.2 della Convenzione, nella presente relazione sono stati riportati i risultati delle ricerche effettuate dal DIC (relativamente ai punti 1), 2), 3), 5) della Convenzione). Non essendo stato richiesto di effettuare l'analisi della risposta sismica locale in alcuni siti significativi da definirsi nell'ambito del Progetto (punto 4) della Convenzione), tale studio non è stato eseguito.

Il lavoro svolto ha quindi riguardato essenzialmente la caratterizzazione in campo statico e dinamico delle principali formazioni geologiche presenti nell'area di indagine, sulla base del materiale già disponibile e della elaborazione e interpretazione dei dati acquisiti nella campagna di indagini effettuata dalla Regione dell'Umbria nell'ambito del Progetto.

Le ricerche condotte hanno evidenziato che le principali formazioni studiate (Alluvioni Recenti e Terrazzate, Sintema di Fighille e Subintema di Selci Lama) presentano proprietà geotecniche abbastanza simili, soprattutto in campo dinamico.

Data la dispersione delle misure, il limitato numero di prove SPT e CPT e la loro generale scarsa significatività ai fini specifici di uno studio finalizzato alla ricerca di correlazioni tra parametri statici e dinamici, sono da ritenersi affidabili solo le correlazioni del tipo  $V_s \propto z$  per le Alluvioni Recenti.

## 12 Riferimenti bibliografici

A.G.I.(1977),"Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche"

Lancellotta (1993), Geotecnica, Zanichelli

Ramberg, W. And W.R. Osgood(1943), "Description of stress-strain curves by three parameters", Tech. Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D.C.

Robertson, P.K., Campanella, R.G. (1983), "Interpretation of cone penetration test". Part I and Part II, Can. Geot. Jour., 20(4). 718-745

Yokota et al. (1981), "Dynamic deformation characteristic of soils determined by laboratory tests", OYO Tech. Rep.3, 13-37

Firenze, maggio 2001

Il Responsabile della Convenzione

Prof. Ing. Teresa Crespellani



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

Sezione Geotecnica  
Via di S. Marta, 3 - I 50139 FIRENZE

CONVENZIONE TRA LA REGIONE DELL' UMBRIA E IL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE PER L'ESECUZIONE DI UNO "STUDIO GEOTECNICO FINALIZZATO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI NELL'AMBITO DEL PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA ZONAZIONE TERRITORIALE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE – AREA CAMPIONE ALTA VAL TIBERINA UMBRA"

**STUDIO GEOTECNICO  
FINALIZZATO ALLA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI  
IN UN' AREA CAMPIONE DELL'ALTA VAL TIBERINA UMBRA**

**INTEGRAZIONI ALLA RELAZIONE FINALE**

**Responsabile:** Prof. T. Crespellani

**Collaboratori:**

Ing. C. Madiari

Ing. G. Simoni

Luglio 2001

# INDICE

1. INTRODUZIONE
2. PROVE CON IL PENETROMETRO DINAMICO SUPERPESANTE (DPSH)
3. PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT)
4. CONFRONTO FRA I RISULTATI DELLE PROVE IN SITO E DELLE PROVE DI LABORATORIO
5. CORRELAZIONI TRA PARAMETRI STATICI E DINAMICI
6. CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ LITOTECNICHE E SINTESI DEI RISULTATI



## 1. Introduzione

La presente relazione integra e compendia i principali risultati della Relazione finale, datata Maggio 2001, presentata dal Dipartimento di Ingegneria Civile (DIC) dell'Università di Firenze, e relativa allo “*Studio geotecnico finalizzato alla valutazione degli effetti locali nell’ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione territoriale della pericolosità sismica locale – area campione alta Val Tiberina Umbra*”, oggetto della Convenzione stipulata il 23 Dicembre 1999 tra la Regione dell’Umbria e il Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università di Firenze.

In particolare il presente rapporto contiene:

- 1) l’analisi delle 5 prove penetrometriche dinamiche eseguite col penetrometro pesante DPSH (Dynamic Proby Superheavy);
- 2) ulteriori analisi ed elaborazioni dei risultati delle prove CPT
- 3) il confronto fra i risultati delle prove in sito e le prove di laboratorio al fine di determinare relazioni tra le misure dei parametri geotecnici ottenuti in laboratorio con le misure della rigidità in sito;

i risultati della ricerca di correlazioni tra parametri statici (resistenza alla punta, numero dei colpi, ecc.) e parametri dinamici (modulo di taglio o velocità delle onde S);

## 1. Prove con il penetrometro dinamico superpesante (DPSH)

Durante la campagna di indagini sono state effettuate N. 5 prove con il penetrometro dinamico superpesante (DPSH). Le prove sono state eseguite con penetrometro Pagani TG 73-100 kN, tipo ISSMFE, maglio da 63.5 kg e volata di 75 cm con un avanzamento di 20 cm.

Hanno raggiunto profondità variabili tra i 12 e i 20 m e sono state eseguite nelle seguenti località: N. 2 a Città di Castello, N.1 a Petriolo-Citerna, N.1 a Pistrino-Citerna e N.1 a S. Giustino, rispettivamente in prossimità dei sondaggi S1 ed S24, S8, S28, S4.

Ad eccezione della prova adiacente al sondaggio S8, tutte le verticali esplorate ricadono nei depositi alluvionali recenti e terrazzati.

I risultati forniti dalla Ditta esecutrice, ricondotti ad un avanzamento di 30 cm per rendere il numero dei colpi della prova DPSH comparabile con il numero dei colpi della prova SPT, sono riportati nelle Figure da 1a a 1e.

Poiché la prova DPSH non è una prova standardizzata, i suoi risultati sono sempre di difficile interpretazione. Nella Figura 2, dove tutte le prove sono state riportate in un unico grafico insieme alle misure di  $N_{SPT}$  effettuate nei sondaggi vicini, si riscontra una qualche corrispondenza tra i due tipi di misura, ma come si può meglio osservare nella Figura 3, i valori di  $N_{SPT}$  sono, ad eccezione di un caso, sempre superiori al numero dei colpi  $N_{30}$  della prova DPSH, con rapporti compresi tra 1.7 e 4.4.

In tutti i sondaggi vicini alle prove DPSH sono state eseguite misure della velocità delle onde S, e, in due siti, anche prove CPT con punta elettrica. Poiché durante la campagna di indagine non è stata effettuata una precisa localizzazione delle verticali esplorate, vi è una qualche incertezza sul profilo stratigrafico e di  $V_s$  da associare alle prove DPSH, e addirittura sulla stessa possibilità di correlare i risultati delle diverse prove.

Sono stati comunque individuati i seguenti gruppi di verticali:

- 1) Prova dinamica PD21 - Sondaggio S1
- 2) Prova dinamica PD20 - Sondaggio S28 - Prova CPT PS20
- 3) Prova dinamica PD22 - Sondaggio S24 - Prova CPT PS21
- 4) Prova dinamica PD24 - Sondaggio S8
- 5) Prova dinamica PD23 - Sondaggio S4

I risultati dei confronti effettuati sui parametri desunti da tali gruppi di prove sono riassunti nella Tabella 1, dove, oltre alla localizzazione del sito e alle unità litotecniche incontrate, sono riportati: il campo di valori del numero dei colpi  $N_{30}$  alle diverse profondità, i valori medi della

