

PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento di Protezione Civile

IL VICE SEGRETARIO GENERALE
Dott.ssa *Pierina Martingelli*
Commissario Delegato

Il Segretario Generale
Dr. Franco Nardone

O.c.d.p.c. n. 298 del 17.11.2015 e n. 303 del 03.12.2015

*Interventi urgenti di cui all'articolo 1, comma 3 lett.c)
dell'OCDPC n. 298/2015 finanziati ai sensi degli artt. 3 del
ODCPC 298/2015 e 303/2015*

**RIPRISTINO TOTALE FUNZIONALITA' DEL PONTE SUL FIUME UFITA
IN LOCALITA' APICE SCALO CON RELATIVA DIFESA IDRAULICA**



Soggetto Attuatore del Commissario
Delegato
PROVINCIA di BENEVENTO

Codice intervento:

00/U/107

PROGETTO DEFINITIVO

Art. 24 D.P.R. 5.10.2010 n. 207

**Titolo Elaborato:
RELAZIONE GEOTECNICA**

Progetto strutture

innovazione tecnologica
materiali e strutture



Responsabili scientifici

Idraulica: Nicola Fontana
Strutture: Maria Rosaria Pecce
Geotecnica: Stefania Sica

Stefania Sica
Supporto Tecnico-Scientifico



Università
degli Studi
del Sannio

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

Gruppo di Progettazione

Arch. Raffaele Rabuano

Arch. Carminantonio De Santis

Responsabile Unico del Procedimento

Ing. Gennaro Fusco

Approvato con Deliberazione n. 94 del 14-6-2016
Adottata dal Presidente della Provincia di Benevento

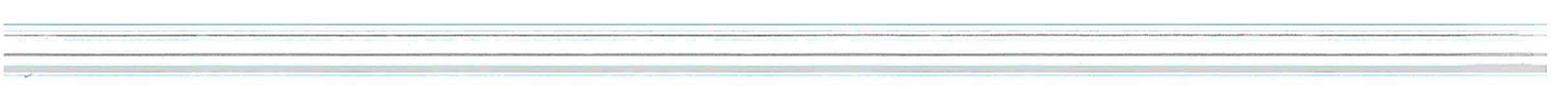
Codice elaborato:
8- R
Scala:
-

Studio geologico

Dott. Geol. Claudio SACCO

Il Segretario Generale
Dr. Franco Nardone

Relazione Geotecnica



INDICE

1. PREMESSA.....	3
2. PRESCRIZIONI NORMATIVE	3
3. INDAGINI GEOGNOSTICHE ESEGUITE	4
4. MODELLO STRATIGRAFICO.....	5
5. PROVE SPT IN FORO.....	15
6. PROVE DI LABORATORIO	16
7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO	17
8. STABILITA' DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	19
9. TIPOLOGIE FONDALI	22
10. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO.....	22

DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Relazione Geologica datata Luglio 2002 e a firma del dott. Geol. N. Colangelo, relativa al progetto dei "Lavori di Ristrutturazione del Ponte sul Fiume Ufita";
 - Relazione sulle indagini geognostiche eseguite nel mese di Novembre 2014 dall'impresa Geo-In S.r.l. per conto dell'Amm.ne Provinciale di Benevento;
 - Relazione sulle due prospezioni sismiche superficiali (MASW) eseguite nel mese di Novembre 2014 per conto dell'Amm.ne Provinciale di Benevento;
 - Relazione sulle indagini geognostiche eseguite nel mese di Febbraio 2015 dall'impresa Tecno In S.p.A. nell'ambito del progetto STRIT;
 - Relazione sulla indagine dinamica in sito di tipo Down-Hole eseguita nel mese di Aprile 2015 dall'impresa Tecno In S.p.A nell'ambito del progetto STRIT.
-
-
-

1. PREMESSA

La presente Relazione Geotecnica è parte integrante del progetto definitivo dei “Lavori di Ripristino Totale della Funzionalità del ponte sul Fiume Ufita sito in località Apice Scalo”, lungo la strada provinciale Apice-Apice Scalo.

Lo studio geotecnico è stato condotto al fine di definire un modello geotecnico di sottosuolo lungo l'asse longitudinale del ponte, evidenziando discontinuità e irregolarità stratigrafiche e morfologiche che possono influire sul comportamento del ponte o di suoi componenti. Lo studio è stato condotto mediante l'interpretazione e l'analisi delle risultanze delle indagini geognostiche eseguite in tre diverse campagne di indagini. Ciò ha consentito la definizione delle principali caratteristiche geotecniche dei terreni interagenti con le pile e le spalle del ponte nonché con le opere di sostegno della sponda in sinistra idraulica, a protezione della strada SP34.

2. PRESCRIZIONI NORMATIVE

Nel presente studio si è fatto riferimento alle prescrizioni contenute nelle vigenti norme tecniche:

- **D. M. Infrastrutture Trasporti 14 gennaio 2008 (G.U. 4 febbraio 2008 n. 29 - Suppl. Ord.)** “Norme tecniche per le Costruzioni”.
- **Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (G.U. 26 febbraio 2009 n. 27 – Suppl. Ord.)** “Istruzioni per l'applicazione delle 'Norme Tecniche delle Costruzioni' di cui al D.M. 14 gennaio 2008”.

I suddetti documenti normativi sono stati integrati mediante le indicazioni degli Eurocodici:

- **Eurocodice 8 (1998)** “Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture” Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003).
 - **Eurocodice 7.1 (1997)** “Progettazione geotecnica – Parte I: Regole Generali”.
 - **Eurocodice 7.2 (2002)** “Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002)”.
 - **Eurocodice 7.3 (2002)** “Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita con prove in sito(2002)”.
-
-
-

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE ESEGUITE

La ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, la caratterizzazione geotecnica e sismica dei terreni interagenti con l'opera in progetto, ossia, la definizione del modello geotecnico di sottosuolo, sono state realizzate con riferimento a tre campagne di indagine eseguite in periodi differenti.