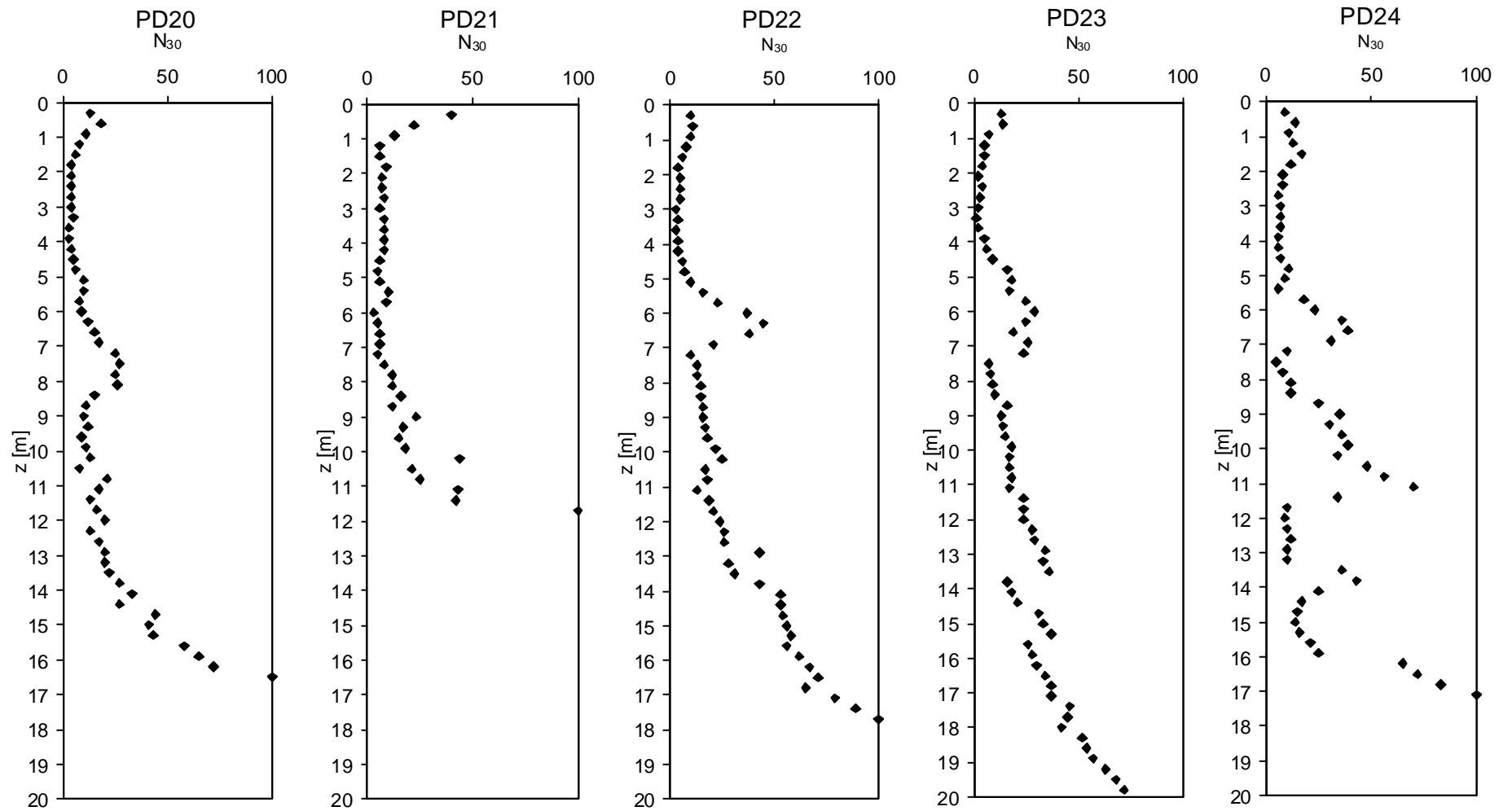


Figura 1 - Risultati delle prove DPSH

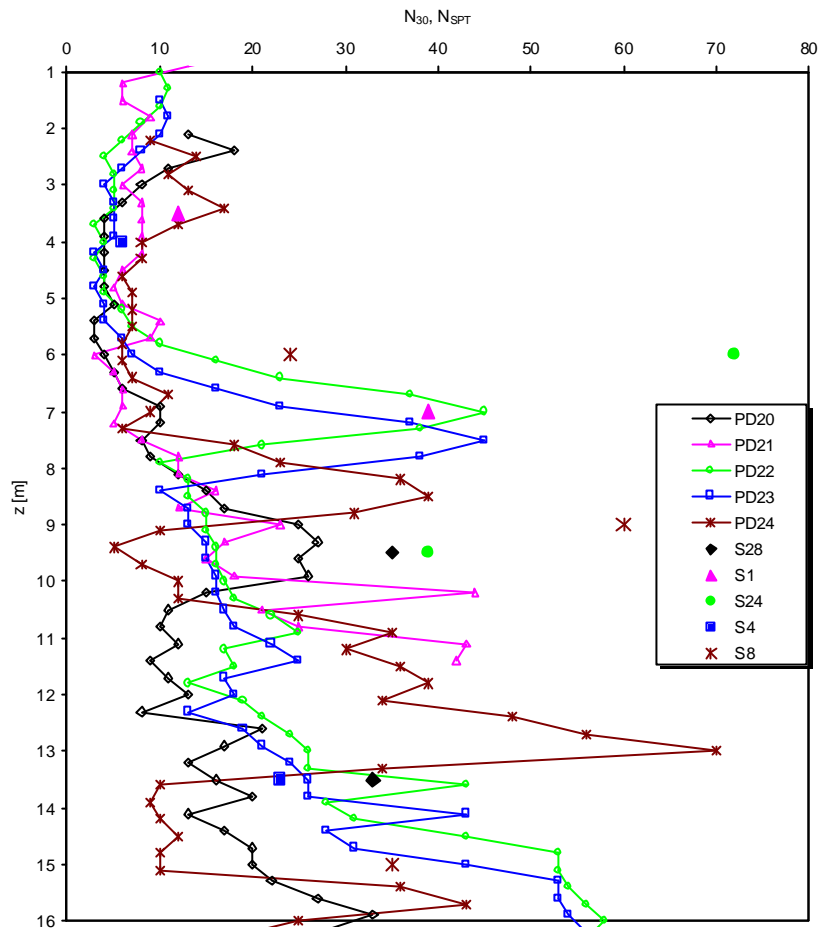


Figura 2 - Confronto tra i valori di  $N_{30}$  e i valori di  $N_{SPT}$

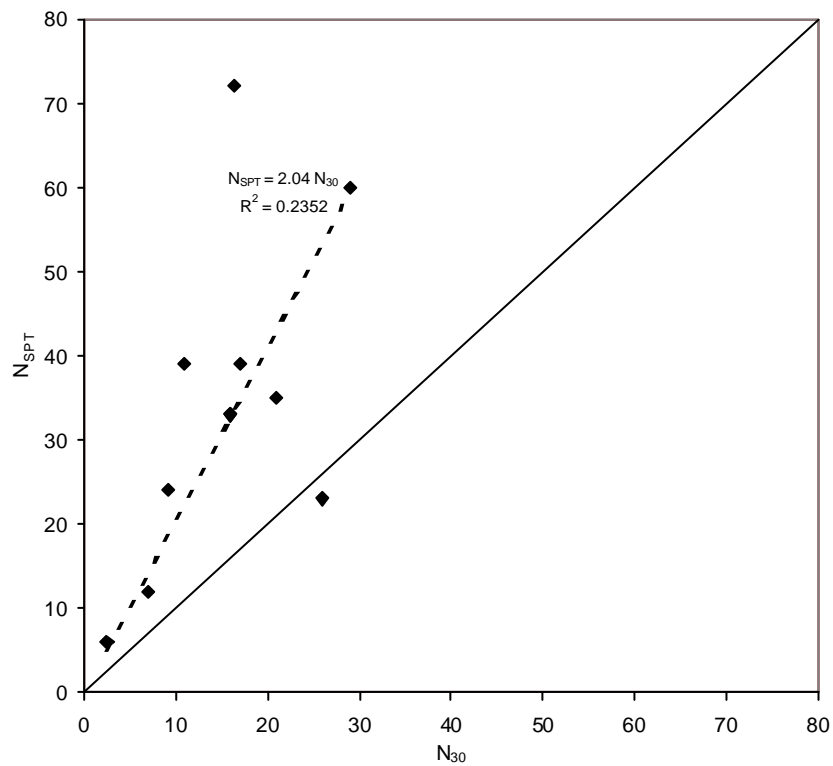


Figura 3 - Correlazione tra  $N_{30}$  e  $N_{SPT}$

resistenza alla punta  $q_c$  (laddove esistono), e della velocità delle onde di taglio  $V_s$  misurata nei fori di sondaggio esplorati con la procedura crosshole (CH) o downhole (DH).

In generale si riscontra una buona corrispondenza tra i parametri  $N_{30}$ ,  $q_c$ ,  $V_s$  con una tendenza ad assumere valori crescenti con la profondità.

*Tabella 1 - Principali risultati del confronto tra verticali esplorate con prove DPSH, CPT e DH*

Sito	Prova DPSH	Sondaggi e CPT	Profondità raggiunta m	Litotipo e Formazione presunta	$N_{30}$	$q_c$ MPa	$V_s$ m/s
Città di Castello	PD21	S1	11.40	Fino a 10 m AT	5-10	-	250
				Oltre 10 m AT e SL	> 40	-	400-500
Città di Castello	PD22	S24 PS21	17.70	Fino a 5 m AT fini	5-10	1.5	250
				Da 5 a 12 m AT con alternanze	10-25	2	250-450
				Oltre 12 m AF	> 40	3	300
Pistrino Citerna	PD20	S28 PS20	16.20	Fino a 6 m AR fini	5-10	3	250
				Da 6 a 13m AR grossolane	10-20	10	300
				Oltre 13 m AR grossolane	> 40	-	400-600
Petriolo Citerna	PD24	S8	17.10	Fino a 6 m SM fini	10	-	350
				Da 6 a 16 m SM con alternanze	15-40	-	500-550
				Oltre 16 m SM alternanze con materiali grossolani	> 60	-	800
S. Giustino	PD23	S4	20.40	Fino a 4.5 m AT fini	5	-	200
				Da 4.5 a 16 m AT con alternanze	15-30	-	200-300
				Oltre 16 m AT fini	> 40	-	>250

AR = Alluvioni recenti    AT = Alluvioni terrazzate    SL = Subsintema di Selci Lama

AF = Argille di Fighille    SM = Subsintema di Mercatale

## 1. PROVE PENETROMETRICHESTATICHE (CPT)

I risultati delle elaborazioni condotte sulle N. 22 prove CPT eseguite sono stati già in parte commentati nella Relazione Intermedia (Settembre 2000) e nella Relazione Finale (Maggio 2001).

Di esse, 4 non sono in pratica significative perché spinte solo fino a una profondità massima di 4.5 m. Le rimanenti hanno raggiunto profondità comprese tra i 7m e i 20 m, e sono

caratterizzate, tranne qualche strato isolato di materiali grossolani, da valori di  $q_c$  generalmente compresi tra 2 e 4 MPa.

Le nuove elaborazioni condotte su tali prove hanno riguardato i seguenti aspetti:

- natura dei materiali incontrati e stato consistenza o addensamento
- variabilità della resistenza alla punta con la profondità
- correlabilità delle CPT con altre prove in sito

*a) Materiali incontrati e loro consistenza o addensamento*

In base alla classificazione effettuata con il metodo di Robertson e Campanella, i cui risultati sono stati riportati nelle precedenti relazioni, si può notare in generale una netta prevalenza di materiali fini (limi argillosi e sabbiosi) nei primi 5-7 m, mentre al di sotto di tale quota, all'aumentare della profondità, alla componente limo argillosa si associa una presenza sempre più rilevante della componente sabbiosa e ghiaiosa, con alternanze di materiali fini e grossolani, che finiscono per risultare prevalenti negli strati inferiori.

Per valutare lo stato di consistenza e compattezza di tali materiali, nella Tabella 2 sono riportati i valori di riferimento di  $q_c$  di letteratura. Su tale base, si può affermare che i valori di  $q_c$  misurati nell'area in studio (e compresi come già detto tra 2 e 4 MPa) evidenziano la presenza di due tipi fondamentali di materiali, la cui consistenza (o compattezza) è rispettivamente medio alta e medio bassa. Laddove i valori di  $q_c$  compresi tra 2 e 4 MPa corrispondono a materiali fini (limi argillosi), lo stato di consistenza è medio o medio - alto, mentre, laddove prevalgono limi sabbiosi o sabbie, lo stato di addensamento è da ritenersi invece mediamente addensato o poco addensato.

Nei materiali a prevalente componente argillosa, la buona consistenza del materiale è anche comprovata dai valori della coesione non drenata misurata in laboratorio, che in tutti campioni esaminati è sempre superiore a 50 kPa.

*Tabella 2 - Valori di riferimento di  $q_c$  per la valutazione della consistenza e compattezza dei vari materiali.*

	<i>Argilla</i>			<i>Limo</i>			<i>Sabbia</i>			<i>Ghiaia</i>		
Consistenza	S	M	D	S	M	D	S	M	D	S	M	D
$q_c$ (MPa)	0.2-0.7	0.7 -1	2 - 2.5	1	2	3	5	15	25	15	25	>30

S = Soffice o sciolto

M = Media consistenza o compattezza

D = Molto consistente o addensato

*b) Andamento di  $q_c$  con la profondità e relazione  $q_c \subset z$*

Come già detto, le prove CPT sono state effettuate sui depositi alluvionali recenti e terrazzati. Poiché tali depositi sono di natura arealmente molto composita, con diversa prevalenza delle componenti fini e grossolane, le relazioni  $q_c \subset z$  sono state studiate separando i valori della resistenza alla punta in due gruppi, in funzione della granulometria del materiale attraversato. Il primo gruppo di valori è quello relativo ai materiali che secondo la classificazione effettuata sono risultati essere a grana fine, mentre il secondo gruppo di valori è quello relativo ai materiali a grana grossa. Ciò ha permesso di togliere i principali incrementi dei valori della resistenza alla punta nei profili  $q_c - z$  determinati dai materiali a grana grossa. Nelle Figure 4a e 4b sono riportati i profili di  $q_c$  in funzione della profondità per i materiali a grana fine e per i materiali a grana grossa presenti nelle alluvioni recenti e terrazzate. Come si può osservare, i valori sono molto dispersi e non appare possibile identificare dei chiari trend con la profondità.

Per individuare meglio gli andamenti medi, è stata effettuata una elaborazione statistica dei dati disponibili; nella Tabella 3 sono riportati i valori medi,  $m$  e le deviazioni standard,  $std$ , per i valori della resistenza alla punta,  $q_c$ , in funzione della profondità e della granulometria del materiale. Nelle Figure 5a e 5b sono riportati i profili medi di  $q_c \subset z$  e le deviazioni standard.

Come si può osservare, la dispersione dei valori assunti dalla resistenza alla punta risulta essere elevata, nonostante la distinzione effettuata tra materiali a grana fine e materiali a grana grossa.

*Tabella 3: Valori medi,  $m$  e deviazioni standard,  $std$ , dei valori di  $q_c$  misurati nei materiali di origine alluvionale*

<b>Unità litotecnica</b>	<b>Profondità [m]</b>	<b>m [Mpa]</b>	<b>Std [Mpa]</b>
Materiali di origine alluvionale (materiali a grana grossa e a grana fine)	1 ÷ 5	2.90	0.49
	5 ÷ 10	8.27	1.71
	10 ÷ 20	6.04	2.65
Materiali alluvionali a grana fine	1 ÷ 5	2.04	0.44
	5 ÷ 10	2.91	0.77
	10 ÷ 16	3.87	1.18
Materiali alluvionali a grana grossa	1 ÷ 10	14.61	4.09
	10 ÷ 13	8.96	3.40

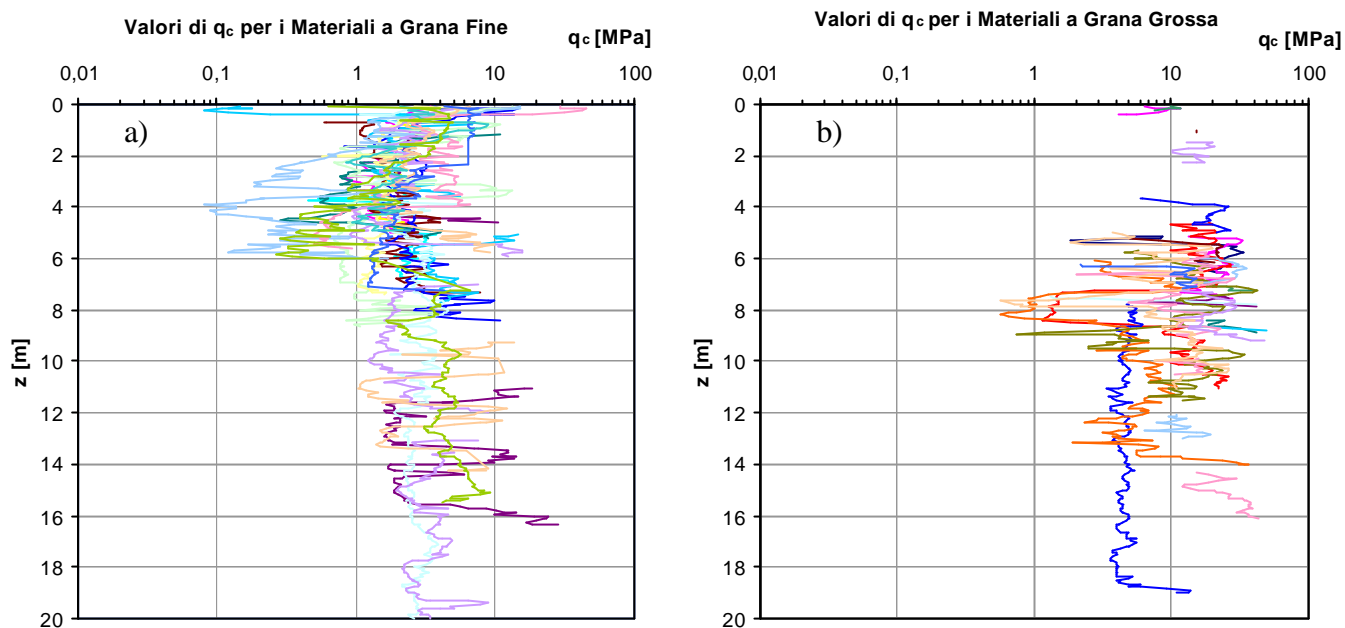


Figura 4: Profili di  $q_c$  in funzione della profondità per i materiali a grana fine (a) e per i materiali a grana grossa (b) presenti nelle alluvioni recenti e terrazzate