- La prima campagna geognostica, eseguita nel mese di Gennaio 2000 per conto dell'Amm.ne Provinciale di Benevento, è descritta nella Relazione Geologica, a firma del dott. Geol. Nicola Colangelo, annessa al progetto dei "Lavori di Ristrutturazione per il Ponte sul Fiume Ufita" in data Luglio 2002; in tale fase furono eseguiti:
 - N° 3 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, spinti fino alla profondità massima di 22 metri rispetto all'estradosso della soletta del ponte originario;
 - N° 7 prove penetrometriche dinamiche (SPT) eseguite a differenti profondità.
- La seconda campagna di indagine fu realizzata nel mese di Novembre 2014 per la redazione dello Studio Geologico Tecnico Preliminare per conto dell'Amm.ne Provinciale di Benevento. Le indagini, eseguite dall'impresa Geo-In Srl, con sede in Benevento (Concessione Ministeriale N. 5024 del 25 Maggio 2011), consistono in:
 - N° 2 sondaggi meccanici, del tipo a carotaggio continuo, di cui il primo (S1) spinto fino ad una profondità di 25 metri e il secondo (S2) fino a 10 metri;
 - N° 1 prova penetrometrica dinamica (SPT) in foro (eseguita nella verticale di sondaggio S1);
 - N° 2 prospezioni sismiche superficiali (MASW).
- La terza e ultima campagna di indagine è stata svolta nel mese di Febbraio 2015 dall'impresa Tecno In S.p.A, con sede in Napoli (Concessione Ministeriale N. 53363 del 06 Maggio 2005), nell'ambito del progetto di ricerca STRIT. Sono stati eseguiti:
 - N°1 sondaggio meccanico a carotaggio continuo, spinto fino a 36 metri di profondità;
 - N° 6 prove penetrometriche dinamiche (SPT) in foro;
 - analisi e prove di laboratorio su 3 campioni prelevati tra le profondità di 17.9 metri e 25.5 metri (N° 1 campione S1/C1 nello strato di argilla, N° 2 campioni S1/C2 e S1/C3 nello strato di marna);
 - N° 1 indagine dinamica in foro (Down-Hole).

4. MODELLO STRATIGRAFICO

L'inquadramento geologico generale e l'esame delle carote estratte dai diversi sondaggi meccanici ha consentito di definire la successione litostratigrafica dell'area, da cui si è dedotto il modello geotecnico di sottosuolo lungo l'asse longitudinale del ponte. I vari strati individuati sono riportati in tabella 1.

Sondaggio	Lunghezza (m)	Strato	Profondità (m)	Spessore (m)
S1 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	22.00	Riporto	-0.50/-7.00	6.50
		Sabbia	-7.00/-8.00	1.00
		Liv. Alluvionale	-8.00/-11.00	3.00
		Sabbia	-11.00/-16.00	5.00
		Argilla	-16.00/-22.00	6.00
S2 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	22.00	Riporto	-0.50/-7.50	7.00
		Argilla	-7.50/-8.50	1.00
		Sabbia	-8.50/-10.00	1.50
		Argilla	-10.00/-12.00	2.00
		Sabbia	-12.00/-14.00	2.00
		Liv. Alluvionale	-14.00/-16.00	2.00
		Argilla	-16.00/-22.00	6.00
S3 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	20.00	Argilla	-11.00/-11.70	0.70
		Sabbia	-11.70/-12.70	1.00
		Limo	-12.70/-14.00	1.30
		Argilla	-14.00/-20.00	6.00
S1 (Nov. 2014 Geo In Srl)	25.00	Liv. Alluvionale	0.00/-3.70	3.70
		Argilla	-3.70/-25.00	21.30
S2 (Nov. 2014 Geo In Srl)	10.00	Liv. Alluvionale	0.00/-0.70	0.70
		Sabbia	-0.70/-6.80	6.10
		Argilla	-6.80/-10.00	3.20
S1 (Feb. 2015 Tecno In	36.00	Riporto	0.00/-4.10	4.10
		Sabbia	-4.10/-13.40	9.30

SpA)	Argilla	-13.40/-18.30	4.90
	Marna	-18.30/-36.00	17.70

Tabella 1- Successioni litostratigrafiche ottenute dai vari sondaggi eseguiti in prossimità del ponte

Per la caratterizzazione di dettaglio del sottosuolo in corrispondenza della sezione di attraversamento del fiume Ufita e per la definizione del modello geotecnico di sottosuolo lungo l'asse longitudinale del ponte, si sono considerati tutti i sondaggi posti nelle vicinanze dell'opera così come riportato nello stralcio planimetrico di figura 1, in cui sono state indicate le verticali indagate nelle differenti campagne geognostiche.