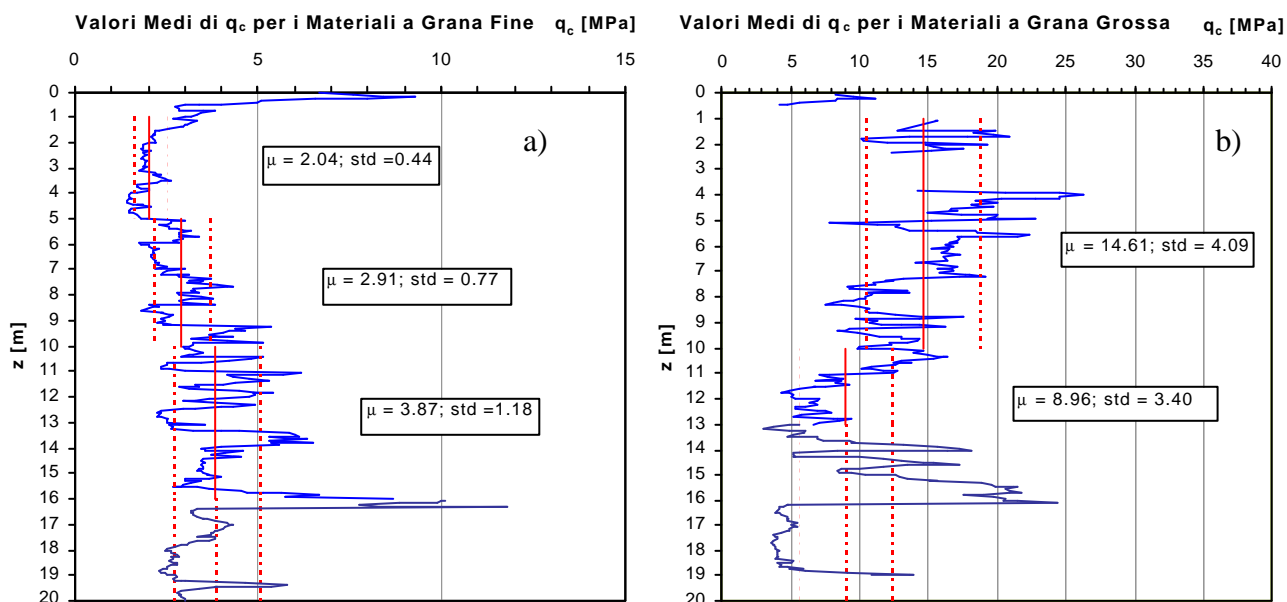


Figura 5: Profili medi di  $q_c$  in funzione della profondità per i materiali a grana fine (a) e per i materiali a grana grossa (b) presenti nelle alluvioni recenti e terrazzate



Al fine di determinare la relazione  $q_c \subset z$  si è cercato di regolarizzare i profili di  $q_c$  togliendo i valori al di fuori dell'intervallo individuato dal valore medio + e - una deviazione standard. Come mostrato nella Figura 6a e 6b i risultati ottenuti dopo tale operazione rimangono insoddisfacenti. Infatti, ad esempio, il valore assunto dal coefficiente di determinazione,  $R^2$ , della regressione lineare per i materiali fini di origine alluvionale passa da 0.0199 a 0.0935.

*c) Correlazione di  $q_c$  con altri parametri da prove in sito*

Su specifica richiesta dell'Amministrazione regionale, sono state condotte delle nuove elaborazioni per correlare  $q_c$  con altri parametri del terreno desunti da prove in sito. I risultati di tali elaborazioni, che confermano le considerazioni espresse nella Relazione Finale, verranno commentati più in dettaglio nel seguente paragrafo 4.

## **2. CONFRONTO FRA I RISULTATI DELLE PROVE IN SITO E DELLE PROVE DI LABORATORIO**

Tale confronto è stato effettuato con riferimento ai parametri di più diretto interesse per lo studio di microzonazione, e cioè il modulo di taglio  $G_0$  (o  $V_S$ ).

Come osservato in letteratura, i valori misurati in sito e in laboratorio non coincidono e i valori del rapporto sito/laboratorio generalmente riscontrati sono intorno a 1.5-2.5. Questa differenza appare giustificata se si pensa al disturbo dei campioni e alle diverse condizioni al contorno, tuttavia valori superiori a questi indicati sono da considerare sospetti.

Nella Figura da 7a a 7f sono riportati i valori di  $V_S$  misurati in sito nelle verticali dove sono state effettuate prove dinamiche di laboratorio, sia nel corso della presente campagna che in una precedente campagna del 1995. Nelle stesse figure sono riportati i valori di  $V_S$  desunti dalle misure di  $G_0$  ricavate in laboratorio con l'apparecchio di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico mediante la relazione  $G_0 = \rho V_S^2$ , dove  $\rho$  è la densità del terreno.

Nella Tabella 3 e nella Figura 8 sono riportati i valori del rapporto  $G_{0 \text{ sito}}/G_{0 \text{ laboratorio}}$ .

Come si può vedere, i rapporti sito/laboratorio trovati rientrano generalmente nella fascia dei valori riscontrati in letteratura, indicando una buona corrispondenza fra le due misure e rassicurando sulla qualità dei campioni esaminati e quindi sull'affidabilità delle curve di decadimento determinate sugli stessi.

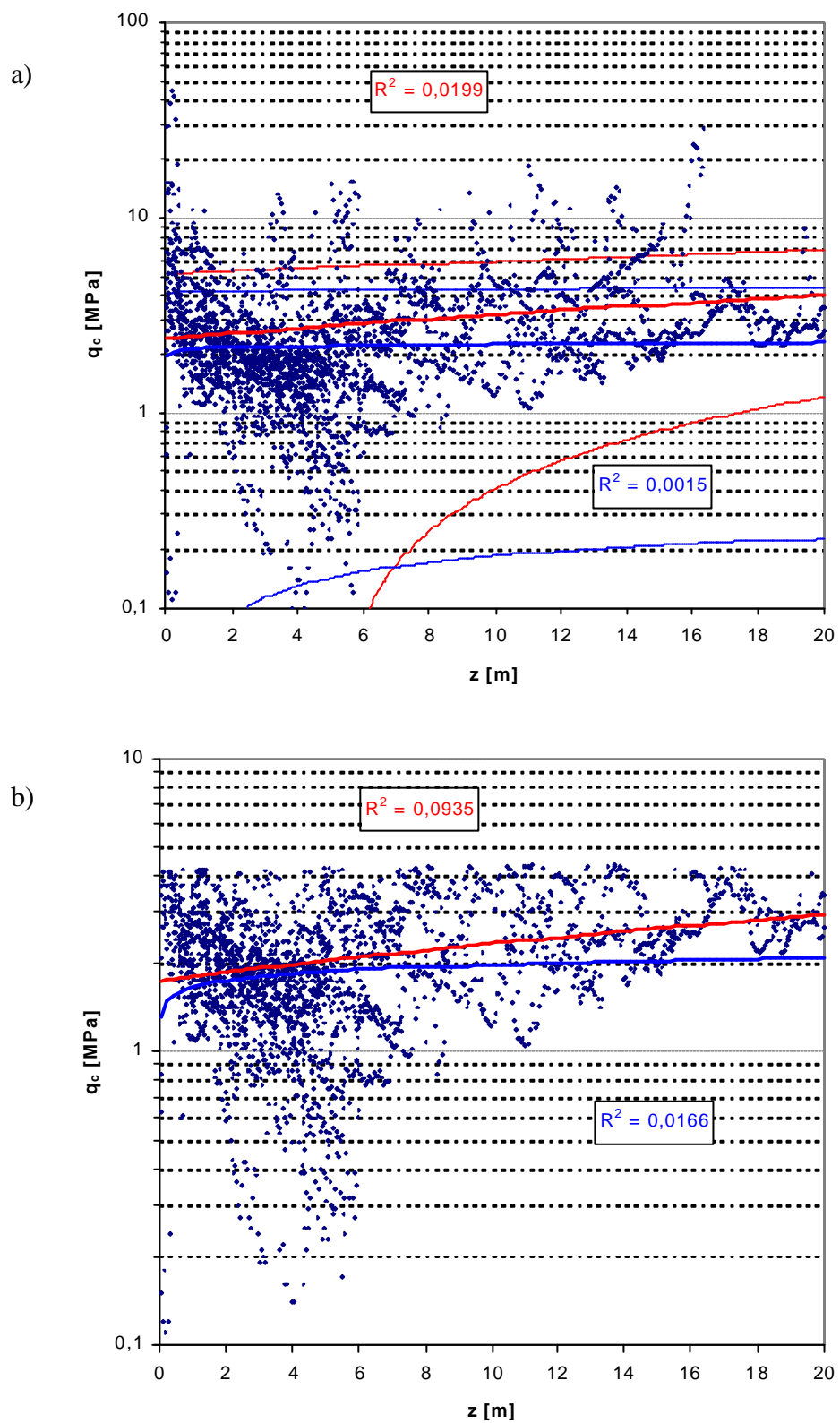


Figura 6: Confronto fra i valori assunti dal coefficiente di determinazione,  $R^2$ , da una regressione lineare e da una regressione di potenza prima (a) e dopo (b) avere elaborato statisticamente le registrazioni.

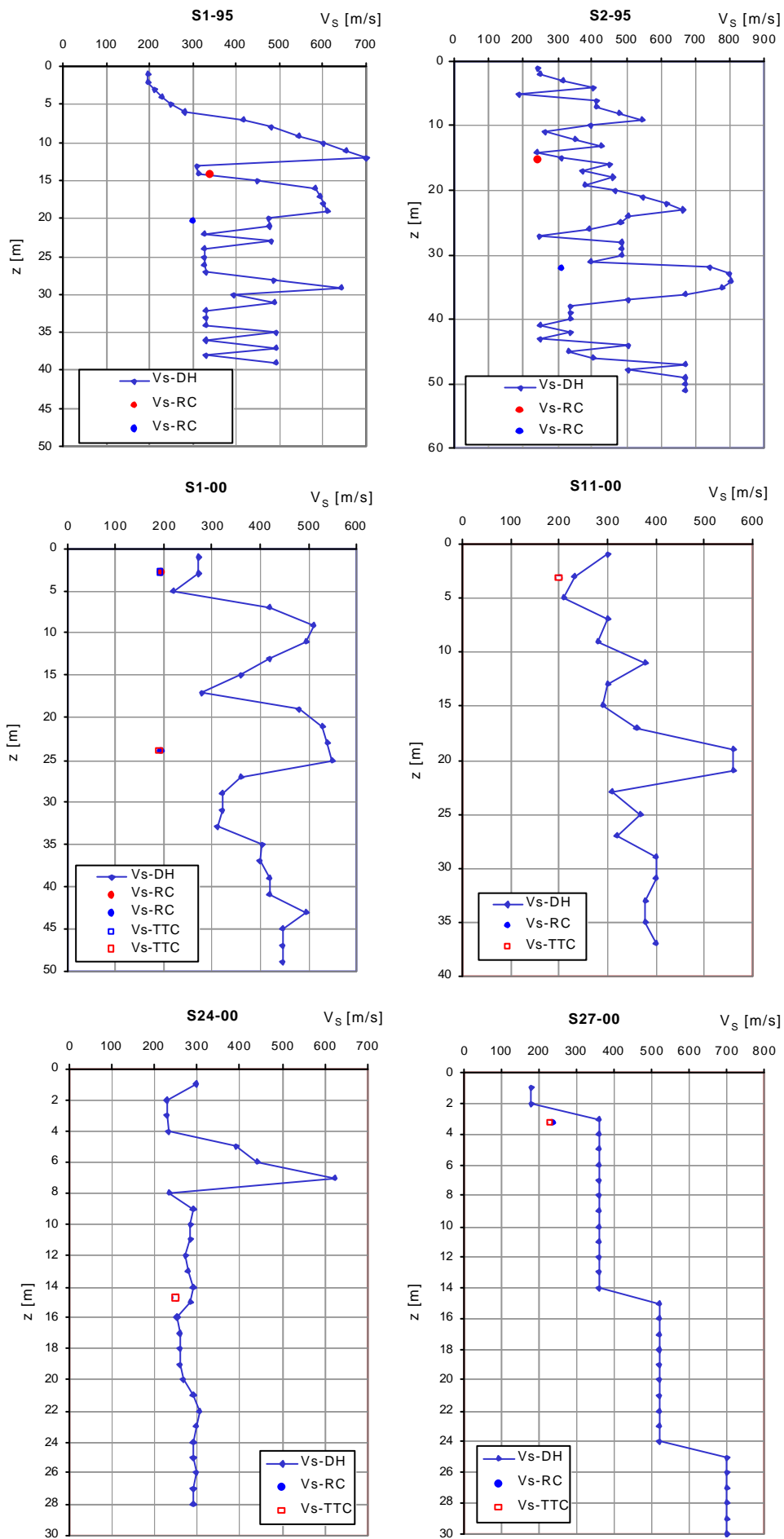


Figura 7: Confronto fra i valori di  $V_s$  misurati in sito mediante prove DH e CH ed i valori di  $V_s$  misurati in laboratorio con prove RC e TTC

Occorre tuttavia sottolineare che, ai fini di una estrapolazione dei risultati all'intera area in studio, i campioni analizzati in laboratorio con le prove dinamiche sono in numero troppo esiguo in rapporto all'area complessiva. Si è perciò pensato ad una integrazione di tali dati considerando i risultati di altre determinazioni effettuate presso il Laboratorio del DIC su altre argille dell'Italia Centrale (Madiari e Simoni, 2001<sup>1</sup>). I risultati sono riportati nelle Figure 9 e 10, dove si può osservare la dipendenza delle leggi di variazione del modulo di taglio normalizzato e del rapporto di smorzamento dall'indice di plasticità,  $I_p$ .

Tabella 3 - Valori di  $G_0$  misurati in sito e in laboratorio

Sondaggio Campione	Profondità m	$G_{0\text{sito}}$ MPa	$G_{0\text{lab}}$ MPa		$G_{0\text{sito}}/G_{0\text{lab}}$	
			RC	TTC	RC	TTC
S1-95-C2	14.3	210.7	249.2	-	0.85	-
S1-95-C3	20.3	497.4	199.7	-	2.49	-
S2-95-C2	15.3	200.7	121.3	-	1.65	-
S2-95-C3	32.1	326.0	205.2	-	1.59	-
S1-00-C1	2.8	150.1	79.8	77.1	1.88	1.95
S1-00-C2	24.1	184.2	72.4	68.7	2.54	2.68
S11-00-C1	3.3	106.8	83.9	80.0	1.27	1.34
S24-00-C3	14.8	169.7	133.8	131.7	1.27	1.29
S27-00-C1	3.3	258.9	112.3	106.2	2.31	2.44

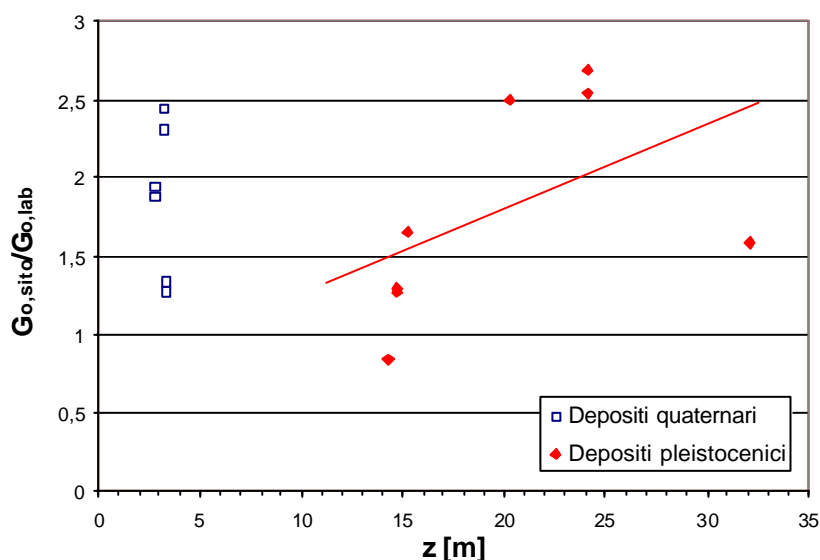


Figura 8: Andamento con la profondità del rapporto fra il modulo di taglio iniziale,  $G_0$ , misurato in sito con quello misurato in laboratorio.

<sup>1</sup> Madiari C., Simoni G. (2001) - *Rigidezza e rapporto di smorzamento di alcuni terreni dell'Alta Val Tiberina e confronto con altre argille dell'Italia centrale* - Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2001 - IARG 2001, Milano, 10-11 Maggio 2001

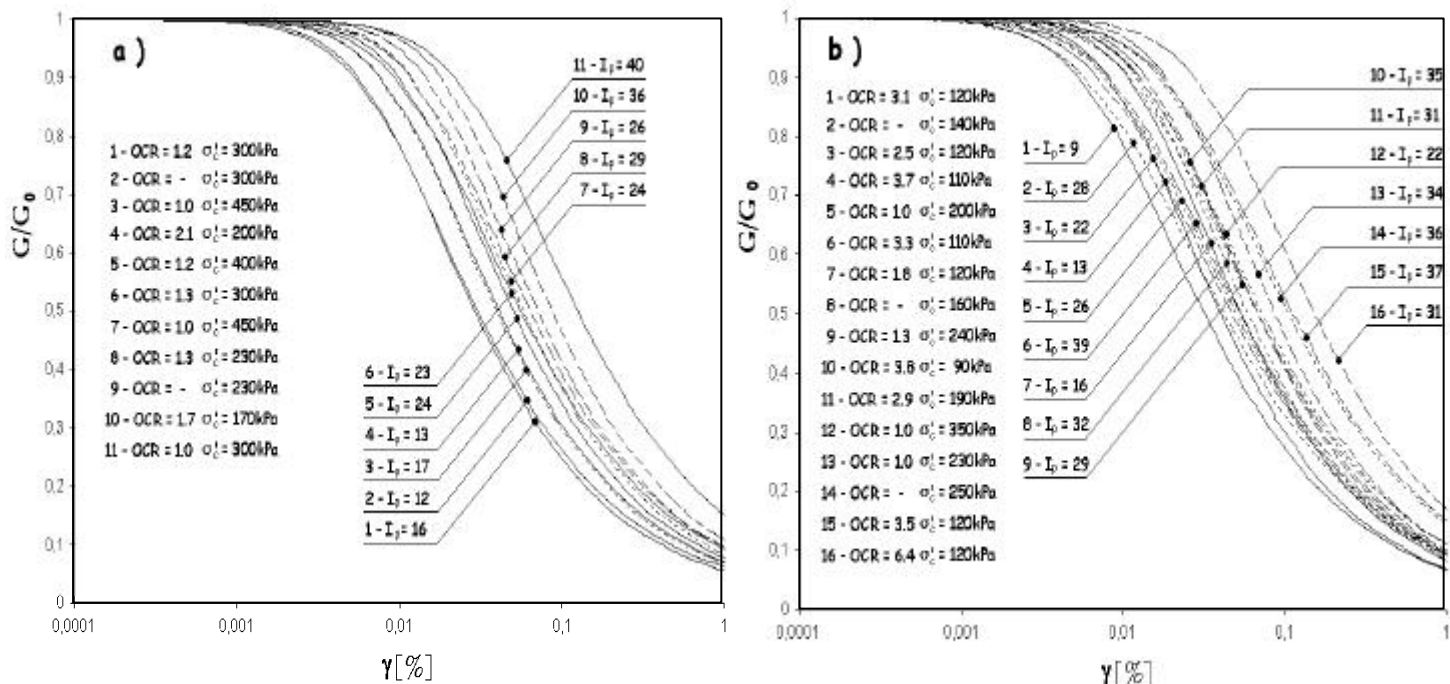


Figura 9: Curve G- $\gamma$  del modello di Ramberg & Osgood (1943) per i materiali di origine pleistocenica (a) e alluvionale (b)