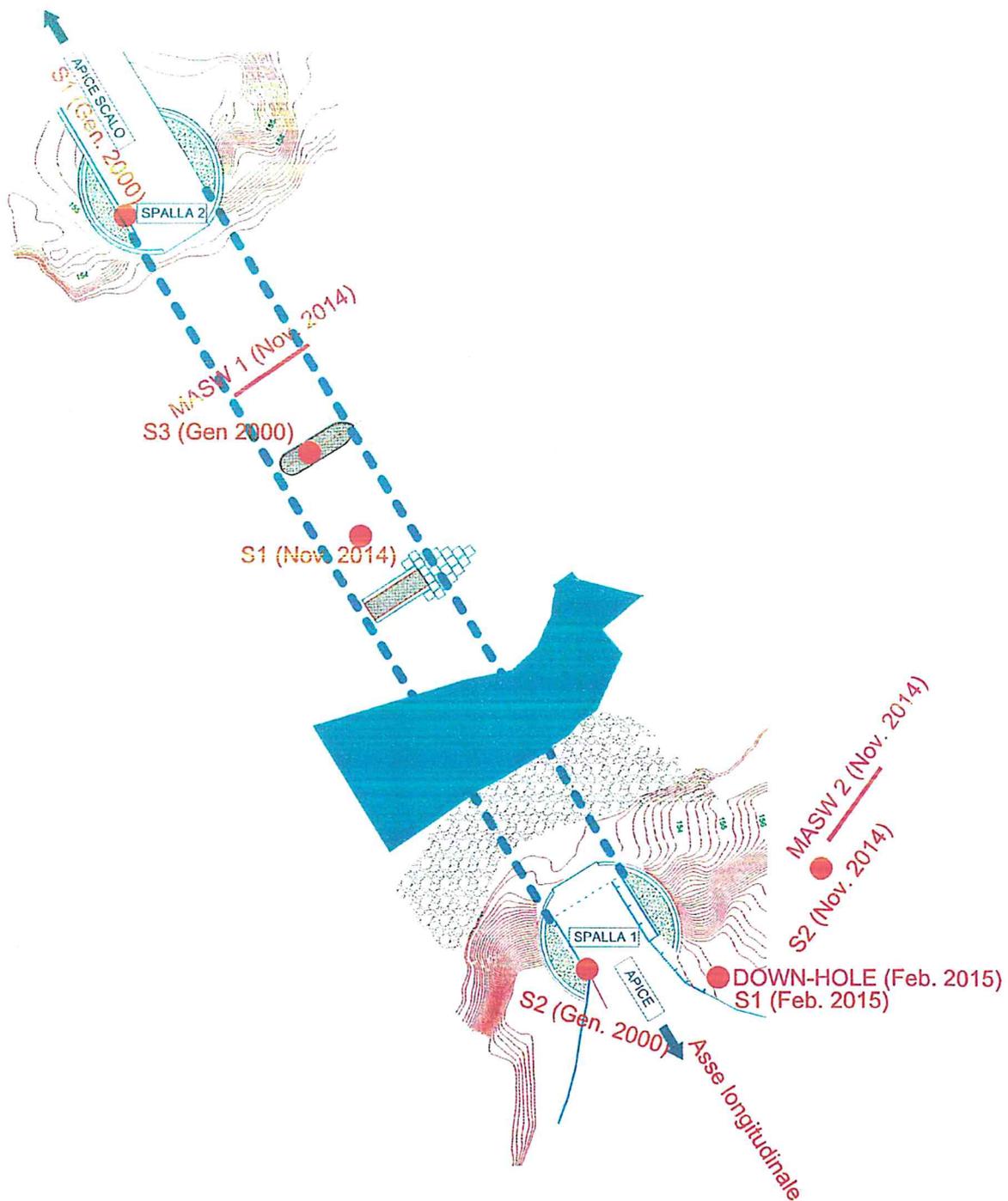
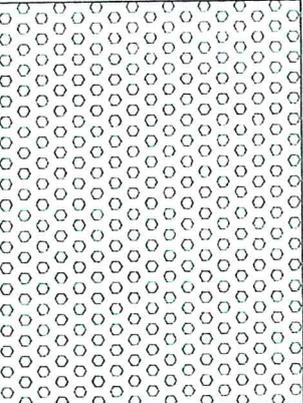
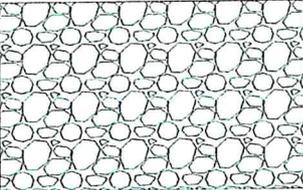


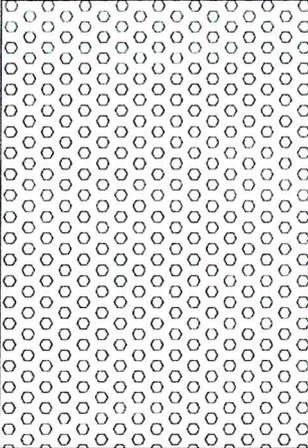
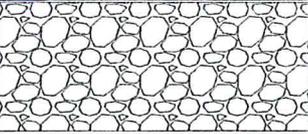
Figura 1– Stralcio planimetrico della sezione di attraversamento con ubicazione delle diverse verticali di indagine e periodo di esecuzione

La litostratigrafia abbinata a ciascun sondaggio è riepilogata nelle figure successive:

Sondaggio S1 (Gen. 2000 allegato in relazione Geologica del 2002)

Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica	S.P.T.
6.50	0.50		Ripporto alluvionale: Ripporto alluvionale sciolto a matrice sabbiosa di dimensioni varie con trovanti lapidei.	
	7.00			
	8.00		Sabbia: Livello sabbioso con ciottoli.	
1.00	8.00		Livello alluvionale: Livello alluvionale a matrice arenacea.	
3.00	11.00			
5.00	12.00		Sabbia: Sabbie arenacee a matrice limosa-sabbiosa con ciottoli fluviali di dimensioni varie.	12.00
	S.P.T.			N1-N2-N3=40-R-R
	15.00		Arenarie: Arenarie grigie.	12.45
6.00	16.00		Argilla: Argille grigio-azzurre a scheletro sabbioso.	
	18.50			18.50
	S.P.T.			N1-N2-N3=6-15-46
	20.00			18.95
	22.00			

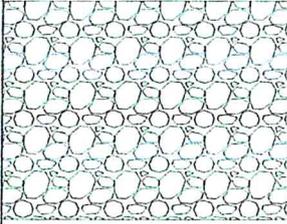
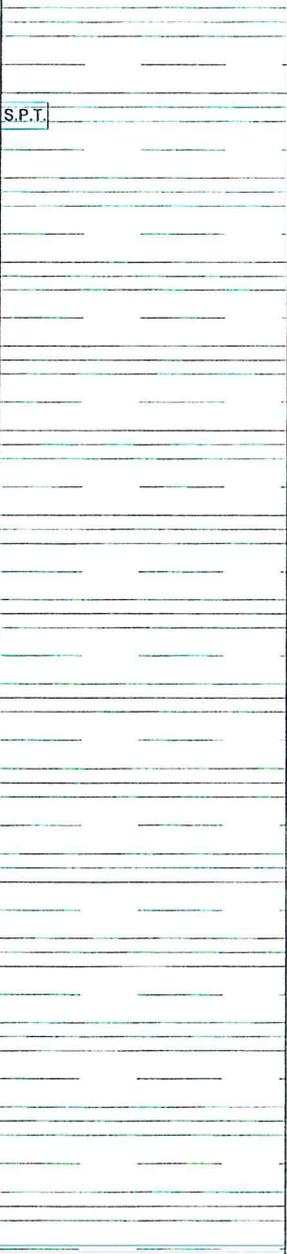
Sondaggio S2 (Gen. 2000 allegato in relazione Geologica del 2002)

Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica	S.P.T.
7.00	0.50		Ripporto alluvionale: Ripporto alluvionale scioltodi dimensioni variabili con trovanti lapidei.	
	7.50			
1.00	8.50		Arenarie: Livello arenaceo-sabbioso di colore avana.	
1.50	9.00		Argilla: Argille grigio-azzurre.	9.00
	10.00	S.P.T.		N1-N2-N3=3-2-1
2.00	10.00		Arenarie: Arenarie sabbiose argillose limose cementate di colore avana.	9.45
	12.00			
2.00	12.00		Argilla: Argille grigio-azzurre siltose a scheletro sabbioso.	
	13.50			13.50
2.00	14.00	S.P.T.		N1-N2-N3=3-2-2
	14.00		Livello alluvionale: Livello alluvionale con ciottoli di dimensioni variabili a matrice arenacea-limosa-sabbiosa.	13.95
6.00	16.00		Argilla: Argille siltose grigio-azzurre e arenarie sabbiose; lo scheletro arenaceo è predominante.	
	17.50	S.P.T.		17.50
	17.50			N1-N2-N3=7-19-47
	17.50			17.95
	22.00			

Sondaggio S3 (Gen. 2000 allegato in relazione Geologica del 2002)

Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica	S.P.T.
		(Area hatched)	Parte del Sondaggio relativo alla Soletta del ponte e al Corpo del Pilone in destra idraulica	
	11.00		piano fondazione pilastro	
0.70	11.50		Argille: Argille limose sabbiose.	11.50
	11.70	S.P.T.		N1-N2-N3=2-3-4
1.00	12.70		Arenarie: Arenarie grigie cementate.	11.95
1.30	14.00	(Area hatched)	Siltite: Siltite sabbiosa argillosa grigio azzurra.	
	15.00		Argille: Argille sabbiose.	
	17.00		Argille: Argille siltose ed arenarie grigio azzurre; con la profondità la percentuale di arenarie aumenta.	17.00
5.00	17.00	S.P.T.		N1-N2-N3=56-R-R
	20.00			17.45

Sondaggio S1 (Nov. 2014 Geo In Srl)

Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica	S.P.T.
3.70	3.70		<p>Misto Fiume: Ciottolame arrotondato di varia natura , eterometrico, frammisto a sabbia, limo e ghiaietto.</p>	
	5.50		<p>Argilla: Argille siltose e marnose, di colorazione grigio plumbeo, con frammisto pezzame litico e sabbia limosa anche essa grigiastra; la consistenza è compatta.</p>	<p>5.50 N1-N2-N3=17-50-R 5.95</p>
21.30				
	25.00			

Sondaggio S2 (Nov. 2014 Geo In Srl)

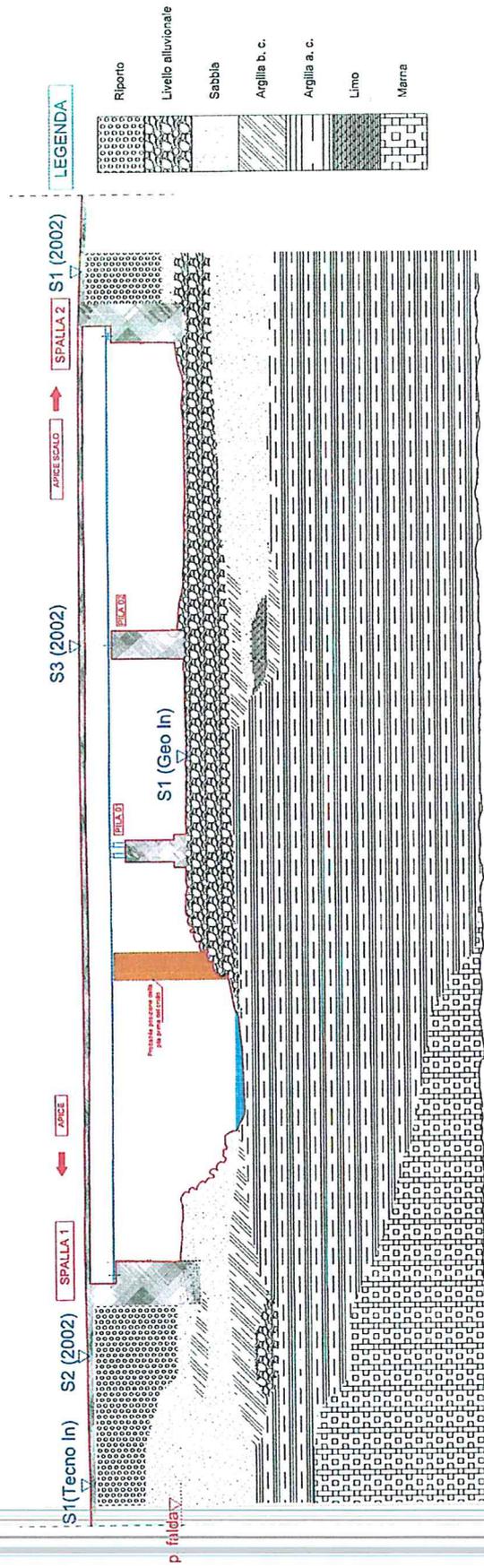
Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica
0.70	0.70		Misto Fiume: Ciottolame arrotondato di varia natura , eterometrico, frammisto a sabbia, limo e ghiaietto.
6.10			Sabbia: Sabbia grossolana, di colorazione ocra, con inclusioni limose e ciottolose il suo grado di addensamento è medio basso.
3.20	6.80		Argilla: Argille siltose e marnose, di colorazione grigio plumbeo, con frammisto pezzame litico e sabbia limosa anche essa grigiastrea.
	10.00		

Sondaggio S1 (Feb. 2015 Tecno In Spa)