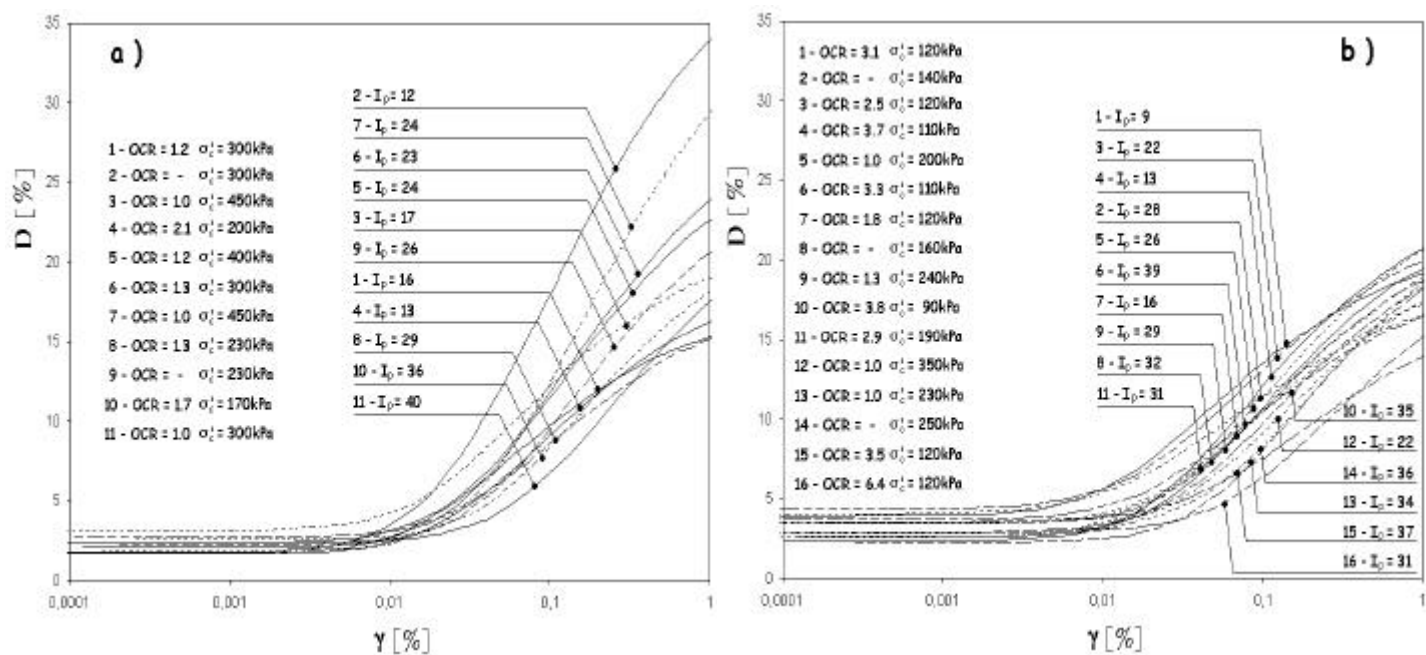


Figura 10: Curve D- $\gamma$  del modello di Yokota et al. (1981) per i materiali di origine pleistocenica (a) e alluvionale (b)

#### 4. CORRELAZIONI TRA PARAMETRI STATICI E DINAMICI

Dati i differenti costi delle misure dirette e indirette dei parametri dinamici ( $V_S$  o  $G_0$ ) e le difficoltà di campionamento nei terreni incoerenti, uno degli obiettivi dello studio condotto era quello di ricercare delle relazioni empiriche di validità regionale per la stima della velocità delle onde S attraverso la misura di parametri geotecnici di tipo corrente.

Come precisato nella Relazione Finale, il quadro dei dati disponibili era piuttosto problematico e sembrava non garantire una piena affidabilità delle correlazioni per l'area in studio. Le elaborazioni effettuate avevano mostrato differenze significative con molte relazioni di letteratura, confermando l'inaffidabilità dei risultati, che pertanto non sono stati inseriti nella relazione finale.

A seguito della richiesta dell'Istruttore Tecnico, sono state fatte alcune nuove elaborazioni, nel tentativo di utilizzare le prove DPSH che, per quanto non standardizzate, offrivano, per la continuità delle misure e la loro somiglianza nei primi 10-12 metri, un numero di dati sufficientemente elevato.

Sono state anche fatte ulteriori calcoli nel tentativo di correlare la resistenza alla punta  $q_c$  con  $V_S$ .

##### a) *Correlazione $N_{SPT}$ e $V_S$*

Come già detto, il parametro  $N_{30}$  della prova DPSH può differire notevolmente da  $N_{SPT}$ . Per ricavare un fattore di conversione valido per il sito, dovrebbero essere eseguite delle misure di comparazione in verticali molto vicine. Nel caso specifico, invece, stante la distanza incerta e talvolta elevata tra le verticali esplorate, l'unica cosa possibile è stata quella di confrontare tra loro tutti i dati disponibili. È da sottolineare che tale confronto, i cui risultati sono riportati nelle Figure 2 e 3, può ritenersi abbastanza significativo dove il materiale è relativamente omogeneo, mentre perde significatività in presenza di depositi fittamente stratificati e composti da materiali grossolani.

Nonostante l'esiguità delle misure di  $N_{SPT}$ , la Figura 2 mostra infatti una qualche corrispondenza tra i due tipi di misure, soprattutto nei primi 6-7 metri. A profondità maggiori, per la presenza di alternanze e materiali grossolani, si hanno scostamenti più elevati tra le due misure.

Nella Figura 3, che riporta i valori corrispondenti di  $N_{30}$  e  $N_{SPT}$  misurati alla stessa quota, si nota, come già visto nel cap. 1, che i valori ottenuti con la prova SPT sono sempre più

elevati di quelli ottenuti con la prova DPSH, e che lo scostamento cresce all'aumentare del numero dei colpi, raggiungendo valori del rapporto  $N_{SPT} / N_{30}$  anche superiori a 4.

Si è tuttavia ritenuto che, almeno in prima approssimazione, le due misure possano ritenersi equivalenti, e sono state effettuate due elaborazioni diverse per ricavare la relazione tra  $N_{SPT}$  e  $V_S$ , seguendo una procedura che può essere sintetizzata nelle seguenti fasi:

1. Sono stati confrontati i singoli profili di  $N_{30}$  con i corrispondenti profili di  $V_S$ . Avendo riscontrato un buon accordo tra l'andamento dei due profili fino alla profondità di circa 12m e una notevole discrepanza per profondità superiori, sono state successivamente prese in esame solo le misure relative ai primi 12m;
2. Con tali dati sono state ricavate separatamente le correlazioni  $V_S$ - $N_{30}$  e  $V_S$ - $N_{SPT}$ , sia nella forma lineare che geometrica; i risultati ottenuti sono mostrati nella Figura 11. Tale grafico indica chiaramente che il coefficiente di correlazione  $R^2$  più alto corrisponde alla correlazione  $N_{SPT}$  e  $V_S$ .
3. Dato quest'esito, sono stati presi tutti i valori di  $N_{SPT}$  disponibili (cioè anche quelli misurati a profondità superiori ai 12 metri) e sono state effettuate due regressioni con modello lineare e geometrico, ottenendo i risultati riportati nella Figura 12. In questo caso la correlazione che presenta il coefficiente  $R^2$  più elevato ( $R^2 = 0.6367$ ) è quella esponenziale e precisamente:  
$$V_S = 112.32 N_{SPT}^{0.329}$$

Poiché le misure di  $N_{SPT}$  ricadono nelle alluvioni tale relazione è da ritenersi valida per tali materiali.

A titolo di confronto con altre relazioni riscontrate da altri ricercatori sui materiali alluvionali nella Tabella 4 sono riportati i coefficienti di alcune correlazioni di letteratura. Nella Figura 13 è visualizzato graficamente tale confronto. Come si vede i valori trovati per l'area in studio sono del tutto confrontabili con quelli ottenuti dai vari altri autori. Pertanto, nonostante l'esiguità del campione analizzato, la correlazione trovata è da ritenersi sufficientemente soddisfacente.