Spessore Strato (m)	Profondità relativa al p.c. (m)	Litologia	Descrizione Litologica	S.P.T.	Prelievo Campione	
4.10	2.00		Terreno di riporto: Terreno di riporto, costituito da clasti eterometrici poligenici in matrice sabbiosa limosa beige, a tratti scarsa. Tra 2.10/3.50 metri sono intercalati orizzonti sabbiosi privi di inclusioni.	2.00		
	S.P.T.			N1-N2-N3=15-10-8		
				2.45		
	4.00			4.00		
	4.10			S.P.T.	N1-N2-N3=13-10-7	
				4.45		
	6.00			S.P.T.	6.00	
				6.45	N1-N2-N3=14-30-R	
	7.00					
	9.30			9.00	S.P.T.	9.00
	9.45	N1-N2-N3=10-9-11				
	11.30	S.P.T.	11.30			
	11.75	N1-N2-N3=13-25-43				
4.90	13.40		Argilla: Argilla debolmente marnosa, debolmente sabbiosa, di colore grigio-azzurrognola. Si presenta compatta e con inclusi clasti alterati, in disfacimento, di dimensioni al massimo centimetriche.	15.50		
	S.P.T.			N1-N2-N3=16-27-43		
				15.95		
	17.00			S1/C1	17.00	S1/C1
17.70	18.30		Marna: Marna debolmente argillosa, siltosa, di colore grigio-azzurrognola. Nei pochi punti in cui si presenta discontinua, le fratture si presentano con un angolo di circa 30 gradi (dal piano orizzontale). Sono inclusi rari clasti. Sono presenti trovanti calcarenitici fra 26.30/26.40 e 26.00/30.00 metri. Sono intercalati livelli sabbiosi di spessore massimo 10-20 cm fra 26.40/26.60 e 26.00/30.00 metri.	18.30	18.30	
	S1/C2			19.40	S1/C2	
				19.60		
	25.00			S1/C3	25.00	S1/C3
	25.50		25.50			
36.00						

p. falda

Figura 2 - Modello Geotecnico di Sottosuolo in corrispondenza della sezione di attraversamento (Asse longitudinale del ponte)



LEGENDA

- Riporto
- Livello alluvionale
- Sabbia
- Argilla b. c.
- Argilla a. c.
- Limo
- Marna

In sintesi, il sottosuolo è costituito da un substrato argilloso marnoso su cui poggia uno strato di materiale alluvionale a granulometria variabile da grossolana a fine. Nei pressi della spalla in sinistra idraulica e al di sotto della pila 2, si rinvengono lenti di argilla a bassa consistenza, inglobate nello strato di sabbia.

In prossimità della spalla sinistra del ponte, la falda è stata rinvenuta alla profondità di 7 metri rispetto al piano campagna di riferimento per il sondaggio S1 (Tecno In, 2015).

La caratterizzazione fisica e meccanica dei materiali di sedime è stata effettuata sulla base delle interpretazioni delle prove in sito e di laboratorio di seguito illustrate.

5. PROVE SPT IN FORO

Durante le perforazioni di sondaggio sono state eseguite complessivamente 14 prove S.P.T. (*Standard Penetration Test*) che hanno fornito i risultati riportati in tabella 2.

Sondaggio	N° prova	Profondità (m)	Strato	N _{colpi}	N _{spt}
S1 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	1	-12.00/-12.45	Sabbia	40-R-R	R
	2	-18.50/-18.95	Argilla (a. c.)*	6-15-46	61
S2 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	1	-9.00/-9.45	Argilla (b. c.)*	3-2-1	3
	2	-13.5/-13.95	Argilla (b. c.)	3-2-2	4
	3	-17.5/-17.95	Argilla (a. c.)	7-19-47	66
S3 (Gen. 2000 allegato in Relazione Geologica del 2002)	1	-11.50/-11.95	Argilla (b. c.)/Sabbia	2-3-4	7
	2	-17.00/-17.45	Argilla (a. c.)	56-R-R	R
S1 (Nov. 2014 Geo In Srl)	1	-5.50/-5.95	Argilla (a. c.)	17-50-R	R
S1 (Feb. 2015 Tecno In Spa)	1	-2.00/-2.45	Riporto	15-10-8	18
	2	-4.00/-4.45	Sabbia	13-10-7	17
	3	-6.00/-6.45	Sabbia	14-30-R	R
	4	-9.00/-9.45	Sabbia	10-9-11	20
	5	-11.3/-11.75	Sabbia	13-25-43	68
	6	-15.50/-15.95	Argilla (a. c.)	16-27-43	70

Tabella 2- Prove SPT realizzate nelle diverse campagne di indagine.

*Argilla (b.c.) = argilla a bassa consistenza; Argilla (a.c.) = argilla ad alta consistenza

Dai risultati delle prove SPT, interpretati attraverso il numero di colpi N_{SPT} , si evince che al di sopra della formazione argillosa di base, c'è uno strato di argilla di scadenti proprietà meccaniche, inglobato all'interno dello strato sabbioso alluvionale, cui competono valori di N_{SPT} variabili tra 3 e 7. Come si può osservare dalla Figura 2 della presente relazione, tale strato (argilla b.c.) si ri nviene al di sotto della fondazione della pila 2 (esistente) e della spalla del ponte in sinistra idraulica (spalla 1).

6. PROVE DI LABORATORIO

Durante la terza campagna di indagine del 2015, sono stati prelevati 3 campioni indisturbati nel corso del sondaggio S1, di cui uno nello strato di argilla debolmente marnosa e due nello strato di marna debolmente argillosa. Le profondità di campionamento e le sigle dei campioni sono riportate in tabella 3.

Sondaggio	Quota in mt s.l.m.	Falda (mt dal p.c.)	Prof. (m)	Campioni Indisturbati (sigla)	Prof. (mt dal p.c.)
S1	200.00	7.00	36.00	S1/Ci1 S1/Ci2 S1/Ci3	17.90/18.30 19.40/19.80 25.00/25.50

Tabella 3- Sigle dei campioni prelevati e profondità di campionamento

I campioni sono stati sottoposti ad analisi e prove geotecniche di laboratorio dalla Tecno in S.p.A. I risultati forniti dalle prove sono riepilogati in tabella 4.

Sigla campione	S1/C1	S1/C2	S1/C3
Profondità prelievo (m)	17.90/18.30	19.40/19.80	25.00/25.50
Peso volume naturale γ_n (kN/m ³)	19.86	21.47	21.45
Peso volume del secco γ_d (kN/m ³)	16.44	18.60	18.77
Contenuto d'acqua W (%)	20.81	15.44	14.27
Peso volume dei Granuli G (-)	2.69	2.74	2.66
Porosità n (%)	38.96	32.23	29.49
Indice dei vuoti e (-)	0.64	0.48	0.42
Grado di saturazione S_r (%)	87.8	89.05	90.76
Classe granulometrica	Limo sabbioso argilloso	Limo con argilla sabbioso	Limo argilloso sabbioso
Limiti di Atterberg			
Limite di Liquidità (WL) (%)	32.3	57.5	45.8
Limite di Plasticità (WP) (%)	19.17	29.13	25.55
Indice di Plasticità (IP) (%)	13.13	28.37	20.25
Indice di Consistenza (IC) (%)	0.87	1.48	1.56
Prova Triassiale U.U.			
Coesione non drenata UU (kPa)	283.56	641.849	670.014
Prova Triassiale C.L.U.			
Angolo di attrito interno efficace (°)	30.59	29.21	
Coesione efficace (c) (kPa)	41.34	60.98	
Prova Edometrica			
Coefficiente di compressibilità (mv) (Mpa ⁻¹)	3.86E-02	4.24E-02	
Modulo edom. (Eed) (Mpa)	25.9	23.6	