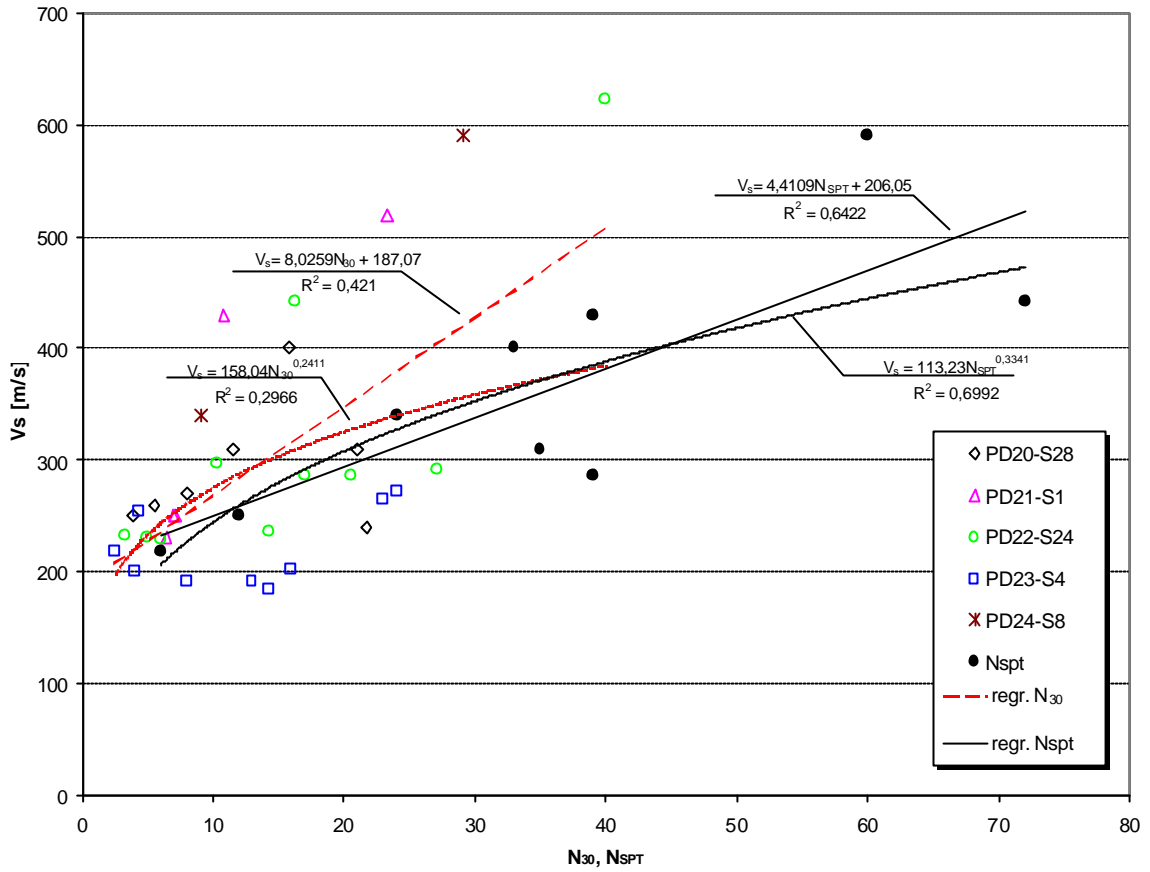


Figura 11 - Regressioni tra la velocità delle onde di taglio e il numero di colpi della prova DPSH ( $N_{30}$ ) e della prova SPT fino alla profondità di circa 12 m

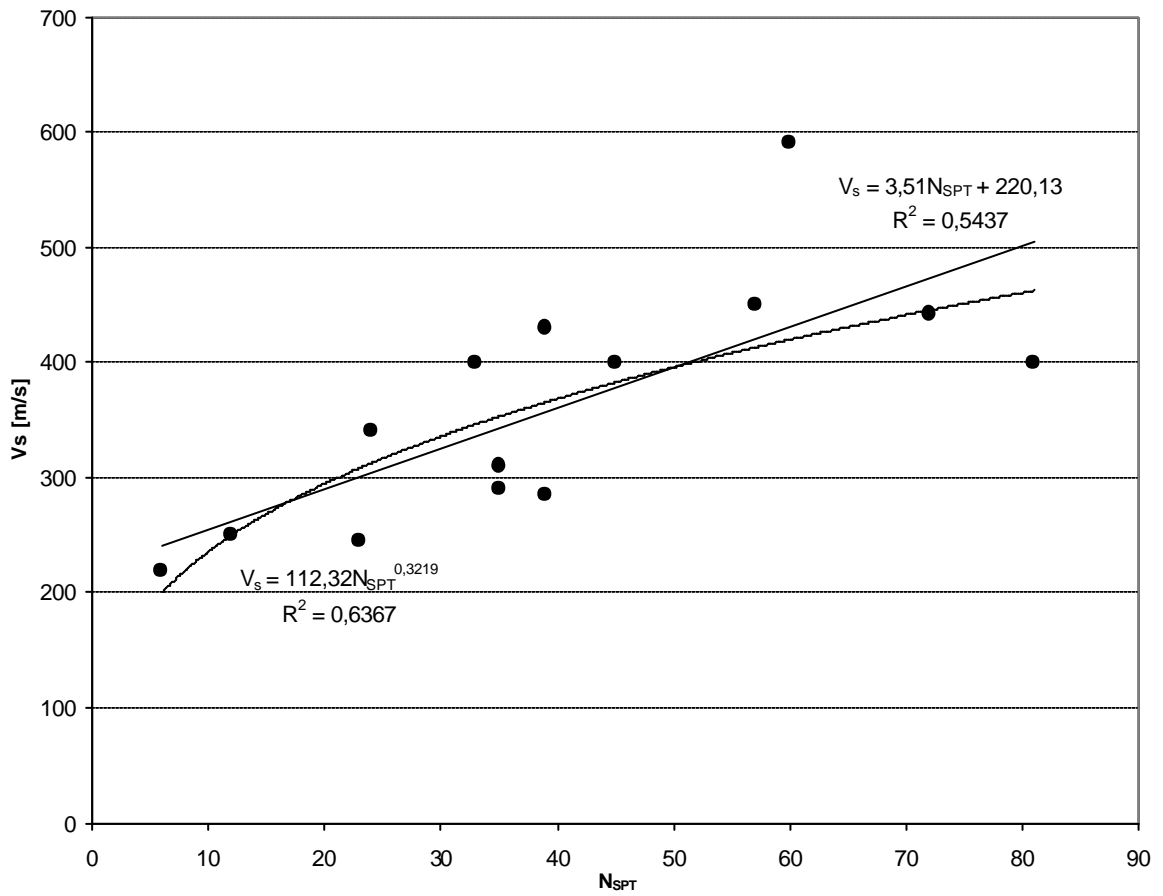


Figura 12 - Regressioni tra la velocità delle onde di taglio e il numero di colpi della prova SPT



Tabella 4 - Valori dei coefficienti  $a$  e  $b$  della relazione  $V_S = aN_{SPT}^b$  per terreni alluvionali

Rel. N.	Autori	Tipo di terreno	a	b	R <sup>2</sup>	Numero di dati
1	Presente studio	H e P (tutti)	112.32	0.329	0.6367	14
2	Ohsaki e Iwasaki (1973)	H e P (tutti)	81.4	0.390	-	220
3	Imai (1975) e Yoshimura (1975)	Tutti	92.0	0.329	-	192
4	Imai (1977)	H (arg)	102	0.29	-	-
5		H (sabbia)	81	0.33	-	151
6		P (arg)	114	0.29	-	-
7		P (sabbia)	97	0.32	-	100
8	Okamoto et al. (1989)	P (sabbia)	125	0.3	-	-
9	Sykora e Stokoe (1983)	Sabbia	100	0.29	-	97
10	Lee (1992)	H (sabbia)	104.7	0.296	0.50	-

H = Olocene

P = Pleistocene

*b) Relazione  $q_c$   $\mathbf{P}$   $V_S$*

Come specificato nella Relazione Finale solo su due CPT era possibile cercare una correlazione con la velocità delle onde S e tuttavia, già dalle prime elaborazioni, i risultati sono apparsi scoraggianti. Successivamente, a seguito della richiesta dell'Istruttore Tecnico, sono stati fatti altri tentativi. Questi sono stati principalmente rivolti ad eliminare le punte anomale della resistenza alla punta. Come noto, il penetrometro elettrico è uno strumento molto sensibile e le punte isolate possono non essere associate a effettivi cambiamenti nei valori di resistenza. Il criterio adottato per l'eliminazione delle punte è stato quello di valutare lungo il profilo delle CPT la media e la deviazione standard e sono stati quindi eliminati i valori superiori alla media più una deviazione standard.

Sono stati quindi effettuati due tipi di regressione: lineare e geometrica. I risultati sono riportati nella Figura 13. Come si può vedere, in entrambi i casi il coefficiente di correlazione è notevolmente basso. Questo risultato conferma quanto già specificato nella Relazione Finale

circa l'impossibilità, allo stato delle conoscenze, di proporre una relazione regionale per la stima di  $V_s$  a partire da  $q_c$ .

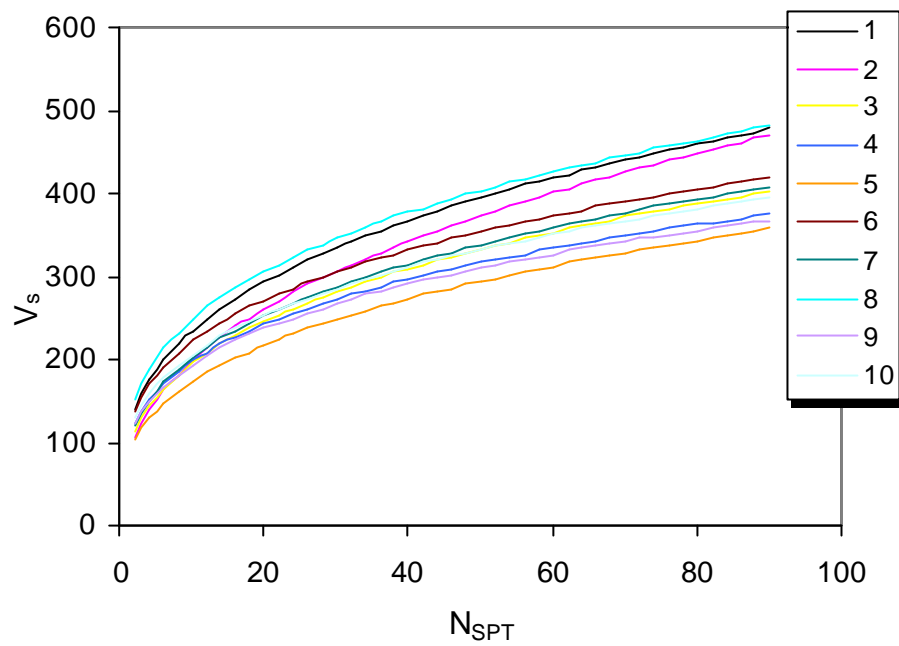


Figura 13 - Correlazione  $V_s$ - $N_{SPT}$  per i materiali alluvionali dell'area in esame e confronto con altre relazioni di letteratura

## 6. CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ LITOTECNICHE E SINTESI DEI RISULTATI

Essendo lo studio complessivo sulla zonazione della Val Tiberina finalizzato alla individuazione delle zone suscettibili di effetti di amplificazione, la caratterizzazione geotecnica è stata effettuata principalmente da tale prospettiva, ed è stata indirizzata, in particolare, alla stima dei parametri dinamici iniziali ( $G_0$  e  $D_0$ ), delle leggi di decadimento  $G(\gamma)$  e  $D(\gamma)$ , e allo studio della variabilità spaziale della velocità delle onde  $S$ .

Dal complesso dei dati disponibili possono trarsi, tuttavia, seppure con le necessarie cautele, anche alcune considerazioni di carattere generale sugli altri problemi di interesse dell'Amministrazione Regionale, e cioè riguardo alla presenza di aree con terreni scadenti e di zone in cui possano, in condizioni sismiche, verificarsi fenomeni di liquefazione o elevati cedimenti per densificazione.

Con riferimento a questi tre problemi, si possono, da una prospettiva esclusivamente geotecnica, e ovviamente da verificare con i risultati delle modellazioni, svolgere le seguenti considerazioni.

- 1) *Terreni dove sono possibili effetti di amplificazione* - Dal punto di vista delle caratteristiche dei materiali, le alluvioni recenti e terrazze appaiono le unità litotecniche più esposte al rischio di fenomeni di amplificazione delle onde sismiche. Dal complesso dei dati disponibili, riassunti nella Tabella 5, risulta infatti, che in generale nei primi 20 m si hanno valori mediamente intorno a 250 m/s.

Tabella 5 - Valori di  $V_s$  nelle diverse unità litotecniche in funzione della profondità

Unità litotecnica	Profondità	$V_s$ (m/s)
Alluvioni recenti	Fino a 5 m	200
	Da 5 a 20 m	250
	Oltre 20 m	400
Alluvioni terrazze	Fino a 5 m	220
	Da 5 a 20 m	250
	Oltre 20 m	400-500
Argille di Fighille	Fino a 10 m	250
	Oltre 10 m	370

Anche le argille del Subsistema di Fighille possono presentare valori piuttosto bassi (intorno a 250 m/s) di  $V_s$  ma solo nei primi 10 metri. Poiché lo spessore degli strati con valori bassi della velocità delle onde di taglio è un parametro molto influente

sull'amplificazione, le argille di Fighille appaiono meno esposte rispetto alle alluvioni, che, dall'esame delle stratigrafie, risulta possano raggiungere spessori anche superiori a 80m.

Per quanto riguarda le aree a minore resistenza, pur essendo difficile esprimere delle considerazioni generali a partire da singole verticali, si può osservare che i valori più bassi della resistenza alla punta nella prova CPT e del numero dei colpi  $N_{30}$  da prove DPSH, sono stati riscontrati nell'area di Città di Castello. Valori bassi di  $N_{30}$  sono stati trovati anche a Pistrino Citerna e a S. Giustino.

- 2) *Terreni in cui possono aversi fenomeni di liquefazione* - La liquefazione è un fenomeno molto complesso e che richiede analisi geotecniche specifiche per l'individuazione dei fattori scatenanti (caratteristiche del terremoto atteso) e predisponenti (susceptibilità dei terreni in base al livello di falda, alla composizione granulometrica, allo stato fisico, ecc.).

Prescindendo dai fattori predisponenti, nelle verticali esplorate con le prove CPT e DPSH nei materiali alluvionali, la presenza predominante di materiali limosi e talora argillosi, la presenza di livelli di falda a profondità superiori ai 5 m e in molti casi la presenza di valori di  $N_{30}$  abbastanza elevati per la presenza di ghiaie, dovrebbero indicare in generale una scarsa susceptibilità delle alluvioni recenti al fenomeno. Tale fenomeno potrebbe però invece essere preso in considerazione nelle aree in prossimità del Tevere laddove prevalgono le sabbie fini e dove la falda è molto superficiale. Alcuni documenti storici relativi al terremoto del 1789 (IX grado MCS) danno infatti notizia di fenomeni avvenuti nell'area di Città di Castello che potrebbero essere ricondotti alla liquefazione o alla risalita improvvisa del livello di falda (Crespellani, 1988<sup>2</sup>, Galli e Meloni,<sup>3</sup>).

- 2) *Terreni in cui possono aversi cedimenti per densificazione* - La possibilità di densificazione del terreno, durante terremoti forti, appare, dal quadro generale dei dati relativi alle alluvioni, nel complesso abbastanza probabile, soprattutto laddove prevalgono le sabbie e i limi sabbiosi. Come si è visto, tali materiali presentano valori della resistenza alla punta compresi tra 2 e 4 MPa, e come indica la Tabella 2, si trovano allo stato sciolto o poco compatto. Tuttavia, l'identificazione delle zone esposte a rischio di densificazione, richiedendo calcoli e analisi geotecniche a tal fine mirate, non appare possibile nell'ambito della presente convenzione .

---

<sup>2</sup> Crespellani T. (1988) - *Indagini sulla pericolosità sismica locale di Citta' di Castello*. Atti Dip. Ing. Civ., Univ. Firenze, Sez. Geot., n. 7/88.

<sup>3</sup> Galli P., Meloni F. (1993) - *Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia*. Il Quaternario, 6 (2), 271-292

Per quanto riguarda infine il lavoro svolto, sia il programma delle indagini (geotecniche, geofisiche e strumentali) sia la metodologia di lavoro collettivo adottata appaiono, da una prospettiva geotecnica, molto validi e positivi, non solo per lo stretto legame che si è riusciti a creare fra obiettivi e indagini e per la collaborazione realizzatasi all'interno del gruppo di lavoro, ma anche per il vasto patrimonio di conoscenze geotecniche relative al territorio che la campagna effettuata è riuscita ad accumulare e che può rappresentare una base importante di dati utile anche per il raggiungimento di altri obiettivi nella protezione del territorio.

Poiché ogni metodologia di lavoro può essere perfezionata, tra i suggerimenti che ci appaiono a tal fine utili, i più importanti sono i seguenti, e riguardano l'opportunità di:

- a) localizzare sempre in maniera esatta le verticali esplorate, in modo da potere, a partire da una base di coordinate geografiche digitalizzate, cartografare i parametri che di volta in volta risultano di interesse e valutarne la variabilità spaziale;
- b) situare a distanza molto ravvicinata (dell'ordine massimo di 2-3 m) i fori al cui interno devono essere effettuate misure da correlare tra loro (per es. misure di velocità e di resistenza alla punta ) in modo che le caratteristiche del terreno alle diverse quote siano esattamente le stesse nei due fori.

Il Responsabile della Convenzione