Tabella 4-Riepilogo dei risultati delle prove di laboratorio eseguite nel 2015 dalla Tecno In

7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO

Le conoscenze acquisite tramite le campagne geognostiche e l'esame dei dati disponibili hanno consentito la definizione dei seguenti parametri geotecnici per i diversi materiali presenti nel sottosuolo in esame:

Riporto e Livello alluvionale superiore	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 17 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$
Coesione	$c' = 0 \text{ kPa}$
Angolo di attrito interno	$\phi' = 27^\circ$

Sabbia	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 18 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 19 \text{ kN/m}^3$
Coesione	$c' = 0 \text{ kPa}$
Angolo di attrito interno	$\phi' = 27^\circ$

Argilla a bassa consistenza	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 19.86 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 20.34 \text{ kN/m}^3$
Coesione non drenata	$c_u = 12 \text{ kPa (spalla sx idraulica)}$ $28 \text{ kPa (pila in dx idraulica)}$

Argilla a elevata consistenza (Campione S1/C1)	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 19.86 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 20.34 \text{ kN/m}^3$
Coesione non drenata	$c_u = 283.56 \text{ kPa}$
Coesione	$c' = 41 \text{ kPa}$
Angolo di attrito interno	$\phi' = 30^\circ$

Limo	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 19.86 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 20.34 \text{ kN/m}^3$
Coesione non drenata	$c_u = 28 \text{ kPa}$

Marna (Campione S1/C2 e S1/C3)	
Peso dell'unità di volume	$\gamma_{nat} = 21.45 \text{ kN/m}^3$
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_{sat} = 21.72 \text{ kN/m}^3$
Coesione non drenata	$c_u = 642.00 \text{ kPa}$
Coesione	$c' = 61 \text{ kPa}$
Angolo di attrito interno	$\phi' = 29^\circ$

Tabella 5 Principali proprietà fisico-meccaniche dei terreni costituenti il sottosuolo in esame

Il deposito di sabbia è stato caratterizzato con lo stesso valore dell'angolo di attrito indicato nella Relazione Geologica del Progetto Preliminare dei "Lavori Urgenti di Ripristino Totale della Funzionalità del ponte sul Fiume Ufita" (Aprile 2016). Tale valore è stato assunto cautelativamente pari a 27° nonostante le correlazioni di letteratura basate sul numero di colpi della prova S.P.T. (De Mello, 1971; Schmertmann, 1975; Kulhawy & Mayne, 1980; Wolf, 1989; Hatanaka & Uchida, 1996) forniscano un valore medio di 37°, che è più prossimo al valore di 35° indicato nella Relazione Geologica facente parte del progetto dei Lavori di Ristrutturazione del Ponte sul Fiume Ufita di Luglio 2002 per conto della Provincia di Benevento.

Gli strati di riporto e i livelli alluvionali, a prevalente matrice sabbiosa, sono stati caratterizzati adottando le medesime proprietà meccaniche del deposito sabbioso.

Il deposito di argilla è stato distinto in due strati, di cui quello superiore è a bassa consistenza mentre quello inferiore ad alta consistenza. Quest'ultimo strato, in cui si sono riscontrati i valori più elevati del numero di colpi N_{spt} , è stato caratterizzato mediante i parametri fisico-meccanici ottenuti dalle prove di laboratorio sul campione S1/C1 (Tecno In, 2015).

L'argilla a bassa consistenza, invece, è stata caratterizzata in termini di coesione non drenata utilizzando correlazioni empiriche con i risultati della prova SPT. Nota la coesione non drenata del campione ($c_u=283.56$ kPa) ed il relativo numero di colpi S.P.T. all'interno dello strato (prof. -15.50 m dal p.c.), l'applicazione della formula di Stroud (1974), che lega i due parametri c_u ed N_{spt} , ha consentito di calibrare il parametro empirico $f_1 = c_u/N_{spt} = 4.05$ da cui è stato possibile stimare anche la coesione non drenata per l'argilla a bassa consistenza ($N_{spt}<10$).

L'unico strato di limo presente nel deposito, al di sotto della pila in destra idraulica (Sondaggio S3 Gennaio 2000), è stato caratterizzato con le medesime proprietà dello strato di terreno argilloso a bassa consistenza.

La caratterizzazione dello strato di marna presente in sinistra idraulica è stato effettuata riferendosi alle prove di laboratorio eseguite dalla Tecno In S.p.A sui campioni S1/C2 (profondità di prelievo di 19.4 m da p.c.) e S1/C3 (profondità di prelievo 25 m) come sintetizzato in Tabella 4.

8. STABILITA' DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

Siccome nel sito in esame sono presenti strati di sabbia sotto falda, è stata valutata la suscettibilità di tali terreni al fenomeno della liquefazione, secondo quanto prescritto al paragrafo § 7.11.3.4.2 della NTC08.

La norma indica le condizioni per cui la verifica a liquefazione può essere omessa, cioè quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. *eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;*
2. *accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di $0,1g$;*
3. *profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
4. *depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;*
5. *distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura 3a nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ ed in figura 3b nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.*

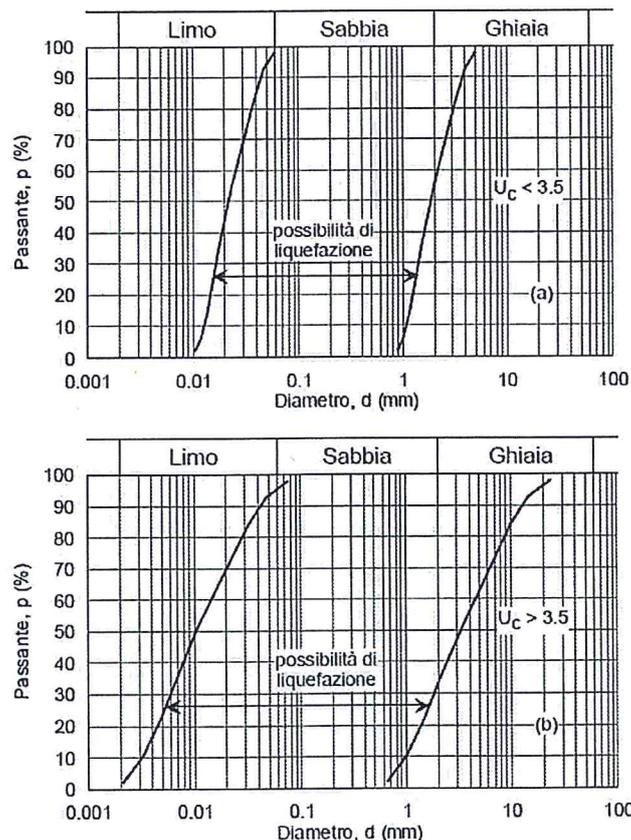


Figura 3 - Fuso granulometrico dei terreni suscettibili di liquefazione

Dato che per il sito in esame le prime tre condizioni di esclusione previste dalla norma non sussistono, si è analizzata la condizione di cui al punto 4 del precedente elenco, sfruttando i dati relativi alle prove SPT effettuate nel deposito sabbioso.

La resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60}$, riportata in tabella 6, è stata valutata mediante la seguente relazione:

$$N1_{60} = N_{SPT,corr} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_v}\right)^{0.5}$$

dove:

$N_{SPT,corr}$ è il numero di colpi della prova SPT corretto per tener conto delle caratteristiche della strumentazione di prova, rispetto ai parametri standard, e della presenza della falda (7.0 m dal piano campagna in corrispondenza della spalla in sinistra idraulica dove è ubicato il sondaggio S1 di Febbraio 2015);

p_a è la tensione verticale efficace di normalizzazione pari a 100 kPa;

σ'_v è la tensione verticale efficace valutata alla profondità di realizzazione della prova.

Sondaggio	N° prova	Profondità (m)	Strato	Ncolpi	N _{spt}	N _{spt,corr}	N1 ₆₀
S1 (Feb. 2015 Tecno In Spa)	1	-2.00/-2.45	Riporto	15-10-8	18	18	31
	2	-4.00/-4.45	Sabbia	13-10-7	17	17	20
	3	-6.00/-6.45	Sabbia	14-30-R	R	-	-
	4	-9.00/-9.45	Sabbia	10-9-11	20	18	15
	5	-11.3/-11.75	Sabbia	13-25-43	68	42	33

Tabella 6- Numero di colpi $(N1)_{60}$ necessario per la valutazione della suscettibilità a liquefazione dello strato di sabbia

Anche il numero di colpi $N1_{60}$ non consente di escludere la suscettibilità a liquefazione del deposito sabbioso. Si sono ottenuti, infatti, alcuni valori di $N1_{60}$ inferiori a 30 a profondità di 4 e 9 m dal piano campagna di riferimento del Sondaggio S1 (Tecno In 2015). Per tale motivo, al fine di escludere la suscettibilità a liquefazione dello strato sabbioso posto al di sopra della formazione argillosa, in fase di progettazione esecutiva si suggerisce di abbinare ai valori di $N1_{60}$ già calcolati e riportati in tabella 6, l'analisi granulometrica del deposito sabbioso, almeno in corrispondenza delle strutture del manufatto interagenti con tale strato (pile/spalle).

9. TIPOLOGIE FONDALI

Sulla base del modello geotecnico di sottosuolo precedentemente definito e delle azioni trasmesse dall'impalcato, nel progetto definitivo si è optato per fondazioni profonde costituite da pali trivellati in c.c.a. sia nel consolidamento delle strutture esistenti del ponte (pila 2 e spalle) sia nella realizzazione della pila nuova (pila 1).

In aggiunta, le fondazioni su pali consentono di contrastare l'effetto di scalzamento causato dalla corrente in occasione di eventi di piena straordinari. Considerate le massime profondità di escavazione riportate nella Relazione Idraulica allegata al presente progetto, una fondazioni di tipo superficiale (anche se adottata in passato sia per le pile sia per le spalle) appare oggi giorno improponibile. Ovviamente anche per le fondazione su pali occorre contemplare gli effetti deleteri di un eventuale scalzamento, che comporta una riduzione di resistenza laterale nella parte sommitale dei pali e, quindi, di capacità portante del sistema fondale (vd. Relazione sulle Fondazioni).

In definitiva, nella progettazione/verifica delle opere fondali del ponte sul fiume Ufita si è tenuto conto oltre che delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione e dei carichi trasferiti dalla sovrastruttura in condizioni statiche e sismiche, dell'effetto di scalzamento prodotto dalla corrente d'alveo.

Per la descrizione dei sistemi fondali adottati e le relative fasi di calcolo si rimanda alla Relazione sulle Fondazioni che è parte integrante del progetto definitivo dei lavori in epigrafe.

10. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

La vigente normativa definisce 5 categorie di sottosuolo (paragrafo § 3.2.2) riportate in Tabella 7. La classificazione di un deposito si basa sul valore della velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 metri di profondità a partire dal piano di posa delle fondazioni.

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 7 - Categorie di sottosuolo (NTC08)

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,30}$ è definita in base alla seguente espressione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

dove:

h_i è lo spessore in metri dell' i -esimo strato compreso nei primi 30 metri di profondità;

$V_{s,i}$ è la velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N rappresenta il numero di strati compresi nei primi 30 metri di profondità.

La caratterizzazione sismica del sito in esame è stata realizzata con riferimento alle 2 prospezioni sismiche superficiali (MASW), realizzate dalla Geo-In nel mese di Novembre 2014, e alla prova sismica in foro (Down-Hole) realizzata dalla Tecno-In nel mese di Febbraio 2015. L'ubicazione delle prove è riportata nello stralcio planimetrico di figura 1.

Le indagini sismiche di superficie sono state condotte con l'allineamento di 12 geofoni da 4.5 Hz, spaziatura intergeofonica di 4.0 m e offset di energizzazione a 5.0 e 7.0 m. I risultati sono stati uniti ed implementati ottenendo un unico sismogramma a 24 tracce che ha fornito i risultati di tabella 8.

MASW 1				MASW 2			
Sismostrato	Profondità dal p. c.	V _s	V _{s,30}	Sismostrato	Profondità dal p. c.	V _s	V _{s,30}
	[m]	[m/s]	[m/s]		[m]	[m/s]	[m/s]
1	0.0-0.7	129	374	1	0.0-1.1	169	408
2	0.7-8.7	178		2	1.1-5.4	203	
3	8.7-12.7	430		3	5.4-16.8	368	
4	12.7-30.0	816		4	16.8-30.0	887	

Tabella 8- Risultati delle prove MASW

La prospezione sismica Down-Hole è stata realizzata con un sensore da foro a cinque componenti, generando i segnali sismici mediante la battitura di un martello sia contro un piattello metallico, per la generazione delle onde P, sia contro un asse, contrastato dal peso dell'assale di un autoveicolo per la generazione delle onde S. I segnali relativi alle onde sono stati acquisiti tramite un sistema di rilevamento composto da 5 geofoni, di cui 1 verticale (per la rilevazione delle onde P) e 4 orizzontali (per la rilevazione delle onde S). Questi elementi sono disposti nel foro in modo tale da formare l'uno con l'altro un angolo di 45°. Ciò consente di acquisire e determinare correttamente le onde S, a prescindere da come è orientato nel foro il sistema di rilevamento rispetto al punto di battuta. I siti di energizzazione sono stati posizionati a 1.55 m dal perforo. I segnali sismici sono stati acquisiti posizionando il geofono da pozzo a passi di un metro, vincolando lo stesso alle pareti del foro mediante espansione a camera d'aria.

L'analisi dei singoli sismogrammi permette di determinare i tempi di arrivo delle onde P ed S. Noti i tempi di arrivo delle onde elastiche ed il posizionamento del geofono è stato possibile ricavare le velocità di propagazione delle onde P ed S riportate in tabella 9.

Profondità dal p.c.	V_p	V_s	ρ	G	$V_{s,30}$
[m]	[m/s]	[m/s]	[kg/m ³]	[MPa]	[m/s]
1	1085	254	1400	91	438
2	1371	249	1400	87	
3	1020	249	1400	87	
4	1049	285	1400	114	
5	984	350	1500	184	
6	1024	310	1500	145	
7	748	222	1500	74	
8	759	208	1500	65	
9	698	211	1500	67	
10	700	265	1500	105	
11	925	322	1500	156	
12	1254	453	1500	307	
13	1272	392	2000	306	
14	1361	394	2000	309	
15	1554	310	2000	191	
16	1951	298	2000	177	
17	1717	380	2000	287	
18	1992	468	2000	435	
19	2120	554	2150	659	
20	2266	368	2150	291	
21	2122	477	2150	489	
22	2036	417	2150	374	
23	2123	473	2150	481	
24	2079	454	2150	442	
25	1919	525	2150	593	
26	1996	528	2150	600	
27	2170	620	2150	827	
28	2038	679	2150	992	
29	2322	884	2150	1679	
30	2125	999	2150	2144	
31	2323	999	2150	2144	
32	2220	825	2150	1465	
33	2378	884	2150	1680	
34	2436	942	2150	1909	
35	2437	908	2150	1773	
36	2498	942	2150	1910	

Tabella 9-Risultati della prova Down-Hole

I risultati delle diverse indagini sono stati sovrapposti in termini di V_s (Fig. 4) considerando la differenza di quota delle due prove sismiche MASW rispetto alla prova Down-Hole, la cui quota è stata considerata come quota di riferimento.

INDAGINI SISMICHE

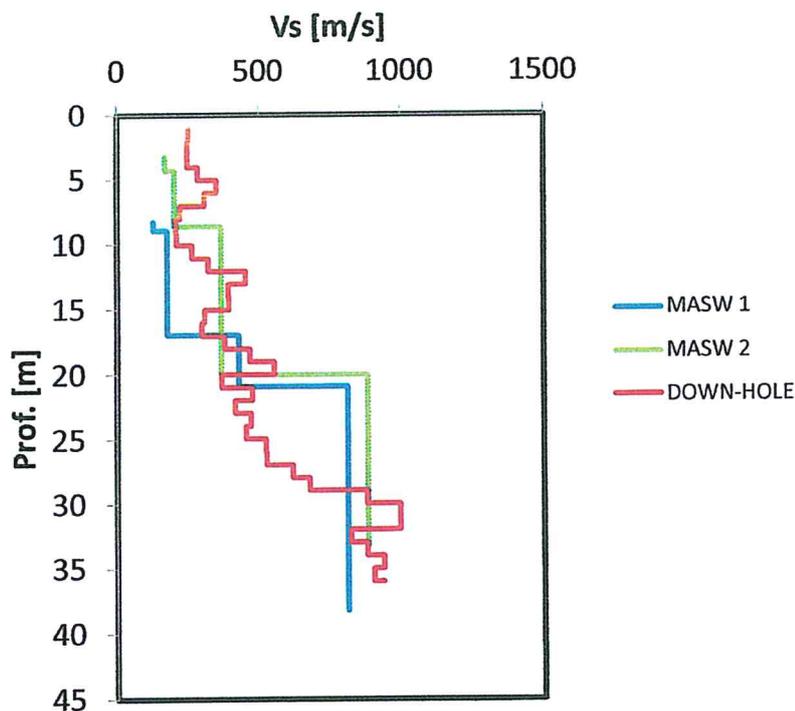


Figura 4- Valori di Vs misurati nelle diverse prove sismiche

La figura 4 evidenzia una buona corrispondenza dei risultati ottenuti dalle diverse prove, specialmente entro i primi metri di profondità ($z < 20\text{m}$) dove le prove MASW sono in genere più attendibili. In definitiva, in base ai profili di Vs-z di figura 4 e al valore della $V_{s,30}$ riportato nelle tabelle 8 e 9 per le tre prove, è possibile attribuire al sito in esame la categoria di sottosuolo B ($360 \text{ m/s} < V_{s,30} < 800 \text{ m/s}$) in accordo con quanto riportato nella Relazione Geologica del Progetto Preliminare dei "Lavori Urgenti di Ripristino Totale della Funzionalità del ponte sul Fiume Ufita" (Aprile 2016).